Roko Žarnić

LASTNOSTI GRADIV



UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij

Ljubljana 2003

Roko Žarnić
LASTNOSTI GRADIV

Izdala: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij

Avtor: Roko Žarnić
Naklada: 1400 izvodov
Tisk: Potens d.o.o.
Ljubljana, 2005

CIP – Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitena knjižnica, Ljubljana

691(075.8)
620.1/.2(075.8)

ŽARNIĆ, Roko
Lastnosti gradiv / [besedilo in ilustracije] Roko Žarnić. - 1.

Izd. – Ljubljana : Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra
Za preskušanje materialov in konstrukcij, 2003

ISBN 961-6167-57-X

121707776

VSEBINA

Stran

UVOD 1

1 1

PREGLED GRADIV 1

UVOD 1
Življenjski krog gradiv 2
KLASIFIKACIJA GRADIV 3
Splošna klasifikacija gradiv 3
Klasifikacija gradiv po njihovem izvoru 6
Klasifikacija gradiv po namembnosti 10
VPRAŠANJA 16

2 18

STANDARDIZACIJA 18

KAJ JE STANDARDIZACIJA 18
OSNOVNI POJMI S PODROČJA MEROSLOVJA IN STANDARDIZACIJE 19
HIERARHIČNA RAZPOREDITEV STANDARDIZACIJ 21
Mednarodna standardizacija 21
Regionalna standardizacija 24
Nacionalna standardizacija 25
Panožna standardizacija 26
Interna standardizacija 26
SLOVENSKA STANDARDIZACIJA 26
POLITIČNA IN PRAVNA PODLAGA ZA EVROPSKO ZAKONODAJO 28
Inštrumenti evropske zakonodaje 29
“Novi” in “stari” pristop k tehnični harmonizaciji 29
Evropski standardi za konstrukcije (EUROCODE) 32
VPRAŠANJA 34

KERAMIKE 36

HIERARHIČNA RAZPOREDITEV KERAMIK 36
Stekla 37
Keramike za široko uporabo 37
Posebne vrste keramik 38
Naravne keramike 38
Elektrokeramike 38

3 40

GRADBENI KAMEN IN MINERALNI AGREGATI 40

VRSTE KAMENIN 41
Magmatske (vulkanske, eruptivne) kamenine 41
Sedimentne kamenine 42
Metamorfne kamenine 42
Nahajališča v Sloveniji 43
FIZIKALNE IN MEHANSKE LASTNOSTI KAMNA 44
Fizikalne lastnosti 44
Mehanske lastnosti 45
ARHITEKTURNO - GRADBENI KAMEN 47
Značilnosti kamenin, ki se najpogosteje uporabljajo v gradbeništvu 47
Kakovostne lastnosti kamna 49
MINERALNA VOLNA 50
TEHNIČNI KAMEN IN MINERALNI AGREGAT 51
Vpliv lastnosti agregata na lastnosti betona 52
VPRAŠANJA 58

4 60

GRADBENA KERAMIKA IN STEKLO 60

GRADBENA KERAMIKA 60
Izdelava gradbene keramike 60
Vrste gradbene keramike 62
Lastnosti zidakov in strešnikov 64
STEKLO 66
Zgodovinski razvoj 66
Proizvodnja in splošne lastnosti stekla 67
Posebne vrste stekel 68
Uporabnost stekel 70
OGNJEVZDRŽNE KERAMIKE 72
VPRAŠANJA 73

5 75

MINERALNA VEZIVA 75

ZRAČNA VEZIVA 75
Mavec (gips) 75
Apno 78
HIDRAVLIČNA VEZIVA 81
Cement 81
VODA 95
VPRAŠANJA 97

6 99

MALTE IN BETONI 99

MALTE 99
Vrste malt in osnovne sestavine 99
Malte za zidanje 101

Malte za omete **102**
Polimerno modificirane malte **104**
BETONI **105**
Sveža betonska mešanica **105**
Otrdeli beton **108**
Vrste betonov **115**
Agresivni vplivi in vzroki poškodb betona **123**
BETON IN EUROCODE 2 **130**
VPRAŠANJA **131**

KOVINE **133**
HIERAHIČNA RAZPOREDITEV KOVIN **133**
Železove zlitine **134**
Neželezove zlitine **135**

7 **137**
ŽELEZOVE ZLITINE **137**
UVOD **137**
PROIZVODNJA ŽELEZA IN JEKLA **138**
OSNOVNE VRSTE ŽELEZOVIH KOVIN **144**
Fazni diagram železo-ogljik (Fe-C) **144**
Jeklo **145**
Sodobna konstrukcijska jekla, ki se proizvajajo v Sloveniji **147**
Nerjavno jeklo **148**
Lito železo **149**
MEHANSKE LASTNOSTI JEKLA **150**
Natezni diagram **150**
Lastnosti konstrukcijskih in betonskih jekel **154**
Betonska jekla **155**
KOROZIJA ŽELEZOVIH KOVIN **157**
VPRAŠANJA **159**

8 **160**
NEŽELEZOVE ZLITINE **160**
UVOD **160**
ALUMINIJ **160**
Proizvodnja **160**
Uporaba aluminija **162**
Eurocode 9 **165**
BAKER, MEDENINA, BRON **166**
Baker **166**
Medenine **168**
Broni **169**
CINK, KOSITER IN SVINEC **170**
Cink **170**
Kositer **171**

Svinec 171
KROM 172
MAGNEZIJ 172
NIKELJ 173
TITAN 174
ŽAROODPORNE KOVINE 175
ŽLAHTNE KOVINE: ZLATO, SREBRO, PLATINA 175
Zlato 175
Srebro 176
Platina 176
VPRAŠANJA 176

POLIMERI 178
HIERAHIČNA RAZPOREDITEV POLIMEROV 178
Termoplasti (Plastomeri) 179
Duroplasti (Duromeri) 180
Naravni polimeri 180

9 182

UMETNE MASE 182

UVOD 182
OSNOVNE SKUPINE POLIMEROV 184
TEHNIČNE LASTNOSTI UMETNIH MAS 187
Gostota 187
Mehanske lastnosti umetnih mas 187
Toplotne lastnosti 189
Prepustnost polimerov 189
Trajnost 189
OBLIKOVANJE UMETNIH MAS 191
Polimerizacija v proizvodnih obratih in na gradbiščih 191
Osnovni postopki za izdelavo elementov iz umetnih mas 192
UMETNE MASE V GRADBENIŠTVU 195
Konstrukcijske umetne mase 196
Cevi 196
Membrane 197
Polimerne ponjave 198
Premazi 198
Lepila 199
Polimerni in s polimeri modificirani betoni 199
Polimerne pene in celičasti izdelki 200
RECIKLIRANJE IZDELKOV IN ODPADKOV IZ UMETNIH MAS 200
Pridobivanje energije iz polimernih odpadkov 202
Vračanje umetnih mas v življenjski krog 203
VPRAŠANJA 206

10 207

OGLJIKOVODIKOVI MATERIALI 207
UVOD 207
OGLJIKOVODIKOVA VEZIVA 207
Osnovne kemične lastnosti 207
Fizikalne lastnosti 210
Mešanice ogljikovodikovih veziv 212
BITUMENSKE MEŠANICE 213
Sestava mešanic 213
Lastnosti mešanic 215
Projektiranje sestave bitumenske mešanice 216
UPORABA OGLJIKOVODIKOVIH MATERIALOV 218
Cestogradnja 218
Bitumenske hidroizolacije 222
VPRAŠANJA 226
KOMPOZITI 228
HIERAHIČNA RAZPOREDITEV KOMPOZITOV 228
Disperzijske ojačitve matrice 229
Ojačitve matrice z delci 229
Ojačitve matrice z vlakni 230
Lamelirane strukture 230
Naravni kompoziti 231
11 232
UMETNI KOMPOZITI 232
UVOD 232
KOMPONENTE UMETNIH KOMPOZITOV 235
Polimerna matrica 235
Armaturna vlakna 236
Sestavljanje komponent 239
BETONSKA ARMATURA 242
IZDELAVA KOMPOZITOV 244
TRAJNOST ARMIRANIH PLASTIK 246
Razvoj in vpliv mikrorazpok ter odpornost kompozita na utrujanje 247
Propadanje zaradi vdora vode in zaradi osmoze 248
VPRAŠANJA 249
12 252
NARAVNI KOMPOZITI 252
LES 252
LASTNOSTI LESA 255
Fizikalne lastnosti lesa 255
Mehanske lastnosti 262
Napake v lesu in poškodbe lesa 264
PREDELAVA LESA 267

V gozdu obdelan les 267
Končno predelan les 267
LASTNOSTI LESA IN EUROCODE 5 270
KONOPLJA - VLAKNASTA ENOLETNICA 272
PAPIR 273
VPRAŠANJA 278
13 280
LEPILNI, TESNILNI IN ZAŠČITNI MATERIALI 280
UVOD 280
LEPILA 280
Teorija lepljenja 280
Vrste lepil 282
Lastnosti lepljenih stikov 285
TESNILNI MATERIALI 286
Mineralne malte 287
Kiti 287
Mastiks tesnilne mase 288
Polimerne tesnilne mase 288
Izvedba stikov 289
PREMAZI IN DRUGE VRSTE POVRŠINSKIH ZAŠČIT 290
Polimerni premazi 290
Anorganske prevleke 296
Katodna zaščita površin 297
Potapljanje, galvanizacija in pršenje 297
VPRAŠANJA 299
PRESKUŠANJE GRADIV 301
SPLOŠNE LASTNOSTI PREISKAV 301
Namen preskušanja 302
Porušne in neporušne preiskave 304
Statične in dinamične preiskave 305
Tehnološke preiskave 305
MEHANSKE LASTNOSTI GRADIV 306
Krhki in elastoplastični materiali 307
PORUŠNE IN DELNO PORUŠNE PREISKAVE 309
Statične preiskave 309
Dinamične preiskave 315
Trdota materiala 319
NEPORUŠNE PREISKAVE 324

Postopki z meritvijo odboja znane mase **324**
Akustične metode **325**
Metode na osnovi resonance **325**
Metode z uporabo sevanja **326**
TEHNOLOŠKE PREISKAVE **326**
Odpornost proti obrabi **326**
Odpornost robov **327**
Erozija materiala **327**
Delovanje kavitacije **327**
Zmrzlinska odpornost **327**
Prepustnost vode in zraka **328**
Konsistenca **329**
Stabilnost prostornine cementa **330**
Ugotavljanje prisotnosti apnenih zrn **330**
Preiskave geometričnih lastnosti **331**
LITERATURA **332**
SEZNAM SLIK **333**
SEZNAM PREGLEDNIC **338**

UVOD

1

PREGLED GRADIV

UVOD

Gradiva so vsi tisti materiali, ki se uporabljajo v graditeljstvu. Sodijo med tehnične materiale v ožjem pomenu besede, to je med snovi, ki so tehnično uporabne v trdnem agregatnem stanju.

Razvoj in napredek družbe je ozko povezan z odkrivanjem, razvojem uporabe in izdelave gradiv. Gradiva in vsi ostali tehnični materiali vplivajo na tehnike vseh človeških aktivnosti in razvoj tehnologij. Odkritja, izumi in prilagoditev materialov so močno vplivali na razvoj civilizacij in so zato celotna zgodovinska obdobja imenovana po njih (kamena, bronasta, železna doba). Materiali so omogočali razvoj možnosti preživetja - prehrane, bivanja, gradnje in vojskovanja. Prvotno je človek uporabljal le naravna gradiva iz svoje bližnje okolice (les, kamen). Z razvojem njegove ustvarjalnosti se je zviševala raven predelave in obdelave naravnih gradiv in proizvodnja novih vrst gradiv (opeka, kovine). Danes obstajajo različna gradiva, predpogoj za uspešno projektiranje in gradnjo objektov pa je solidno znanje o gradivih.

Znanje o gradivih obsega znanje o tehnoloških postopkih za njihovo pridobivanje in predelavo, o kemični sestavi in fizikalnih ter tehničnih lastnostih pred uporabo in v času predelave, obnašanju po vgradnji in o vseh bistvenih spremembah v dobi njihove uporabe.

Nazoren primer ustrezne uporabe gradiv je ločna konstrukcija. Stare civilizacije niso poznale gradiv z zadostno natezno trdnostjo, dobro pa so poznale keramična gradiva, vključno z naravnim kamnom, ki imajo veliko tlačno trdnost. Zato so iznašli lok, konstrukcijo estetskega videza, v kateri je gradivo le tlačno obremenjeno. Primer iz sedanje dobe so vesoljska plovila. Teoretično so jih zasnovali dobrih petdeset, let preden je razvoj materialov omogočil njihovo izdelavo. Zgodovina nam znanih civilizacij je tudi zgodovina razvoja gradiv: sestavljenost, raznolikost in celotna količina gradiv se stalno povečuje od omejenega števila v kameni dobi do ekspanzije v industrijski dobi.

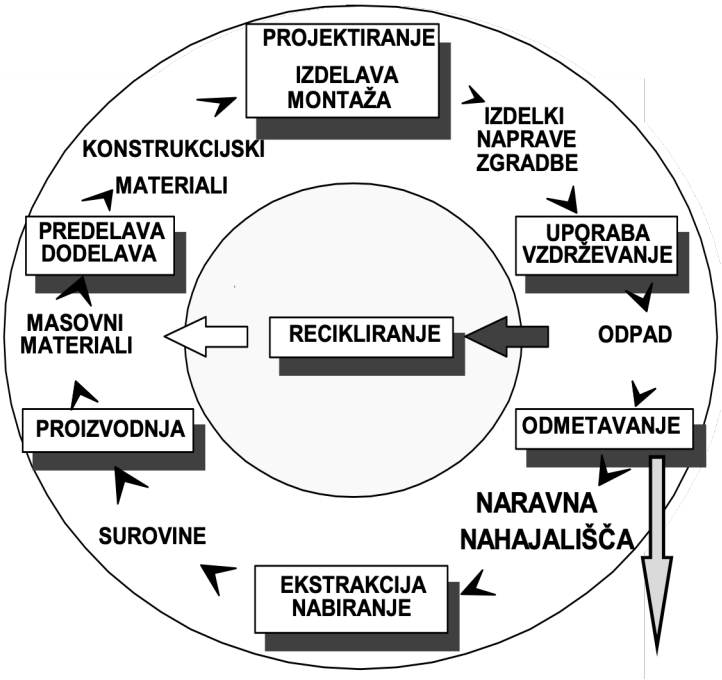
Sodobna ekspanzija razvoja gradiv je povezana z izčrpanjem področij njihove uporabnosti. Ko se doseže meja uporabnosti posameznega materiala, se pojavi novo gradivo, ki omogoči nadaljnji razvoj tehnologij in izdelavo novih vrst

izdelkov in konstrukcij. V zadnjih petdesetih letih je prišlo v uporabo več tehničnih materialov kot v celotnem dotedanjem zgodovinskem obdobju. Rast porabe klasičnih gradiv v industrijsko razvitih deželah se umirja, poraba razmeroma novih gradiv kot so aluminij, polimerni in kompozitni materiali pa se naglo povečuje, napoveduje pa se tudi masovna uporaba razvijajočih se materialov, kot so konstrukcijska keramika in intermetali.

Gradiva vplivajo na razvoj tehnologij gradnje in izdelave gradbenih polizdelkov, a obstaja tudi obraten vpliv. Nove tehnologije zahtevajo nova gradiva ali modifikacijo klasičnih gradiv. Prilagajajo se posebnim zahtevam in potrebam in nastajajo kot tehnična kombinacija visoko specializiranih materialov, kateri so posamezno razviti za določene namene. Take kombinacije so nujne zlasti pri snovanju izolacijskih gradiv ali gradiv namenjenih za izdelavo ekstremno obremenjenih konstrukcijskih elementov. Pri sodobnih gradivih se vpliv človeškega količnika na kakovost izdelave gradiv sicer zmanjšuje, vendar pa je pri velikem številu še vedno zelo pomemben. Tako je na primer, kakovost vgrajenega betona močno odvisna od izkušenosti in vestnosti izvajalca.

Življenjski krog gradiv

V svojem življenjskem krogu gradivo prehaja skozi več stadijev, od ekstrakcije ali pridobivanja preko proizvodnje, predelave, dodelave, uporabe do odpada (Slika 1). Nekatere naravne snovi (les, kamen) so neposredno tehnično uporabne, večina gradiv pa nastaja s tehnološkimi postopki (kemičnimi in fizikalnimi) iz različnih naravnih snovi - surovin.



Slika 1: Življenjski krog gradiv

Na primeru jekla in papirja lahko ponazorimo posamezne stadije v življenju gradiva. Iz surovin (ruda, les) se s predelavo dobijo masovni materiali (siva zlitina, lesna pulpa), nato konstrukcijska gradiva (jekleni nosilci, lepenka) iz katerih se izdelajo komponente konstrukcij ali gradbenih polizdelkov. Po poteku življenjske dobe konstrukcije ali izdelka se le ta odstrani in predela v

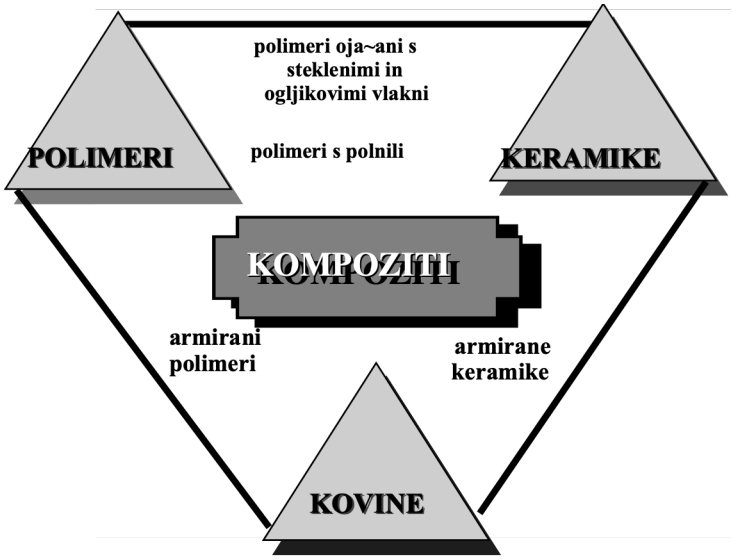
novi izdelek. Jeklo in papir sodita med gradiva, ki jih je mogoče skoraj povsem reciklirati in ponovno vključiti v življenjski krog.

KLASIFIKACIJA GRADIV

Obstaja več načinov klasifikacije gradiv, vse pa izhajajo iz določenih klasifikacijskih kriterijev. Nekatere klasifikacije temeljijo na primerjavi nasprotnosti lastnosti gradiv in zato poudarjajo samo nekatere njihove značilnosti. Druge izhajajo iz primerjav njihove uporabnosti ali iz primerjav fizikalnih značilnosti. Vsaka izmed takih klasifikacij obravnava le del njihovih značilnosti. Najbolj dosledna in splošna klasifikacija izhaja iz narave samega materiala, to je iz njegove kemične narave in od tod postavljene hierarhije. Slednjo obravnavamo v nadaljevanju kot posplošeno klasifikacijo, ki je primerna za vse tehnične materiale. Poleg te sta prikazani tudi klasifikaciji, ki sta primerni za obravnavo gradbenih materialov.

Splošna klasifikacija gradiv

Pri splošni klasifikaciji se gradiva delijo v štiri jasno ločljive skupine: kovine, polimere, keramike in kompozite ter več vmesnih podskupin, kot je to prikazano na sliki 2.



Slika 2: Osnovne skupine materialov

Kovine definirajo značilne fizikalne lastnosti, ki so posledica kovinskih kemijskih vezi. Keramike definirajo lastnosti, ki so posledica kombinacije ionskih in kovalentnih vezi. Polimere definirajo lastnosti, ki so posledica visoke stopnje kovalentnih vezi znotraj verig molekul in šibkih Van der Waalsovih vezi med verigami molekul. Ostali materiali se lahko prepoznajo kot razredi kovin, keramik ali polimerov (zlitine kot več fazne kovine, cementi kot keramika, gume kot polimeri) ali pa kot kompoziti (beton, les, papir). Dejansko so vsi več fazni materiali kompoziti, vendar pa s tem nazivom imenujemo predvsem kombinacije dveh ali več eno ali večfaznih materialov, ki imajo neodvisne lastnosti in se lahko uporabljajo kot samostojni materiali. Kompozite tvorimo s kemičnim, fizikalnim in/ali mehanskim povezovanjem. Lastnosti kompozitov so prilagojene njihovi uporabi in so boljše od lastnosti posameznih sestavnih

materialov za predvideno namembnost.

Kovine

Kovine in kovinske zlitine imajo lastnosti, ki jih uvrščajo med najbolj popolna konstrukcijska gradiva. Prenašajo visoke mehanske obremenitve in se jih da oblikovati in predelovati z mehanskimi in toplotnimi postopki. Dobro prevajajo toploto in električni tok in imajo visoko tališče. Zaradi visoke stopnje simetričnosti osnovnih kovinskih struktur (značilnih enotinih celic) so medsebojno kompatibilne, kar omogoča tvorbo velikega števila zlitin. Tradicionalno se zlitine delijo na železne (ferolegure) in neželezne ter dalje v podskupine. Pri železnih kovinah so to karbonska jekla, jeklove zlitine in lita železa. Neželezove zlitine se delijo v podskupine kot so lahke zlitine, težke zlitine, žaroodporne kovine in plemenite kovine.

Glede na obseg proizvodnje so osnovne konstrukcijske kovine: železo, aluminij, baker, nikelj in magnezij. Poleg teh se še kakih 20 kovin uporablja v zlitinah zaradi izboljšave njihovih osnovnih lastnosti. Tako se z legiranjem na pr. lahko trdnost čistega aluminija poveča 20 krat, bakra 14 krat in železa 13 krat, pri tem pa se ne spremeni bistveno plastična deformabilnost. Delež zlitin, ki imajo za osnovo pet osnovnih konstrukcijskih kovin znaša približno 95% vseh konstrukcijskih kovin, od tega je železovih zlitin 85%. Železne zlitine so v primerjavi z drugimi razmeroma poceni, imajo pa velik razpon mikrostruktur in lastnosti: od sivega železa, ki je primerno za vlivanje, do posebnih jekel, ki imajo visoko trdnost. Zlitine ostalih osnovnih konstrukcijskih kovin zadoščajo posebnim zahtevam kot so: manjša gostota, velika kemična obstojnost, električne in magnetne lastnosti itd. Za odpornost zlitin na visoke temperature se uporabljajo molibden, tantal, volfram in renij, v nuklearnih reaktorjih cirkonij in hafnij. Posebne zlitine (superlegure), prenesejo temperature do 1100°C. Osnovo tvori visokosimetrična struktura (prostorsko centrirana kubična celica) kombinirana iz niklja, železa in kroma. Veliko trdnost in kemično obstojnost (odpornost proti oksidaciji) pri visokih temperaturah zagotavljajo dodani aluminij, titan, molibden, cirkonij, bor in hafnij. Uporaba dragocenih kovin (zlato, srebro, platina, paladij, rodij, rutenij, osmij, iridij) omogoča tvorenje zlitin posebnih tehničnih lastnosti.

Keramike

Keramike so najbolj razširjena konstrukcijska gradiva, med katera sodijo:

- naravne keramike (sedimentne in vulkanske kamenine in minerali, led),
- steklaste keramike na osnovi gline (lončarska keramika, porcelan, opeka),
- cementi,
- stekla na osnovi silicijevega dioksida,
- kristalične keramike (konstrukcijske keramike za posebne namene).

Skupna lastnost vseh keramik je nekovinski karakter in krhko trdno stanje visoke trdote in tlačne trdnosti. Zato se pri sodobnem razvoju keramik skušajo razviti take, ki imajo večjo natezno trdnost in so odporne na hitre temperaturne spremembe. Večina keramik je poroznih (reda velikosti do 20%), kar vpliva na njihovo kakovost. Pore sicer zmanjšujejo trdnost materiala, vendar ne povzročajo zareznega učinka kot mikrorazpoke, ki so posledica proizvodne tehnologije. Raznovrstnost keramičnih struktur je pogojena s kombinacijami ionskih in kovalentnih vezi. Ionske keramike so sestav kovin in

nekovin, kovalentne keramike pa sestav dveh nekovin. Poseben primer popolne kovalentne keramike je diamant, ki je čisti element ogljik.

Polimeri

Skoraj vsi biološki sistemi so zgrajeni iz polimerov. Ti opravljajo mehanske funkcije (les, kost, hrustanec, koža), so pa tudi regulatorji kemičnih in fizikalnih funkcij, ki pomenijo življenje. Naravne polimere uporabljamo že dolga stoletja, umetni pa so znani le kakih sto let. Prva sta bila bakelit in celuloid (dejansko kompozitna materiala), ki sta bila slabših lastnosti kot jih imajo naravni polimeri. Sodobni umetni polimeri po mehanskih lastnostih presegajo naravne, saj se lahko primerjajo z aluminijem. Polimerne matrice, ki so ojačene s steklenimi, ogljikovimi ali poliamidnimi vlakni, se kot kompozitni materiali uspešno uporabljajo pri ekstremno obremenjenih konstrukcijah kot so to letala in druga plovila.

Polimerni materiali, imajo manjšo togost, trdoto in trdnost kot keramike ali kovine. V primerjavi s kovinami je pri polimerih specifična toplotna kapacitivnost približno petkrat večja in toplotna prevodnost do sto tisoč krat manjša. Zato so polimeri primerni za izdelavo toplotnih izolacij še posebno takrat, ko so v penasti obliki. Zaradi razmeroma nizkega tališča, je pri uporabi polimerov potrebno upoštevati vpliv temeraturnih sprememb okolja, ki lahko vlivajo na spremembo njihove deformabilnosti in trdnosti. Polimerni materiali so zanimivi tudi zato, ker so tehnolologije za njihovo pridobivanje razmeroma enostavne, njihove lastnosti se lahko kontrolirajo in spreminjajo s kemičnimi in fizikalnimi postopki, so pa tudi ekološko zanimivi, saj jih ni težko reciklirati.

Kompoziti

Nastanek različnih kompozitnih materialov je posledica potrebe po izboljšavi mehanskih in vseh ostalih lastnosti osnovnih materialov. Večina kompozitov je sestavljenih iz osnovnega materiala (matrica) in dodatnih materialov (ojačitve, polnila, plastifikatorji, maziva), ki kompozitu dodajajo ali spreminjajo določene lastnosti.

Najbolj enostavni kompoziti so penasti materiali. Dodatni material je plin - velikokrat je to atmosferski plin, ki je razpršen v matrici in proti njej inerten (poliuretanske pene, penobeton itd.). Plin se uvaja v matrico kot komprimiran plin, s kemično reakcijo, s penastimi substancami, z razgradnjo dodatkov v matrici itd. Penasti materiali imajo lahko zaprte celice in se uporabljajo kot konstrukcijski ali izolacijski materiali. Če pa imajo celice odprtega tipa, se uporabljajo kot filtri ali absorberji.

Pene (poliuretanska pena na pr.) se lahko vbrizgajo v odprtine v gradivih, ki z njimi ne reagirajo, in se tako uporabljajo kot toplotno, zvočno ali električno izolativni material. Največ penastih materialov je polimerov - obstaja več kakor dvajset vrst polimernih pen različnih gostot. Elastomerne pene so zelo gibke, stisljive in mehke. Obstajajo pa tudi pene uporabne v nosilnih konstrukcijah ali celo take, ki se uporabljajo namesto jeklenih vzmeti.

Kompoziti z najbolj razširjeno uporabo so les in betoni (vključno z armiranimi betoni in asfaltbetoni). Les je naravni kompozit iz celuloznih vlaken v matrici lignina, ki pa vsebuje še dodatne komponente iz organskih spojin in anorganskih kristalov. Betoni so umetni kompoziti sestavljeni iz naravnih komponent -veziva

(cement, asfalt), agregatov, armature (jeklo, tkanine, vlakna), vode in različnih dodatkov (tudi plinov pri penobetonih in plinobetonih). Letna proizvodnja betonov presega letno proizvodnjo vseh kovin, masa uporabljenega lesa pa presega skupno maso uporabljenega betona in kovin.

V matrico se pogosto uvaja trden, sekundaren material, ki spreminja določeno lastnost matrice: kemično obstojnost, toplotno stabilnost, dimenzijsko stabilnost, gostoto, togost, trdoto, trdnost, žilavost, drsnost, električno prevodnost, toplotno prevodnost, obdelovalnost. Z uvajanjem nevtralnega polnila se pri nekaterih kompozitih lahko bistveno zmanjša njegova cena s tem, da se zahtevane lastnosti ne spremenijo pod sprejemljivo mejo.

Lepila, barve in premazi so tudi sestavni deli kompozitov. Kompozit, ki je sestavljen s pomočjo lepila, je uspešen, če je porušna trdnost stika med lamelo in lepilom večja od porušne trdnosti osnovnih lamel ali samega lepila (lepljeni lamelirani leseni nosilci, ojačitve betonskih konstrukcij z dolepljenjem jeklenih trakov). Nekatere strukture, ki so vezane z lepili, so bolj obstojne od osnovnih materialov (lepilo lahko deluje kot protikorozijski premaz), obremenitve prenašajo bolj enakomerno kot zvari ali kovinska vezna sredstva pri jeklenih konstrukcijah, vendar so temperaturno bolj občutljiva in težje je preverjanje kakovosti stikov. S premazi se ščitijo mejne površine materialov, spreminjajo se njihove adhezivne lastnosti in izboljšuje se estetski videz. Najbolj uspešni premazi so tanki filmi mrežastih polimerov, ki se tvorijo na površini materiala med njegovim prekrivanjem.

Klasifikacija gradiv po njihovem izvoru

Naravna gradiva

Osnovna naravna gradiva (preglednica 1) so tista, ki jih lahko uporabljamo v manj ali bolj obdelani obliki po odvzemu iz naravnih nahajališč. Najbolj pogosto uporabljamo tradicionalna gradiva: les in kamen v različnih oblikah od blokov do gramoza in lomljenca. Obe gradivi imata veliko estetsko vrednost ter ugodne fizikalne lastnosti, kamen pa je zelo trajen. V novejšem času, ko beton in druga umetna gradiva nadomeščajo kamen, se ta uporablja za obloge in okrasne elemente objektov.

Preglednica 1:Naravna gradiva

Vrsta	**gradiva**	**Ime gradiva**
Kamen	eruptivni	granit, sienit, diorit, gabro, porfir, diabaz, bazalt, vulkanski tufi
	sedimentni	peščenjak, konglomerat in breča, apnenec, dolomit, pesek, gramoz
	metamorfni	gnajsi, filit, serpentin, marmor
Les	listavci	hrast, bukev, esen, brest, gaber, javor, topol, plutovec
	iglavci	macesen, bor, jelka, smreka, tisa
	tropski	teak, mahagonij, palisander, ebanovina
Zemljine		glina, ilovica
Naravni bitumen		bituminozni apnenci in škrilji, naravni asfalt
Naravni asfalt		trinidadski asfalt
Druga naravna gradiva		kože, trsje, slama, listje tropskih rastlin, led, sneg, voda

Med druga naravna gradiva sodijo voda, kot sestavni material za izdelavo mnogih umetnih gradiv, zemljinska gradiva, ki se uporabljajo pri cestogradnjah in inženirskih objektih (pregrade, nasipi), naravni bitumni in asfalt ter gradiva, ki jih uporabljajo lokalne civilizacije. Ta so: glina, listje tropskih rastlin, slama, koža, ledeni bloki itd.

Umetna gradiva

To so gradiva, ki so narejena s kemično in mehansko predelavo naravnih organskih in anorganskih surovin. Danes se večinoma uporabljajo umetna gradiva, tradicionalna pa so: enostavna keramika, apno, mavec, malte, steklo, baker, svinec in prvobitni betoni iz rimskih časov.

Apno in apneno malto so uporabljali Egipčani pred 5000 leti pri gradnji piramid in Izraelci v času kralja Salomona. To gradivo so poznale tudi kulture v naših krajih, kljub temu, da se je zidalo tudi "na suho" to je z zlaganjem kamna brez veziva.

Mavec so uporabljali Egipčani in Rimljani kot dodatek maltam ali kot samostojno gradivo za izdelavo okrasov in štukatur.

Cement je danes eno izmed najbolj pomembnih gradiv, ker je sestavni del betona in različnih malt. Stari Rimljani so izdelovali naravni cement, v katerem je bil osnovna sestavina vulkanski pepel - pucolan (pridobivali so ga pri kraju Pozzuoli na pobočju Vezuva). V srednjem veku se je uporaba betonov izgubila in ponovno odkrila v 19. stoletju, ko so iznašli portland-cement (J.Aspdin je 1824 leta žaril mešanico apnenca in gline). Pri Splitu je že leta 1865 začela obratovati prva tovarna cementa.

Keramika, ki jo izdelujemo iz gline, je ena najstarejših gradiv. Na soncu sušeno opeko, žgano opeko in glazirane keramične ploščice so uporabljali Egipčani in mnoge druge stare civilizacije v Mezopotamiji in na Kitajskem pred več tisoči leti (Babilon, Kitajski zid).

Steklo so poznali že stari Egipčani pred 5000 leti. Stari Rimljani so razvili tehnologijo pihanja stekla, umetnine iz stekla pa so izdelovali beneški mojstri od 15. do 17. stoletja. Prozorno brušeno kristalno steklo so najprej izdelovali na Češkem, ob koncu 17. stoletja pa so v Franciji začeli z vlivanjem proizvajati brušena ravna stekla za ogledala. Prvo ravno steklo za okna so izdelovali z vpihovanjem stekla v valje, ki so jim odrezali dno, razrezali po dolžini in na to izravnali plašč valja.

Železo se je pojavilo po bronasti dobi (2500 let pnš.), a so ga v graditeljstvu na veliko začeli uporabljati šele v času industrijske proizvodnje (Bessemerov postopek 1855 leta). Pred tem je njegova uporaba bila omejena zaradi visoke cene na izdelavo okrasov, spojnih elementov in vezi. Danes je jeklo eno od osnovnih gradiv, po masovni uporabi takoj za betonom. Uporablja se kot samostojno konstrukcijsko gradivo ali z drugimi gradivi (armirani beton).

Baker je kovina, ki je bila znana že v predzgodovinskem času. Izdelki iz čistega bakra so stari nad 5000 let in so bili izdelani v Egiptu in na Bližnjem Vzhodu. V Grčiji so 1500 let pnš pridelovali baker na Cipru (od tod ime "cuprum" po aes cyprium). Baker so poznali tudi Inki v Južni Ameriki. Baker je v bronasti dobi zamenjal bron. Ta se je uporabljal do začetka našega štetja, ko je njegovo

vlogo prevzelo železo. Zaradi lahke obdelave in korozijske odpornosti se baker od nekdaj uporablja za toplovodne inštalacije in strešno kritino.

Svinec je bil enako kot baker znan v Egiptu in antični Grčiji. V času Punskih vojn so Grki, Feničani in Rimljani pridobivali svinec iz španskih rudnikov. Uporabljali so ga za izdelavo posod, vodovodnih cevi in veznih elementov pri kamnitih stavbah (povezava kamnitih valjev v stebre hramov na Akropoli v Atenah). Kupola Aja Sofije v Carigradu je pokrita s svinčenimi ploščami, ki so bile postavljene v začetku 6. stoletja.

Aluminij je novejše gradivo, ki so ga v laboratorijih proizvedli v začetku 19. stoletja, javno pa je bil predstavljen na svetovni razstavi v Parizu leta 1855. Po razvoju elektrolize se je začela moderna proizvodnja aluminija (1886 leta) in njegova uporaba v graditeljstvu. Zaradi odpornosti na atmosferske vplive, lahke obdelave površin, majhne teže in razmeroma ugodnih mehanskih lastnosti (zlasti pri zlitinah), je primeren za izdelavo stavbnega pohištva, konstrukcijskih elementov, kritin, oblog, različnih profilov in okrasov.

Mejnik v zgodovini razvoja umetnih gradiv je v času industrijske revolucije konec 19. stoletja. Preobrat v graditeljstvu je povzročila masovna industrijska proizvodnja jekla, aluminija, cementa in stekla ter odkritje novih umetnih gradiv. Do tedaj so se gradili klasični objekti z masivnimi zidovi in stebri, težkimi oboki in loki ter lesenimi stropnimi in strešnimi konstrukcijami. Industrializacija je prinesla nov slog grajenja, ki ga po svoje simbolizira tudi Eiffelov stolp in Les Halles v Parizu. Gradijo se lahke in vitke jeklene konstrukcije ter armiranobetonski objekti (mostovi z veliko razponov, visoke stolpnice in vodohrani, tovarniški dimniki, lupinaste konstrukcije itd.).

Preglednica 2:Umetna gradiva in njihovi izdelki

Vrsta gradiva		**Ime gradiva in izdelka**
Apno	gašeno apno	apnena kaša, hidratizirano apno v prahu
Cementi		portland cement, portland cement z dodatkom žlindre ali pucolana, mešani, metalurški, pucolanski, aluminatni
Mavec		štukaturni mavec, alabaster, modelarski mavec, mavec za malte in mavec za estrihe
Malte iz veziv	zračnih	glinasta, apnena, mavčna, podaljšana (apneno-cementna)
	hidravličnih	cementne, iz hidravličnega apna
	ognjeodpornih	ognjeodporne malte
	plastomernih	plastomerne, plastomerno-cementne
Betoni	težki	prostorninska masa nad 2500 kg/m3 (s težkimi agregati - barit)
	normalni	prostorninska masa med 1900 kg/m3 in 2500 kg/m3 (normalni kamniti agregati)
	lahki	prostorninska masa pod 1900 kg/m3 (lahki agregati: ekspandirana glina-keramzit, zdrobljena opeka, lesovina, polimeri)
		celičasti (plinobeton - Siporex, penobeton)

		enozrnati (brez drobnih frakcij agregata)
	plastomerni	plastomerni, plastomerno-cementni
	azbestno-cementni	plošče (ravne, valovite), cevi, različni elementi
Kovine	jeklo	konstrukcijska jekla
	železo	bela in siva litina
	barvaste	cink, baker, svinec, kositer, aluminij
	zlitine	duraluminij, bron, medenina
Gradbena keramika	opeka	polna in luknjasta normalnega formata, fasadna, zidni, fasadni in stropni bloki, radialna in klinker
	strešniki	stiskani in vlečeni bobrovci in zarezniki, korci
	cevi	drenažne, kanalizacijske, dimniške
	elementi	ploščice, okrasi
Steklo	normalno	prozorno, motno, ogledala
	varnostno	armirano, kaljeno, lepljeno (triplex)
	elementi	strešniki, plošče in ploščice, zidaki
Ognjeodporna gradiva	surovine	glina, kaolin, vermikulit (ekspandirana sljuda)
	elementi	šamotna moka, šamotne, kremene, magnezitne, dolomitne, boksitne opeke
Plastomeri	termoplastične mase	poliamidi, polikarbonati, polietilen, polipropilen, poliizobutilen, polivinilklorid, polivinilacetat, polimetilmetakrilat itd.
	termostabilne mase	epoksidne, poliesterske, poliuretanske, fenolne smole
Guma	naravna	naravni kavčuk
	umetna	silikonski, polibutadienski, poliuretanski, butilni kavčuk
Katran	iz lesa	katranska smola, katranska emulzija
	iz premoga	katranska smola, katranska emulzija
Bitumen	umetni	cestni, razredčeni, emulzija
Asfalt	umetni	peščen, valjan, asfalt-beton, bitumeniziran gramoz
Žlindra	iz kurišč	granulirana žlindra iz visokih peči
	iz talilnic	talilniški kamen

Razvoj gradnje se je dodatno pospešil tudi v zadnjih desetletjih, ko so v uporabo prišli polimerni materiali in različni kompozitni materiali, med katerimi so posebej pomembni konstrukcijski lamelirani kompoziti. Razvoj gradiv je omogočil tudi snovanje drznih in zanimivih arhitekturnih rešitev. Racionalizacija industrijske proizvodnje gradiv in uporaba novih tehnoloških postopkov gradnje (polindustrijska gradnja z montažnimi elementi konstrukcij in zgradb) je znižala čas gradnje in s tem tudi stroške.

Beton je najbolj zastopano gradivo v sodobnem graditeljstvu. Grajenje z betonom je razmeroma enostavno, hitro in poceni. Lahko dosega velike trdnosti in je razmeroma odporen na zunanje vplive in staranje. Primeren je za vse vrste gradenj od visokogradnje do inženirskih objektov tudi na področjih, kjer poleg statične obtežbe nastopajo tudi druge izredne obtežbe (potres, močni vetrovi, valovi).

Polimerna gradiva so najmlajša po uvajanju v graditeljstvo, vendar se njihova uporaba naglo širi. Primerna so za vse namene od konstrukcijskih do izolacijskih. Omogočajo ustvarjanje praktično neomejenega števila kompozitnih gradiv in se lahko kombinirajo z vsem ostalimi gradivi. Uporabljajo se v različnih oblikah: kot plošče, trakovi, vlakna, cevi, profili, folije, premazi, kiti itd. V standardu JUS G.C0.011 je podan popis večine vrst plastomerov in okrajšanih oznak njihovega polnega naziva.

Klasifikacija gradiv po namembnosti

Razlikujemo konstrukcijska (nosilna) gradiva, veziva, izolacijska gradiva in obložna gradiva.

Konstrukcijska gradiva

Konstrukcijska gradiva so primarni materiali v gradbeništvu, saj se uporabljajo za izdelavo konstrukcijskih elementov oz. monolitnih konstrukcij v visokogradnji in nizkogradnji. Za njih je značilno, da so zaradi svojih mehanskih lastnosti sposobne prenašati statične in dinamične obremenitve.

Najbolj pogosto uporabljana konstrukcijska gradiva so: kamen, les, opeka, jeklo, beton in armirani beton ter v najsodobnejših konstrukcijah različni kompozitni materiali sestavljeni iz plastomerov. Kot svojevrstno kompozitno gradivo lahko obravnavamo tudi zid, ki ga sestavljata zidak (kamen, opeka, betonski blok) in malta.

Veziva

Veziva se po mešanju z vodo (razen bitumenskih in polimernih) spremenijo v kašasto ali plastično zmes. Po procesu vezanja se ta zmes strdi na zraku ali v vodi in spremeni v čvrsto konstrukcijsko, izolacijsko ali obložno gradivo. Z vezivi se v konstrukcijske elemente povezujejo različna keramična gradiva od opeke do betona. Glede na način strjevanja se veziva delijo na zračna, hidravlična, ognjestalna, bitumenska in polimerna.

Zračna veziva vežejo in se strjujejo na zraku. Med ta sodijo apno, različni mavci in glina.

Apno je poleg cementa najpogosteje uporabljano vezivo v gradbeništvu. Živo (negašeno) apno se pridobiva s praženjem apnenca. Kosi živega apna se gasijo z vodo. Gašeno apno se uporablja kot kašasta zmes (pred uporabo mora dalj časa odležati) ali v prahu (hidratizirano apno). Apno se uporablja za zidavo in omete v apnenih in podaljšanih maltah ter raztopljeno v vodi z dodatki za barvanje površin.

Mavec se proizvaja s praženjem sadre in mletjem. Sodi med tista klasična gradiva, ki so v uporabi že tisočletja. V sodobnem gradbeništvu se uporablja za notranja dela (ometi, štukaturni okrasi) in različne gradbene elemente (predelne stene, bloki, obloge) ker ni odporen na atmosferske vplive.

Glina in ilovica sta se nekoč uporabljali kot osnovno konstrukcijsko in vezivno gradivo. Prve malte so bile narejene z mešanjem glinene, kasneje so z dodajanjem pleve ali slame zmanjšali razpokanost malte zaradi sušenja. V nekaterih krajih se uporabljajo malte iz mešanice gline in apna ali cementa za oblaganje zidov iz prepleta vrbovih šib ali sten iz lesenih letev. Glina in ilovica sta se uporabljali tudi za pode ali polnila v lesenih stropovih v preprostih vaških stanovanjskih in gospodarskih zgradbah.

Preglednica 3:Gradbena veziva

Vrsta veziva		Naziv veziva
Zračna	gašeno apno	hidratizirano apno v prahu ali v kaši
	mavec	štukaturni, alabaster-sadra, modelarski, mavec za malte, mavec za estrihe
	glina	navadna glina in ilovica
Hidravlična	cementi	portland-cement, portland-cement z dodatki (pucolan ali žlindra), mešani, metalurški, pucolanski, aluminatni
	hidravlično apno	hidravlično apno
	naravna hidravlična veziva	santorinska in pucolanska zemljina, alpska breča
Ognjestalna	glina	ognjevarna čista glina
Bitumenska	naravni bitumen	razredčeni bitumen, bitumenska emulzija
	umetni bitumen	razredčeni bitumen, bitumenska emulzija
Plastomerna	čista	termostabilne reaktivne smole: epoksidna, poliesterska, poliuretanska
	mešana	cementna s polimerno disperzijo

Hidravlična veziva vežejo in se strjujejo na zraku in v vodi. Najbolj pomembni so cementi raznih vrst, hidravlično apno in posebne vrste naravnih zemljin (santorinska in pucolanska zemljina, opalska breča)

Cement je najbolj pomembno hidravlično vezivo, ki se uporablja za izdelavo betonov in malt. Hidravlično apno se pridobiva s žganjem apnenca, ki vsebuje do 20% gline (apnenčasti lapor, glinasti apnenci). Uporablja se bolj poredko, ker ga nadomešča cement.

Ognjevarna veziva so odporna na visoke temperature (do 1600°C), pri katerih ne razpadejo, se ne raztalijo in obdržijo prvotno obliko. Najbolj znano tako vezivo je plastična ognjeodporna glina, katere odpornost je odvisna od količine vsebovanega aluminijevega oksida.

Bitumensko vezivo je umetni bitumen, ki se pridobiva iz ostankov destilacije surove nafte. Uporablja se pri proizvodnji umetnega asfalta (bitumen z mineralnim polnilom) in za izdelavo hidroizolacij.

Plastomerna veziva se uporabljajo za izdelavo plastomernih betonov in malt. Vezivo so tekoče epoksidne smole, smole iz nenasičenih poliestrov in poliuretanske smole. Plastomerni betoni in malte imajo izredne mehanske in fizikalno-kemične lastnosti, vendar je njihova uporaba omejena zaradi visoke cene veziva in občutljivosti na temperature nad 60°C.

Plastomerno-cementna veziva nastanejo z mešanjem cementa in vodene disperzije termoplastične mase ali komponent reakcijske smole. Najbolj pogosto se uporabljajo akrilati in polivinil-acetati (PVA). Ta veziva se uporabljajo za izdelavo vodonepropustnih betonov in malt, ki so le nekoliko dražji od navadnih betonov in malt.

Izolacijski materiali

To so materiali, ki se uporabljajo za zaščito ali ločevanje gradbenega elementa ali celotne konstrukcije od vplivov vlage, temperaturnih sprememb, ognja, agresivnega okolja (kemikalij), sevanja, hrupa in vibracij. Sodobne tehnologije

grajenja, pri katerih je poudarjena ekonomična poraba konstrukcijskih gradiv, zahtevajo obsežno uporabo izolacijskih materialov, med njimi pa so v večini plastomeri.

V gradbeništvu se v glavnem uporabljajo tri skupine izolacij: hidroizolacije, toplotne izolacije (termoizolacije) in zvočne izolacije (akustične izolacije).

Hidroizolacije ščitijo pred vplivi atmosferske in talne vode, zaradi katerih pogosto propadajo posamezni gradbeni materiali ali celotne konstrukcije. Les prepereva na stikih med suhim in vlažnim okoljem, kovine korodirajo, kamen, opeka in beton razganja led, v namočenih ometih, maltah, zidakih in drugih gradivih voda povzroča škodljive reakcije z njihovimi posameznimi sestavinami (izločanje soli). Hidroizolacije omogočajo tudi večjo uporabnost in higieničnost prostorov, ker onemogočajo nastanek plesni, gobe in drugih pojavov povezanih z vlažnostjo prostorov in delov konstrukcije.

Hidroizolacijski materiali morajo biti nepropustni, obstojni v vodi in ne smejo spremeniti obliko ali lastnosti zaradi vpliva vode, vlage in/ali agresivnega okolja. Najstarejši so se izdelovali iz naravnega asfalta, pozneje pa iz umetnega asfalta in bitumna, ki sta še vedno osnovna hidroizolacijska materiala. V novejših časih se za talne in krovne izolacije vse bolj uporabljajo plastomerni materiali. To so: poliizobutilenske (PIB) in mehke polivinilkloridne (PVC) folije, poliesterski laminat, polimerni betoni in malte, različni premazi, kiti, impregnacije, injekcijske mase itd.

Preglednica 4: Hidroizolacijski materiali in izdelki

Vrsta materiala in izdelka		**Oblika in izmere izdelka**
Bitumen in katran	bitumen, katran	emulzije in razredčen material
	krovna lepenka, bitumenizirana juta	izolacijski trakovi (papirnati, iz jute, s kovinskimi vložki, s plastomernimi vložki, obojestransko natopljeni z bitumnom)
Plastomeri	poliizobutilenske, polivinilkloridne, polietilenske folije	izolacijski trakovi debeline 0,8 - 2,0 mm
	poliesterski laminat	dvoplastni laminat debeline okoli 2 mm, ki se nanaša neposredno na konstrukcijo
	kiti	eno ali dvokomponentne mase
Kovinska pločevina	bakrena	pločevina 2 - 3 m2, debeline 0,1 - 5 mm
	cinkova	pločevina 2 m2, debeline 0,2 - 4 mm
	pocinkana jeklena	pločevina 2 m2, debeline 0,45 - 4 mm
	aluminijska	pločevina 1 - 2 m2, debeline 0,2 - 5 mm
	svinčena	trakovi širine 0,5 - 4m, debeline 0,5 - 15 mm
Betoni in malte	s hidrofobnimi dodatki ali dodatki, ki zapolnujejo pore	normalni betoni in malte s silikonskimi, stearatnimi in drugimi dodatki, plastomerni in plastomerno-cementni betoni in malte
Premazi in barve	premaz v obliki filma	oljne barve, plastomerni premazi, cementni premazi
	impregnacija	različni silikonski premazi

Pri sanacijah vlažnih kamnitih zidov z injektiranjem se uporabljajo injekcijske mase s polimernimi ali drugimi hidrofobnimi dodatki in hidroizolacijske malte za površinsko zaščito zidov pred vlago. Vlažni opečni zidovi se lahko sanirajo s penetracijo polimernih ali drugih suspenzij.

Kovinske pločevine so drage in se zaradi tega večinoma uporabljajo za kritine ravnih, poševnih in zaokroženih streh. Najbolj pogosto se uporablja bakrena, cinkova in pocinkana jeklena pločevina ter nerjavna jeklena pločevina, svinčena pločevina pa se uporablja bolj poredko. Svinčena pločevina se uporablja tudi za sanacijo vlažnih zidov, ki se zažagajo nad tlemi, v režo pa se vtisne svinčena pločevina.

Toplotne izolacije ovirajo prehode toplote med okolji na obeh straneh pregrade. Uporabljajo se lahka in porozna gradiva z nizko vrednostjo koeficienta toplotne prevodnosti. Zrak je eden najboljših toplotnih izolatorjev, zato so nekoč gradili dvojne zidove z razmikom, danes pa se uporabljajo zidaki in stropni elementi z različnimi odprtinami.

Dodatna izolacija se dosega z oblaganjem konstrukcije. Obloge so lahko enoplastne ali sestavljene iz plasti različnih izolacijskih materialov ("sandwich" obloge). Raznolikost termoizolacijskih materialov je razvidna iz preglednice 5, njihova izolacijska sposobnost pa iz preglednice 6. Toplotno izolacijo je treba vgraditi tako, da ostane trajno suha, ker se v nasprotnem primeru bistveno zmanjšujejo njene termoizolacijske lastnosti. Organski toplotni izolatorji pod vplivom vlage hitro propadejo (zgnijejo, strohnijo). Zato se pogosto toplotne izolacije izvajajo skupaj s hidroizolacijami, ki pred vlago ščitijo istočasno konstrukcijo in toplotno izolacijo.

Preglednica 5: Termoizolacijski materiali in izdelki

Vrsta materiala in izdelka		**Oblika in izmere izdelka**
Lahki betoni	keramzit-beton, polistiren-beton	plošče debeline 5 - 20 cm, votli bloki, izvedba oblog na konstrukciji
	plinobeton, penobeton	plošče debeline 5 - 20 cm, votli bloki, izvedba oblog na konstrukciji
	Heraklit, Tarolit, Durisol	plošče debeline 5 - 20 cm, votli bloki
Les	mehki lesonit, iverica	plošče debeline 1 - 3 cm
Anorganski materiali	kamnita volna, steklena volna	plošče debele 3 - 10 cm, razsuti material
Organski materiali	pluta, filc, slama, trska	plošče debeline 1 - 5 cm
Plastomeri - trda pena	polistirenska, fenolformaldehidna	plošče debeline 1 - 10 cm
Steklo	penasto (foam glass), profilirano, termoizolacijsko	plošče debeline 1 - 10 cm, profili, dvojna ali trojna okenska stekla

Zvočna izolacija se uporablja za zmanjšanje nivoja hrupa v bivalnih in delovnih prostorih, kakor tudi na javnih površinah. Hrup nastaja v izoliranih prostorih in zunaj njih. V prostorih kjer nastaja hrup, ga je možno zmanjšati z uporabo oblog, ki vpijajo (absorbirajo) zvok. Te obloge (preglednica 7) zmanjšujejo odboj zvočnega valovanja od površin. Širjenje hrupa po okolju, ki izvira iz močnega prometa, se zmanjšuje z izgradnjo posebnih obloženih ograj ob prometnicah. Obloge imajo na različne načine obdelane površine (reliefi, odprtine), narejene so iz mehkih, votličavih in vlaknastih materialov ali grobih tkanin (izolacijske zavese in preproge).

Preglednica 6:Materiali in izdelki, ki absorbirajo zvok

Vrsta materiala in izdelka		Oblika in izmere izdelka
Kovine	perforirana aluminijska pločevina	akustični profili (Dampa), akustične plošče (Dekaterm) s podlogo iz mineralne volne oblečene v aluminijevo folijo
Mavec	modelarski mavec	perforirane akustične plošče (Dephon-MM, Lexaphon) s podlogo iz mineralne volne oblečene v aluminijevo folijo (60x60x3cm)
Anorganski materiali	kamnita volna, steklena volna	plošče debeline 3 - 10 cm
Plastomeri	mehka in trda poliuretanska pena	trakovi in plošče debeline 1 - 10 cm (Iskrapen)
Les	lesonit, iverka	perforirane akustične plošče (Dephon-L) s podlogo iz mineralne volne oblečene v aluminijevo folijo (60x60x3cm)

Udarni zvok (ropot) in vibracije se duši z mehkimi snovmi, ki delujejo kot elastični blažilci (preglednica 8). Vgrajujejo se, tako kot vse izolacije, na strani izvora ropota ali vibracij. S tem se zmanjšuje nivo zvoka v prostoru, kjer je ta nastal, ovira se prehod zvoka skozi pregrade, ki prostor omejujejo in zmanjšuje se prenos vibracij na konstrukcijo zgradbe.

Zvočna izolacija mora biti položena tako, da je pregrada med dvema prostoroma dobro zatesnjena, saj najmanjša zračna špranja deluje kot dober prevodnik zvočnega valovanja.

Preglednica 7:Materiali in izdelki za akustično izolacijo in izolacijo za dušenje zvoka in vibracij

Vrsta materiala in izdelka		Oblika in izmere izdelka
Organski materiali	mehki lesonit, impregnirani filc, pluta	plošče debeline 1 - 3 cm, pluta v granulah
	kokosova vlakna	plošče debeline 3 - 10 cm
Anorganski materiali	volna (kamnita, steklena)	plošče debeline 1 - 3 cm
	pesek, perlit	granule 0,15 - 5 cm
Plastomeri - trde pene	polistiren, poliuretan	plošče debeline 1 - 10 cm
Guma	mehka (penasta, elastična)	trakovi debeline 0,2 - 2 cm
Tekstil	preproge, zavese	različnih izmer

Materiali za obloge

Uporabljajo se za zaščito izolacijskih in konstrukcijskih gradiv na objektih visokogradnje in nizkogradnje. Glede na namembnost ločimo vsaj tri vrste oblog: obrabne, izolacijske in okrasne. Pri izbiri oblog pogosto zahtevamo hkratno zadovoljitev več zahtev. Tako od obloge podov zahtevamo, da bo odporna na obrabo, da bo vsaj delno dušila udarce in imela ustrezen videz. Obloge se največ uporabljajo pri zaključnih delih v stavbarstvu in nizkogradnjah.

Obrabne obloge so neposredno izpostavljene mehanskim obremenitvam. Namenjene so zaščiti nosilne podlage pred intenzivno obrabo in poškodbami, ki nastajajo pri uporabi konstrukcije. V nizkogradnji so to asfaltni in betonski

zgornji ustroji vozišč, betonske ali kamnite obloge kanalov ali rečnih korit, v visokogradnji pa različne vrste talnih oblog. Obrabne obloge so izdelane iz trdega in trdnega materiala, ki je odporen na obrabo in površinsko ustrezno obdelan. Taki materiali so: kamen, različne vrste cementnega in asfaltnega betona, trdi les, keramika, kovine in široki izbor plastomerov. Izolacijske obloge ščitijo izolacijske materiale in ostala gradiva pred atmosferskimi vplivi in agresivnimi okolji. Pogosto so sestavni del drugih izolacijskih sistemov. Če so položene na vidnih ploskvah, morajo imeti tudi ustrezen okrasen videz. Izdelane so iz kamna, lesa, stekla, kovin, keramike, plastomerov in različnih ometov. Najpogosteje so površinsko zaščitene z različnimi premazi in barvami. Okrasne obloge imajo samo estetsko vlogo in se redko izvajajo kot obloga s samo tem namenom. Ostale vrste oblog so največkrat tako površinsko obdelane, da istočasno služijo tudi kot okrasne obloge. Morajo biti časovno obstojne in ustreznega videza. Kamen je klasična obloga, sledijo mu les, steklo, kovine, keramika, ometi in plastomeri.

Preglednica 8: Specifična masa in toplotna prevodnost materialov

Vrsta materiala		**Specifična masa ρ (kg/m3)**	**Koeficient toplotne prevodnosti (W/Km)**
Izolacijski materiali	plošče iz lesne volne	500 400	0,099 0,087
	trde in mehke plošče iz lesnih vlaken	1000 400 300 200	0,12 0,058 0,052 0,047
	prešane iverke	600	0,14
	prešana slama	350	0,099
	plošče iz ekspandirane plute	200 150 100	0,047 0,043 0,038
	nabrizgani azbest	600 400	0,17 0,12
	mineralna in steklena volna	80 - 200	0,047
	trde plastomerne pene	15 - 50	0,038
Les	bukev hrast smreka, jelka panel-plošče	800 800 500 600	0,17 0,21 0,14 0,14
Steklo	ravno (okensko)	2700	0,81
	penasto (foam glass)	135 125	0,052 0,050
Različne obloge	azbestnocementne pl. keramične ploščice linolej guma	1800 2000 1200 950 - 1000	0,47 1,05 0,19 0,14 - 0,29
Kamen	granit gnajs, marmor	2400 - 3300 2500 - 2900	3,5 2,3 - 3,5
Malta	apnena podaljšana cementna	1700 1800 2100	0,87 0,99 1,28

Beton	iz kamnitega agregata	2400 2200 2000 1800	1,7 1,4 1,2 0,9
	iz lahkih agregatov	1400 1200 1000 800 600 400	0,62 0,49 0,38 0,29 0,22 0,17
Mavec		1200 1000	0,58 0,52
Polnilni materiali	pesek gramoz opečni drobir plutni drobir	1700 1800 800 50	0,58 0,81 0,41 0,041

VPRAŠANJA

1. Pojasnite, kako je spoznavanje lastnosti gradiv v zgodovini vplivalo na razvoj konstrukcijskih elementov.
2. Skicirajte shemo življenjskega kroga gradiv in pojasnite njegov pomen.
3. Naštejte vrste klasifikacij gradiv in opišite njihove osnovne značilnosti.
4. Katere skupine gradiv po splošni klasifikaciji poznate in katere lastnosti so značilne za vsako izmed teh skupin?
5. Opišite značilne predstavnike gradiv, ki se ločijo po njihovi kemični naravi in pri tem pojasnite, kako kemična narava vpliva na uporabne lastnosti gradiv.
6. Katere skupine gradiv po klasifikaciji po njihovem izvoru poznate in katere lastnosti jih ločijo med seboj?
7. Naštejte in na kratko opišite značilne predstavnike gradiv, ki se ločijo po njihovem izvoru.
8. Katere skupine gradiv po klasifikaciji po njihovi namembnosti poznate in katere lastnosti jih ločijo med seboj?
9. Naštejte in na kratko opišite značilne predstavnike gradiv, ki se ločijo po njihovi namembnosti.

2

STANDARDIZACIJA

KAJ JE STANDARDIZACIJA

Standardizacija je delovanje na področju sestavljanja standardov za splošno in večkratno uporabo zaradi optimalne urejenosti na določenem področju. V Sloveniji je to državna funkcija, ena od pomembnih dejavnikov zagotavljanja varstva ljudi in okolja. Z vzpostavitvijo učinkovitega sistema racionalne standardizacije in tesnejšim povezovanjem z mednarodnimi organizacijami si Slovenija omogoča vključitev v evropski gospodarski prostor. V tehničnih odborih, ki prevzemajo mednarodne standarde v slovenski prostor, sodelujejo strokovnjaki iz vseh gospodarskih področji in s tem gradijo sistem Slovenskih standardov: SIST.

Začetki standardizacije se dajo slutiti že pri oblikovanju prvotnih lončarskih izdelkov in orodij v prazgodovini. Najstarejša pramera dolžine je vrezana v kip Sumerskega vladarja Gudea (v 22 stoletju pr.n.e), eden najstarejših pisanih predpisov s področja gradbeništva je najti v Hamurabijevem zakoniku (okoli 1750 pr.n.e). V starem Egiptu in Rimu so obstajali standardi za opeko. V Rimu so vse standardizirane vodovodne cevi, tako se je poraba vode zaračunavala po premeru cevi. V XV. stoletju je v Beneški republiki bila standardizirana ladijska oprema (vesla, jambori,okovje itd).

Razvoj industrije je pogojeval razvoj standardizacije industrijskih orodij in preiskav. Whithworth je 1841 standardiziral sistem kovinskih navojev. Nacionalna združenja inženirjev so bila nosilci izdelave standardov. Mednarodna konvencija o metru (1875) je postavila enotni merski sistem, ki je postal osnovna kasnejših nacionalnih in mednarodnih standardov. V Dresdenu je 1886 bila mednarodna konferenca: "Dogovor o enotnih metodah preskušanja gradbenih in konstrukcijskih materialov", ki je pomenila začetek mednarodne standardizacije. Po konferenci so osnovali nacionalne in mednarodne organizacije za standardizacijo:

- British Engineering Standards Committee (1901)
- National Bureau of Standards (1901), ZDA
- Normenausschuss der Deutschen Industrie (1917)
- International Electrotechnical Commission (IEC), 1906
- International Organisation for Standardisation (ISO), 1946, kot naslednico
- International Federation of the National Standards in Association (ISA), 1928

V prvi Jugoslaviji so 1939 začeli delo na standardizaciji (Jugoslovanski nacionalni komite za normalizacijo). 1946 je izdana Uredba za standardizacijo (18/46), Zvezna komisija za standardizacijo je 1952 objavila prvi standard JUS. Druga Jugoslavija (SFRJ) je bila članica ISO od 1950 in IEC od 1953. Izdali so

11.981 standardov razvrščenih v 18 vej oziroma področij (stanje z dne 31.08.1990).

V Republiki Sloveniji je bil ustanovljen leta 1991 Urad Republike Slovenije za standardizacijo in meroslovje (USM), ki je deloval v sklopu Ministrstva za znanost in tehnologijo. Od junija 1992 je Slovenija v;lanjena v ISO in IEC. Po reorganizaciji državne uprave leta 2001 se je USM razdelil na dve organizaciji. Ti sta Urad za meroslovje (MIRS) v okviru Ministrstva za šolstvo, znanost in šport in Slovenski inštitut za standardizacij (SIST) v okviru Ministrstva za gospodarstvo.

Urad za meroslovje (MIRS) kot nacionalna institucija vzpostavlja in vodi nacionalni meroslovni sistem Slovenije vključno s sistemom na področju izdelkov iz plemenitih kovin in postopke v okviru priznanja Republike Slovenije za poslovno odličnost. Te sisteme predstavlja v ustreznih mednarodnih organizacijah in jih razvija na mednarodno primerljiv in prepoznaven način.

Slovenski inštitut za standardizacijo (SIST) je nacionalni organ za standarde v Sloveniji, ki pripravlja, sprejema in izdaja nacionalne standarde ter sodeluje, zastopa in predstavlja Republiko Slovenijo v mednarodnih in evropskih organizacijah za standardizacijo.

OSNOVNI POJMI S PODROČJA MEROSLOVJA IN STANDARDIZACIJE

Meroslovje je veda o merah in merilih, ki se ukvarja z uvajanjem rabe in nadzora meril v skladu z mednarodnim sistemom.

Homologacija cestnih vozil je postopek potrjevanja posameznih tipov vozil, da odgovarjajo vsem predpisom ki veljajo v RS. Sistem je potrebno zgraditi na novo, v skladu z bodočim sistemom v članicah ES. Homologacija posameznih delov oziroma vozil obsega natančen pregled in potrjevanje skladnosti le-teh z mednarodnimi predpisi, ki veljajo tudi v RS.

Tehnična specifikacija je dokument, ki predpisuje tehnične zahteve, ki jih mora izpolnjevati proizvod, proces ali storitev

Kodeks ravnanja je dokument, ki priporoča ravnanje ali postopke za načrtovanje, proizvodnjo, namestitev, vzdrževanje ali uporabo opreme, konstrukcij ali proizvodov.

Predpis je dokument, ki določa obvezujoča zakonska ali na zakonu temelječa pravila in ga sprejme organ oblasti.

Tehnični predpis je predpis, ki določa tehnične zahteve, bodisi neposredno bodisi posredno, tako, da se sklicuje na vsebino standarda, tehnične specifikacije ali kodeksa ravnanja ali vključuje vsebino le-teh

Predstandard je dokument, ki ga standardizacijski organ sprejme začasno ter je dosegljiv javnosti, da se na ta način lahko iz njegove uporabe pridobijo potrebne izkušnje, ki bodo podlaga za standard.

Standard je dokument, ki nastane s konsenzom in ga odobri priznani organ.

Določa pravila, smernice ali značilnosti za dejavnosti in njihove rezultate ter je namenjen za občo in večkratno uporabo in usmerjen v doseganje optimalne stopnje urejenosti na danem področju. Na splošno upoštevanje standarda ni obvezno. Upoštevanje standarda postane obvezno na podlagi splošnega zakona ali izrecnega sklicevanja v predpisu.

Vrste standardov:

- **Osnovni standard** - obravnava široko področje ali vsebuje splošna določila za določeno področje.
- **Terminološki standard** - obravnava izraze, ki jih ponavadi spremljajo definicije, včasih pa tudi pojasnila, ilustracije, primeri itd
- **Preskuševalni standard** - obravnava metode preskušanja, ki jih včasih dopolnjujejo druga določila, povezana s preskušanjem, kot na primer vzorčenje, uporaba statističnih metod in zaporedje preskusov
- **Standard za proizvod** - specificira zahteve, ki jih mora izpolnjevati proizvod ali skupina proizvodov, da se zagotovi njegova (njihova) ustreznost namenu.
- **Procesni standard** - specificira zahteve, ki jih mora izpolnjevati proces, da se zagotovi njegova ustreznost namenu.
- **Storitveni standard** - specificira zahteve, ki jih mora izpolnjevati storitev, da se zagotovi njena ustreznost namenu.

Raven standardizacije je zemljepisni, politični in gospodarski obseg vključenosti v standardizacijo. Vse ravni tvorijo sistem povezan z vzajemnimi vezmi, hkrati pa se medsebojno prekrivajo. Standardizacija je glede na način nastajanja standardov selektivna in sistematična.

Selektivna standardizacija izhaja iz razpoložljive množice značilnosti stvari, stanj in pojavov ter njihovih vrst. Izberejo se nekatere značilnosti, ki se proglasijo za standard. Tak standard ima pogosto nepravilno stopnjevane lastnosti in je lahko kompromis zatečenega stanja in sposobnosti proizvajalca. Selektivna standardizacija se imenuje tudi razvojna standardizacija in je do nedavnega bila edina metoda standardiziranja.

Sistematična standardizacija izhaja iz spoznanja, da med večino proizvodov in procesov obstajajo naravna ali sistematična razmerja. Imenuje se tudi razvojno spremljajoča standardizacija. Njen pomen in obseg se povečujeta zlasti na novih področjih, kot je to informatika. Splošni nazivi in definicije so podani v "ISO/IEC guide 2-1991", nekateri pa so prevzeti tudi pri nas na USM-u.

Preskušanje - certificiranje - kakovost omogočajo sistematičen pristop in izboljšanje kakovosti proizvodov in storitev, ter doseganja mednarodne oziroma evropske ravni. S tem se omogoča povečanje izvozne sposobnosti in konkurenčnosti podjetij. Potrebno je vzpostaviti z evropskimi in mednarodnimi sistemi harmoniziran in kompatibilen sistem. Nacionalni organ za akreditiranje pokriva:

- laboratorije (preskusne in kalibracijske),
- organe za certificiranje (storitve, osebje, sistemi kakovosti, izdelki, homologacija vozil in delov),
- organe za nadzor.

Akreditiranje je postopek za uradno priznanje usposobljenosti za opravljanje določene dejavnosti. Primer: akreditirani laboratorij.

Certificiranje je postopek, po katerem tretja stranka pisno zagotovi, da obstaja zadostna verjetnost, da je nedvoumno definiran proizvod, proces ali storitev v skladu s postavljenimi zahtevami.

Tretja stranka je oseba ali organ, ki je izkazano neodvisen od interesov vpletenih strank v danem pravnem razmerju.

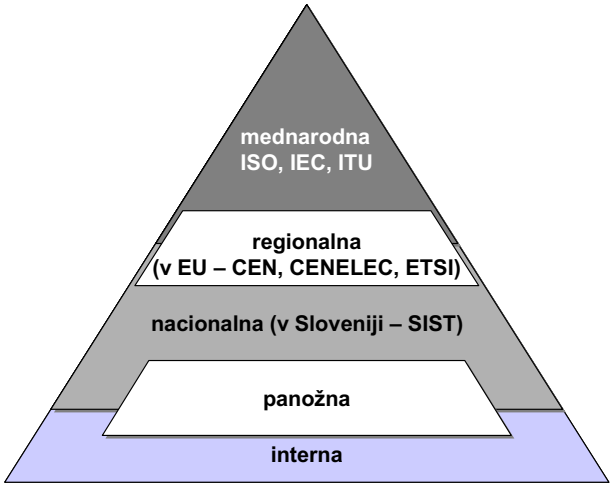
Preskušanje je opravljanje enega ali več preskusov, to je tehničnih postopkov, s katerimi se po točno določenem postopku določi ena ali več karakteristik danega proizvoda, procesa ali storitve.

Certifikat o skladnosti je dokument, izdan v skladu s pravili sistema certificiranja, ki pove, da obstaja zadostna verjetnost, da nedvoumno definiran proizvod, proces ali storitev ustreza določenemu standardu ali drugemu normativnemu dokumentu.

Izjava o skladnosti je izjava dobavitelja, izdana na njegovo lastno odgovornost, da je proizvod, proces ali storitev skladen z določenim standardom ali drugim normativnim dokumentom.

Dobavitelj je stranka, ki je odgovorna za proizvod, proces ali storitev, in je sposobna vzpostaviti zagotavljanje kakovosti.

HIERARHIČNA RAZPOREDITEV STANDARDIZACIJ



Slika 3: Shema hierarhične piramide standardizacije

Mednarodna standardizacija

V mednarodno standardizacijo se lahko vključijo ustrezni organi iz vseh držav. V svetovnem merilu delujejo tri organizacije, ki se ukvarjajo s standardizacijo.

Mednarodna organizacija za standardizacijo - ISO (International Organization for Standardisation) pokriva vsa področja razen elektrotehnike in elektronike. V njej sodelujejo nacionalne institucije iz 140 držav (leto 2002) Slovenija je član od junija 1992.

Mednarodna elektrotehniška komisija - IEC (International Elektrotechnicall Commission) pokriva elektrotehniko in elektriko. V njej sodelujejo nacionalne inštitucije iz 63 držav (leto 2002). Slovenija je redni član od junija 1992.

Mednarodna zveza za telekomunikacije – ITU (International Telecomunication Union) je mednarodna organizacija v sklopu Organizacije združenih narodov v kateri vlade držav in privatni sektor koordinirajo globalna tekom omrežja in usluge. Sodeluje 189 držav (leto 2002) in 658 sektorskih članov. Slovenija je redni član od junija 1992.

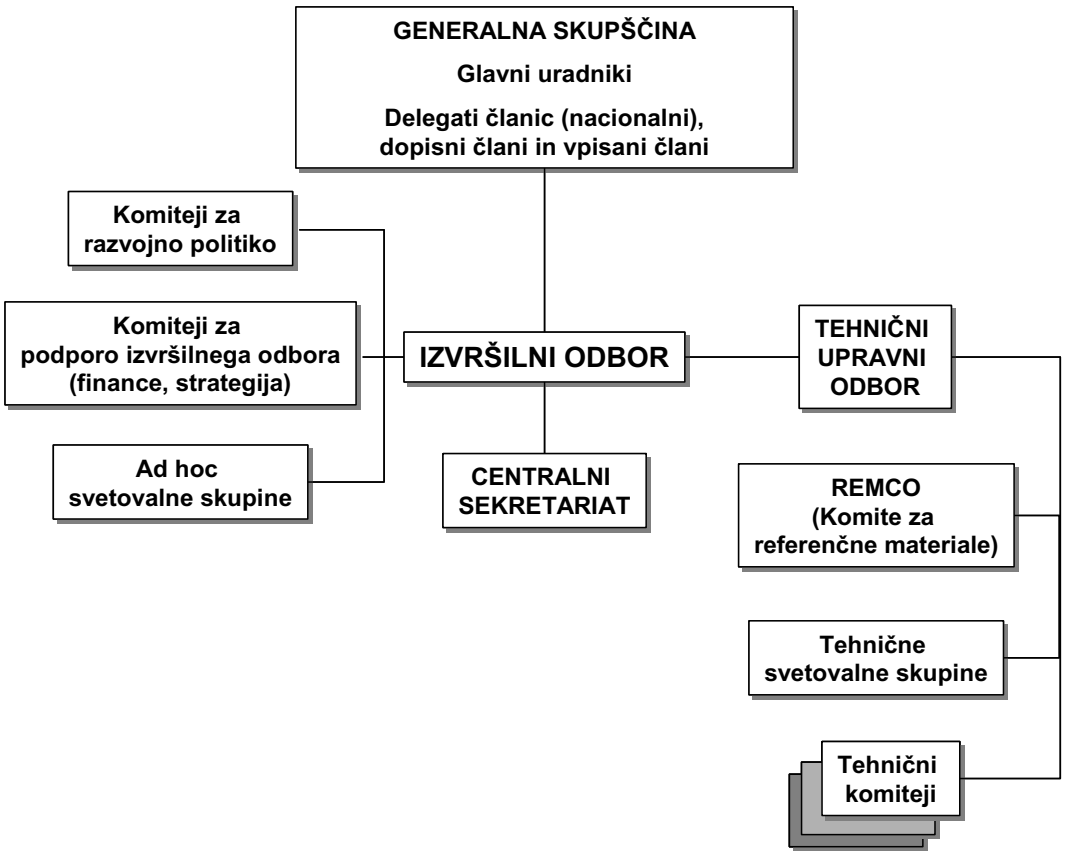
Vse tri organizacije imajo veliko daljšo tradicijo kot evropske, zato so določena tehnična področja tam bolje obdelana. Če za posamezno področje, kjer obstaja interes, ni evropskega standarda, potem v Sloveniji prevzamemo mednarodni standard.

Poleg nacionalnih institucij pri nastajanju standardov sodelujejo tudi mnoge mednarodne organizacije, katerim standardizacija ni osnovna dejavnost, in s tem dopolnjujejo delo ISO, IEC in ITU. Okoli 400 mednarodnih organizacij sodeluje z ISO in IEC. ISO in IEC sta nevladni organizaciji, članice pa so nevladne, polvladne in vladne organizacije (kot naš SIST). Samo po ena organizacija iz posamezne države je lahko članica ISO in IEC.

Pripravljalno delo, študije in analize opravljajo strokovnjaki iz celega sveta, ki se združujejo v različnih mednarodnih strokovnih združenjih. Na področju gradbeništva so najbolj znane:

- IABSE - International Association for Bridge and Structural Engineering,
- CIB - International Council for Building Research Studies and Documentation,
- RILEM - International Association of Testing and Research Laboratories for Materials and Constructions,
- CEB - Euro - International Committee for Concrete,
- ECCS - European Convention for Constructional Steelworks,
- FIP - International Federation for Prestressed Concrete,
- JCSS - Joint Committee on Structural Safety,
- ISSMFE - International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Način organiziranega delovanja mednarodne organizacije ISO je podoben načinu organizacije ostalih mednarodnih regionalnih in nacionalnih organizacij, ki se ukvarjajo s standardizacijo. Shemo organiziranosti ISO opisuje sledeči diagram.



Slika 4: Shema organiziranosti ISO

Najvišji organ ISO je skupščina članic. Izvršni odbor vodi posle med dvema skupščinama. Pri tem mu pomagajo centralni sekretariat in podporni komiteji ter svetovalne skupine. Centralni sekretariat vodi administrativne posle. Tehnični odbori (Technical Committee - TC) skrbijo za izdelavo mednarodnih standardov. S standardizacijo na področju gradbeništva se ukvarja 16 TC ISO, do sedaj pa je izdanih približno 710 standardov za gradbeništvo.

V skladu z delovnimi programi za izvajanje nalog, TC-ji lahko osnujejo svoje pododbore (Sub Committee, SC), eni in drugi pa tudi delovne skupine (Working Group, WG). Pregled vseh TC in SC ter področij upravnega dela se objavlja letno v publikacijah ISO Memento in IEC Year Book Uradna jezika sta angleški in francoski, pod posebni pogoji (prevajalec) pa je tudi ruski jezik. Terminološki standardi se objavljajo v vseh treh jezikih.

Pravila dela organizacij ISO, IEC in ITU določajo statuti in ostali spremljajoči dokumenti.

Izdelava standarda se začne na pobudo članice, enega izmed TC ali organizacije, ki sodeluje z ISO ali IEC. Če se pobuda sprejeme, se naloga zaupa TC s področja predlaganega standarda, če tega ni se osnuje novi TC ali razširi dejavnost obstoječega. Prvi korak je izdelava delovnega osnutka (Draft Proposal, DP), ki ga ponavadi pripravi delovna skupina (WG). Osnutek obravnava TC ali SC in gre v proceduro po soglasnem sprejemu v TC. Delovni osnutek se dostavi centralnemu sekretariatu, ki ga registrira kot osnutek mednarodnega standarda (Draft International Standard, DIS) in ga pošlje

članicam v šestmesečni postopek glasovanja. Če vsaj 75% članic glasuje pozitivno, DIS postane mednarodni standard ISO (pri IEC je potrebno 80% pozitivnih glasov). Če osnutek ni sprejet, se lahko objavi kot tehnično poročilo (Tecnical Report, TR), ki gre lahko v ponoven postopek sprejemanja po treh letih. Standardi se usklajujejo vsakih 5 let, po potrebi tudi prej.

ISO in IEC standardi niso obvezni, lahko pa postanejo če se na njih sklicujejo predpisi ali postanejo sestavni del mednarodnih pogodb.

Vsaka članica lahko neposredno uporabi mednarodni standard z ali brez sprememb kot svojega ali kot podlago za svoj standard. Zaradi vzpostavitve večjega reda in discipline pri upoštevanju mednarodnih standardov in v interesu mednarodne trgovine je v bil že v osnutku GATT-a (General Agrement on Tarifs and Trade - Splošni sporazum o carinah in trgovini) sklenjen "Sporazum o tehničnih ovirah v trgovini" (Kodeks o standardih), ki ga je ratificirala tudi SFRJ (1982). To organizacijo je leta 1995 zamenjala WTO (World Trade Organisation) h kateri je pristopila tudi Republika Slovenija. Po tem sporazumu so države podpisnice pri izdelavi nacionalnih standardov obvezne upoštevati mednarodne standarde. O vseh odstopanjih morajo soglašati podpisnice sporazuma.

Informacijska mreža ISO Network (ISONET - 1975) povezuje mednarodne informacijske centre. Obstaja večjezičen (ISONET Thesaur), ki omogoča računalniško iskanje normativnih dokumentov. Veliko podatkov o ISO, IEC in ITU je objavljenih tudi na njihovih spletnih straneh.

Regionalna standardizacija

Regionalne standardizacijske organizacije združujejo nacionalne standardizacijske organizacije iz skupnega zemljepisnega, političnega in gospodarskega prostora. Njihov namen je usklajevanje obstoječih nacionalnih standardov in razvoj novih regionalnih standardov s pomočjo mednarodnih standardov. Nam najbližja regionalna standardizacija je standardizacija Evropske unije. V Republiki Sloveniji smo se odločili, da bodo slovenski standardi osnovani na evropskih, na področjih kjer le-teh še ni pa mednarodni standardi. Evropske organizacije za standardizacijo so nastale po vzoru na mednarodne, kot je razvidno tudi iz njihovih nazivov:

- Evropski komite za standardizacijo
  (CEN - European Committee for Standardisation),
- Evropski komite za standardizacijo v elektrotehniki
  (CENELEC - European Committee for Electrotechnical Standardisation),
- Evropski inštiut standardizacijo telekomunikacij
  (ETSI - European Telecommunications Standardisation Institute.

Njihove članice so nacionalne organizacije za standardizacijo držav članic Evropske skupnosti (ES) in Evropskega združenja za svobodno trgovino (EFTA). SIST Republike Slovenije je pridruženi član vseh treh organizacij. Delujejo podobno kot ISO in IEC z nekaj razlikami. Pri glasovanju imajo članice število glasov v skladu s svojo ekonomsko močjo (npr. Nemčija 10, Luksemburg samo 2 glasa). Evropski standard (EN) se sprejema s kvalificirano večino in ko je sprejet, se nespremenjen prevzema v nacionalno zbirko standardov ne glede na glasovanje članice. Vse obstoječe standarde, ki so v nasprotju s sprejetim mora članica razveljaviti. Dogovor o enotnih standardih v ES velja od leta 1974.

Poleg evropskih standardov so pomembni tudi harmonizacijski dokumenti (HD) in evropski predstandardi (ENV ali prEN). HD so podobni standardom, le da upoštevajo posebnosti posamezne države (zakonske in tradicijske). ENV se lahko izdelajo kot predhodnica EN zaradi začasne uporabe v tehničnih področjih, kjer je veliko inovacij in kjer je potrebno hitro slediti razvoju. Uporaba ENV je omejena na 3 leta (po tem morajo postati ali EN ali pa se morajo umakniti).

CEN in CENELEC ponujata dva pristopa:

- dodelitev evropskega znaka skladnosti (EC) s tehničnimi predpisi, ali
- medsebojno priznanje rezultatov preskušanja in nadzora

EOTC (European Organization for Testing and Certification - Evropska organizacija za preskušanje in certificiranje) skrbi za optimizacijo rešitev, to je izbiro enega ali drugega načina.

Namen regionalne standardizacije v Evropi je ustvarjanje skupnega trga katerega bistvo je prav standardizacija.

Druge regionalne standardizacije so:

- COPANT - Panameriška kompanija za standardizacijo (Latinsko-ameriške dežele),
- ASAC - Azijsko svetovalni komite za standarde,
- ARSO - Regionalno afriška organizacija za standardizacijo,
- ASMO - Arabska organizacija za standardizacijo in metodologijo,
- CARICOM - Svet za standardizacijo Karibskega skupnega trga,
- PASC - Pacifiški kongres za standarde.

Nacionalna standardizacija

Standardizacija znotraj ene države na vseh strokovnih področjih. Lahko je državna (kot USM), od države podprta ali privatna, ki jo financira gospodarstvo. Ne glede na to, mora imeti status pooblaščene organizacije za izdelavo nacionalnih standardov in za zastopanje države na področjih standardizacije. Morajo biti vključeni vsi, ki so zainteresirani, izdelavo nacionalnih standardov pa morajo zaupati stalni komisiji, ki jo sestavijo enkratno.

- ANSI American National Standard Institute
- ASTM American Society of Testing and Materials
- BS British Standard
- CSA Canadian Standards Association
- DIN Deutches Institut für Normung
- GOST Gosuderstvenuj standard Sovjeta SSR
- JUS Jugoslovenski standard
- JIS Japanese Industrial Standard
- ÖNORM Österreichesche Norm
- SIST Slovenski standardi
- SIA Schweizerischer Ingenieur und Architekten Verein
- SN Schweizer Norm
- SNiP Stroitelnie normi i pravila

- UNI Ente Nazionale Italiano di Unificatione

Panožna standardizacija

Dopolnjuje nacionalno standardizacijo. Te standarde sprejemajo gospodarska ali strokovna društva na podoben način kot se sprejemajo nacionalni standardi. Panožni standardi so dostopni javnosti. Za panožno standardizacijo so značilni standardi s področja elektrotehnike.

Interna standardizacija

Standardi na višjih ravneh (mednarodni, nacionalni, .) so se razvili iz internih standardov industrijskih podjetij. Ta proces je še živ (selektivna standardizacija), četudi ga zamenjuje obratna pot (sistematična standardizacija) - od standardov na višji ravni do internih.

Naloga interne standardizacije je vpeljava standardov istih ravni na interno raven s selekcijo glede na potrebe podjetja. Če standarda ni, lahko podjetje da pobudo za njegov nastanek na nacionalni in mednarodni ravni. Interne standardizacija ustvarja pogoje za racionalno proizvodnjo in pripravo na usklajevanje proizvodnje z novimi standardi.

SLOVENSKA STANDARDIZACIJA

Oktobra 1992 so izšli prvi slovenski standardi in postavljena so bila programska izhodišča za nadaljnje delo. Do konca leta 1992 se je Urad za standardizacijo Republike Slovenije (USM) včlanil v najpomembnejše mednarodne in regionalne organizacije za standardizacijo, kar nam omogoča enakopravno sodelovanje v mednarodnih dogajanjih ter reden dostop do dokumentov in informacij. Ves čas delovanja je USM obveščal slovensko javnost z mesečnikom *Sporočila*, ki je redno izhajal od decembra 1991. Naslednik USM, Slovenski inštitut za standardizacijo (SIST) objavlja nove slovenske standarde mesečno v glasilu SIST *Sporočila*, in sicer v prilogi *Objave*.

Slovenski nacionalni standardi (SIST) so na podlagi konsenza sprejeti dokumenti, ki jih pripravljajo ustrezni slovenski tehnični odbori SIST/TC. Slovenski standardi so rezultat prostovoljnega strokovno-tehničnega dela v skladu z *Navodilom o sprejemanju in izdajanju slovenskih standardov* (Uradni list RS, št. 32/95 in 58/99). Standardi so neobvezni dokumenti, ki jih lahko vsakdo prostovoljno uporablja. Obveznost uporabe standardov lahko izhaja iz tehničnih predpisov, pogodb ali drugih pravnih temeljev. Zbirka slovenskih standardov, ki jo vsako leto izdaja SIST, se imenuje *KATALOG SIST*. Zaradi lažjega iskanja je katalog razdeljen na več delov:

- seznam po področjih ICS (Mednarodna klasifikacija za standarde)

- seznam umaknjenih standardih
- seznam po referenčnih oznakah
- seznam po tehničnih odborih.

Katalog je bodisi v knjižni bodisi v elektronski obliki na voljo v Informacijski točki in prodaji SIST.

Slovenska standardizacija je sestavni del mednarodne in evropske standardizacije. Temu statusu mora prilagoditi svoj razvoj, organiziranost in metode delovanja, kar sledi tudi iz vsebine Zakona o standardizaciji.

Strokovno delo v zvezi s pripravljanjem in sprejemanjem standardov se izvaja v tehničnih odborih (TC) in v drugih oblikah tehničnega dela. Strokovno-tehnično delo načrtuje, usmerja ter spremlja strokovni odbor pri SIST-u za področje standardizacije.

Slovenski standardi praviloma prevzemajo mednarodne in evropske standarde. Zato pri njihovem snovanju sodelujejo tehnični odbori. Metode in načini sodelovanja so določeni s pravili mednarodnih in evropskih organizacij in jih sprejemamo kot pravila slovenske standardizacije.

Tehnični odbori se oblikujejo po mednarodnih običajih in lahko obsegajo področje enega ali več mednarodnih ali evropskih TC-jev. Ustanovitev tehničnega odbora lahko predlaga zainteresirano podjetje, druga pravna oseba, organizacija ali skupnost, gospodarske zbornice, upravni organi ter druge institucije.

Pomembne faze ustvarjanja slovenskih standardov so: **pobuda, delovni osnutek, osnutek standarda, predlog standarda** in **slovenski standard**.

Pobuda - pisna in argumentirana, lahko vsebuje že delovni osnutek SLS – pripravijo jo lahko zainteresirane organizacije.

Delovni osnutek - s konsenzom ga sprejeme tehnični odbor, je besedilo osnutka standarda. Tehnični odbor ga pošlje kot predlog standarda v javno obravnavo, ter na podlagi te sprejme in pripravi dokončno besedilo.

Slovenski standard - izda SIST in izdajo objavi v *Sporočilih*

Oznaka standarda je SIST, kateri sledijo še dodatna oznaka.

Dodatna oznaka je v primeru prevzetega standarda izvirna oznaka prevzetega evropskega ali mednarodnega standarda. Če SIST temelji na drugih virih (ali je izviren) je dodatna oznaka latinsko število.

Ime slovenskega standarda sestavljajo štirje ključni deli: referenčna oznaka standarda, številka standarda, letnik in jezik, v kateremu je standard izdan.

Sledi nekaj primerov oznak:

SIST ISO 3166:1996 (sl)	Slovenski standard (SIST), ki je po metodi prevoda (sl) prevzet po mednarodnem standardu ISO. Obravnava kode za predstavljanje imen držav in drugih ozemelj in je ekvivalenten standardu ISO 3166:1993.

SIST EN 345:1996-02(en) Slovenski standard (SIST), ki je z metodo razglasitve prevzet po evropskem standardu (EN) in je pri nas izdan v angleščini (en). Obravnava podroben opis zaščitne obutve za poklicno uporabo in je enak standardu EN 345:1992.

SIST ENV 1996-1-1:1997 Slovenski predstandard (SIST), ki je po metodi platnice prevzet po evropskem predstandardu (ENV). Sodi v skupino predpisov za projektiranje Eurocode in obravnava projektiranje zidanih konstrukcij - prvi del, kar pove šifra 1996-1-1. V tej šifri predstavlja 199 oznako za Eurocode, 6 oznako za zidane konstrukcije in 1-1 prvo poglavje prvega dela tega predstandarda. Osnutek je izdan v angleščini in je identičen z evropskim standardom ENV 1996-1-1. Pri nas se lahko uporablja le v skladu z nacionalnim dokumentom, ki je sestavni del tega predstandarda. Nacionalni predgovor in nacionalni dokument sta napisana v slovenščini.

Pripravljanje in izdajanje tehničnih predpisov

Tehnične predpise pripravljajo in izdajajo pristojni državni organi oziroma pristojna ministrstva. Z njimi se izpolnjujejo zahteve, ki izvirajo iz mednarodnih pogodb in sporazumov. Izdelujejo se tudi na osnovi lastnih potreb na področju varstva življenja in zdravja ljudi, varstva okolja ter premoženja, varnega in nemotenega pretoka ljudi in storitev v državi Sloveniji in v evropski in svetovni prostor.

Organi morajo pri pripravljanju in izdajanju tehničnih predpisov kar najbolj uveljavljati načelo sklicevanja na standarde ali druge tehnične specifikacije ter sodelovati s SIST-om.

POLITIČNA IN PRAVNA PODLAGA ZA EVROPSKO ZAKONODAJO

Evropske države so po drugi svetovni vojni sprejeli nekaj ključnih dokumentov, ki so omogočili nastanek in razvoj Evropske skupnosti:

- 1951 - šest evropskih držav podpiše ustanovno pogodbo Evropske unije za premog in jeklo (ECSC),
- 1957 - Rimska pogodba – ustanovitev Evropske gospodarske skupnosti (EEC) in Evropske skupnosti za jedrsko energijo – poskus ustanovitve skupnosti s skupnim tržiščem, ekonomsko in monetarno unijo.
- 1960 – ustanovljeno je Evropsko združenje za prosto trgovino (EFTA)
- 1985 v Schengenu je podpisan sporazum, ki postavil načelo državljanstva Evrope. S tem je odprta pot popolni mobilnosti delovne sile znotraj Evropske skupnosti in odpravljena kontrola prehodov na notranjih mejah članic Evropske skupnosti.
- 1993 – potrditev Pogodbe o Evropski uniji, ki so jo podpisali leta 1992 v Maastrichtu. V Pogodbi so začrtana osnovna načela gospodarsko in finančno

združene Evrope

- 1996 Slovenija zaprosi za članstvo v Evropski skupnosti
- 1998 se začnejo pristopna pogajanja za sprejem 10 novih članic v EU, med katerimi je tudi Slovenija.
- 2000 – v evropskem prostoru sodeluje 15 stalnih članic EU, pridružene članice iz vzhodne in srednje Evrope in 4 članice EFTA (Evropsko združenje za prosto trgovino – Norveška, Islandija, Liechenstein, Švica)
- 2002 odločitev Evropske skupnosti o razširitvi z 10 novimi članicami leta 2004, ko se pričakuje tudi sprejem Slovenije v Evropsko skupnost.

Eden glavnih ciljev Unije in pridruženih članic ter EFTA članic je: **oblikovanje enotnega notranjega trga brez vsake ovire pri trgovanju.** To pomeni odpravljanje vseh nacionalnih ukrepov in zahtev, ki onemogočajo ali ovirajo prost pretok blaga in storitev (državni monopoli, carinske in druge dajatve, količinske omejitve, državne pomoči itd)

Inštrumenti evropske zakonodaje

Evropska zakonodaja pozna 4 glavne tipe zakonodajnih dokumentov Skupnosti:

Predpis je dokument z največjo močjo. Ko predpis stopi v veljavo **takoj** postane **zakon** v vseh državah članicah.

Direktiva je dokument, ki postavlja glavni cilj. Vsaka izmed članic lahko direktivo po svoje vgradi v lastno pravno ureditev. Njen pravni učinek nastopi po uveljavitvi nacionalnega predpisa, ki povzema direktivo.

Odločba je dokument, ki ima značaj bolj upravnega kot zakonodajnega dokumenta. Obvezujoč je za tisto državo članico, podjetje ali pravno osebo **na katero je naslovljen**. (Na primer: Komisija naloži neki državi članici, da preneha s prakso, ki je nezakonita glede na pravni red Skupnosti)

Priporočilo je dokument ki ima svetovalni značaj. Mogoče se mu je izogniti, torej ni obvezujoč. Priporoča pa se njegovo upoštevanje.

"Novi" in "stari" pristop k tehnični harmonizaciji

Z graditvijo skupnega gospodarskega prostora se je pokazala potreba po usklajevanju (harmonizaciji) tehničnih dokumentov. Do leta 1985 je v Evropski skupnosti veljal **"stari" pristop** s katerim se je skušalo harmonizirati tehnične specifikacije za izdelavo proizvodov. Zaradi težav pri usklajevanju vseh podrobnosti običajno obsežnih dokumentov je tak pristop s počasnostjo zaviral proces harmonizacije. Poleg tega so zakonodajni dokumenti postajali zelo tehnični, ker so zahtevali izpolnitev posameznih zahtev za vsako vrsto proizvoda. Sprejem vsakega dokumenta je bil odvisen od soglasja v Svetu Evrope, kar je še dodatno zaviralo proces sprejemanja dokumentov.

Leta 1985 so uvedli **"novi" pristop**, ki temelji na principu določevanja ravni obnašanja proizvodov, ki jih obravnava zakonski dokument.

Principi "novega" pristopa so:

- harmonizacija zakonodaje je **omejena na bistvene zahteve**, ki jih mora izpolniti proizvod na trgu Skupnosti. Bistvene zahteve se obravnavajo v prilogi direktive in obsegajo vse potrebno, da se doseže osnovni cilj direktive.
- tehnične specifikacije proizvodov, ki izpolnjujejo bistvene zahteve, se podajo v harmoniziranih standardih
- uporaba harmoniziranih standardov ostaja prostovoljna – proizvajalec se lahko sklicuje tudi na druge tehnične specifikacije s katerimi izpolnjuje zahteve direktive
- za proizvode izdelane v skladu s harmoniziranimi standardi velja domneva, da so v skladu z bistvenimi zahtevami.

Direktiva o gradbenih proizvodih (CPD)

Direktiva o gradbenih proizvodih je bila sprejeta na podlagi ugotovitve o obstoju neupravičenih tehničnih ovir pri meddržavnem trgovanju z gradbenimi proizvodi zaradi različnih zahtev posameznih nacionalnih zakonodaj. **Gradbeni proizvod** je vsak proizvod, ki je izdelan za trajno vgraditev v gradbene objekte. **Gradbeni objekti** so stavbe in gradbeni inženirski objekti,

Bistvene zahteve so podrobneje določene v razlagalnih dokumentih (pripravijo jih tehnični odbori). Vpeljano je "Evropsko tehnično soglasje" – tehnična ocena ustreznosti proizvoda za uporabo. Soglasje se lahko podeli samo tistemu proizvodu, za katerega ne obstajajo harmonizirani standardi, priznani nacionalni standardi, mandat za harmonizirani standard, ter za tiste proizvode, ki bistveno odstopajo od navedenih standardov.

Harmonizirana zakonodaja naj bi (sčasoma) v celoti nadomestila nacionalne predpise, ki na tem področju v prihodnje ne bi imeli pravice obstoja. V desetih letih od sprejema direktive pa se je pokazalo, da je sprejem tehničnih specifikacij (harmoniziranih standardov in evropskih tehničnih soglasij), na katerih temelji ves sistem, izredno obsežna, zamudna in tudi (gospodarsko in politično) občutljiva operacija. Od predvidenih 600 harmoniziranih standardov, ki naj bi predpisovali zahtevane lastnosti gradbenih proizvodov, za zdaj ni bil sprejet niti eden, sprejem večine pa je oddaljen vsaj nekaj let. Zato države članice ob sicer formalnem prenosu pravnega okvira direktive še nadalje vzdržujejo in izvajajo svoje nacionalne sisteme predpisovanja zahtev za gradbene proizvode. Tako tudi po desetih letih od "sprejema" harmonizirane zakonodaje mednarodna trgovina v Uniji poteka po načelu medsebojnega priznavanja enakovrednosti nacionalnih predpisov in ne po načelih izvajanja harmonizirane zakonodaje.

Na osnovi Direktive o gradbenih proizvodih je Republika Slovenija izdelala in sprejela Zakon o gradbenih proizvodih (ZGPro) (Uradni list RS št. 52/2000) in s tem izpolnila obvezo glede direktive, ki se sicer zahteva za članice Evropske skupnosti.

Proizvod v promet in uporabi

Proizvod gre lahko v promet in uporabo le takrat, kadar ob pogoju pravilne vgradnje, vzdrževanja in uporabe za predvidene namene, ne ogroža varnosti in zdravja oziroma drugih, v direktivi navedenih, javnih interesov. **Zato morajo države članice vpeljati nadzor na svojem trgu**.

V primeru CPD to pomeni, da gradbeni proizvodi morajo imeti takšne lastnosti, da objekt v katerega se vgrajujejo zadovolji **bistvenim zahtevam** glede:

- Mehanske odpornosti in stabilnosti
- Varstva pri požaru
- Higiene, zdravja in okolja
- Varne uporabe
- Zaščite pred hrupom
- Varčevanja z energijo in ohranjanja toplote

V splošnem treba bistvene zahteve zadovoljiti skozi vso sprejemljivo življenjsko dobo objekta ob predpostavki, da na objekt lahko delujejo kateri koli v naprej predvideni vplivi (načelo trajnostnosti – sustainability). Direktiva o gradbenih proizvodih **ne** obravnava vgradnje proizvodov in varnosti pri delu (ta je predmet ločenih zakonskih dokumentov). Nanaša se torej le **na končen rezultat gradnje** (objekt kot celoto).

Označevanje z znakom CE

Znak CE pomeni, da proizvodi ustrezajo zahtevam določene direktive in da je izpeljan postopek ocenjevanja skladnosti, ki je predviden v direktivi. Države članice so dolžne zaščititi znak CE.

Ocenjevanje skladnosti

Proizvajalec mora s svojim proizvodom, preden ga da v promet na trg Skupnosti, izpeljati postopek ocenjevanja skladnosti, tako kot je to predvideno v uporabljeni direktivi glede namestitve znaka CE. Skladnost ocenjuje organi, ki jih odobri tretja stranka. Organe za svoje ozemlje določijo države članice iz vrste tistih, ki zadovoljujejo kriterijem iz direktive.

Druge pomembne direktive (v povezavi s CPD)

Direktiva o splošni varnosti proizvodov

Cilj direktive je doseči, da proizvodi dani v promet, pri normalnih pogojih uporabe, ne povzročajo tveganih posledic.

Direktiva o odgovornosti za proizvode

Nanaša se na vse proizvode, ki jih pokrivajo direktive “novega pristopa”, vključno z Direktivo o gradbenih proizvodih.

Cilj vseh teh direktiv je zaščita javnega interesa. Osnovno pravilo direktive o odgovornosti za proizvode je, da je proizvajalec odgovoren za škodo povzročeno posameznikom in premoženju, ki je nastala zaradi pomanjkljivosti njegovega proizvoda. Oškodovanec mora iztožiti odškodnino, torej dokazati, da je škodo povzročila pomanjkljivost obravnavanega proizvoda. Oškodovancu ni treba dokazovati proizvajalčeve malomarnosti.

Evropski standardi in CPD

Direktiva o gradbenih proizvodih kot direktiva "novega pristopa" uporablja metodo sklicevanja na standarde pri ugotavljanju ustreznosti gradbenih proizvodov za njihovo nameravano uporabo. Že omenjena posebnost direktive pa je privedla do dveh pomembnih odstopanj od splošnega modela omenjenih direktiv. Uvedena je nova vrsta tehničnih specifikacij - "evropsko tehnično soglasje", praviloma obvezna pa je tudi uporaba izdanih (harmonizirani standardi) oziroma podeljenih (evropsko tehnično soglasje) tehničnih specifikacij.

V evropski praksi sta predvideni dve skupini standardov:

- **"običajni" standardi,** privzeti kot nacionalni standardi, imajo status priporočila ali prostovoljnih specifikacij, ki postanejo obvezujoči, če se na njih sklicuje sicer obvezen dokument kot je pogodba, upravni ali zakonski akt itd.
- **"harmonizirani" evropski standardi,** so obvezujoči za vse vlade držav članic in podobnih organov; za te standarde je Komisija CEN-u dodelila mandat za njihovo pripravo. Na podlagi CPD so to standardi za proizvode in za preskušanje.
- Poznamo dve vrsti in eno podvrsto evropskih harmoniziranih standardov:

A standardi

Obravnavajo projektiranje in gradnjo stavb in inženirskih objektov. Morali bi jih upoštevati v obsegu CPD s sklicevanjem nanje v predpisih. Tipični tovrstni standardi so Evrokodi.

B standardi

Standardi za proizvode s podrobnim opisom lastnosti proizvoda ali družine proizvodov, ki vplivajo na izpolnjevanje bistvenih zahtev, vključno s preskusnimi metodami, merili skladnosti in potrjevanjem skladnosti.

Posebnost predstavljajo **Bh standardi** za "horizontalne" preskusne metode to je metode, ki se uporabljajo za široki krog proizvodov. Tu spadajo tudi standardi za metode požarnih preskusov.

Evropski standardi za konstrukcije (EUROCODE)

Komisija evropske skupnosti CEC (Commission of the European Communities) je pred leti dala pobudo za uvajanje vrste usklajenih standardov za projektiranje stavb in inženirskih objektov, ki bi v začetku služili kot alternativa različnim pravilnikom, ki veljajo v različnih državah članicah ter bi jih postopoma nadomestili. Ti standardi so postali znani kot "Structural Eurocodes" in uradno sodijo med harmonizirane standarde skupine A.

Leta 1990 je komisija ES po posvetovanju med državami članicami prenesla delo nadaljnjega razvoja, izdajanja in dopolnjevanja Eurocodov za konstrukcije Evropskemu uradu za standardizacijo CEN-u. Sekretariat držav EFTA se je strinjal, da bo podpiral delo CEN-a. CEN-ov tehnični odbor CEN/TC 250 je odgovoren za vse Eurocode za konstrukcije.

Eurocode običajno označujemo s kratico EC in zaporedno številko, ki pove katere vrste konstrukcij obravnava določeni Eurocode. Tako na pr. EC2 obravnava projektiranje betonskih konstrukcij. Izvedba in kontrola izvedbe konstrukcij sta v EC obravnavani samo do tiste mere, ki je potrebna, da se opredelijo kvaliteta izdelkov v konstrukciji ter standardi izdelave, ki so skladni s predpostavkami, na katerih temeljijo pravila za projektiranje. Dokler ne bo sprejeta skupina usklajenih tehničnih specifikcij za izdelke ter metode preskušanja njihovega obnašanja, bodo nekateri EC obravnavali te probleme v informativnih prilogah. Jeseni leta 2002 so bili vsi, razen prvih dveh Eurocodov še vedno v poskusni veljavi kot predstandardi. Tako sta kot standarda veljala le Eurocode 0 in 1.

Posamezne države, ki svoje standarde tako kot Slovenija, snujejo na osnovi modelnih standardov kar Eurocodi tudi pravzaprav so, morajo določene zahteve prilagoditi svojim razmeram. Namreč, organi vsake posamezne države so odgovorni za varnost, zdravje in ostale zadeve, pokrite z bistvenimi zahtevami v predpisih. Te zahteve so povezane tudi z ekonomsko močjo posamezne države. Vse to se odraža v natančni določitvi številčnih vrednosti določenih parametrov imenovanih "prosti koeficienti". Nekateri harmonizirani podporni standardi mogoče ne bodo na razpolago v času izdaje določenega Eurocoda. Zato se pričakuje, da bo vsaka država članica ali njen organ za standardizacijo izdal nacionalni pravilnik za uporabo, kjer bodo mandatarne vrednosti zamenjale “proste koeficiente” s sklicevanjem na kompatibilne podporne standarde in določitvijo smernic za nacionalno aplikacijo določenega Eurocoda. Z drugimi besedami, Eurocodi so namenjeni uporabi v kombinaciji s posameznimi nacionalnimi pravilniki za uporabo, veljavnimi v državi, kjer so locirane zgradbe ali inženirski objekti.

Slovenija se je odločila da bo zaradi hitrejšega integriranja v Evropski prostor svoje pravilnike za konstrukcije zasnovala na standardih Eurocode in z novimi pravilniki postopoma zamenjala še veljavne pravilnike iz nekdanje skupne države Jugoslavije. Trenutno poteka sprejemanje posameznih Eurocodov v obliki predstandardov s triletno poskusno veljavo ob vzporedni veljavi obstoječih starih predpisov. Kot zanimivost velja navesti da je zaradi projekta izgradnje avtocest v Sloveniji kot prvi v Evropi začel pri nas veljati tisti del Eurocoda 8, ki se nanaša na premostitvene objekte grajene na potresnih območjih. S tem smo zapolnili vrzel v naši tehnični zakonodaji in omogočili projektantom snovanje varnih objektov v skladu z bodočimi Evropskimi predpisi.

Evropski standardi za konstrukcije zajemajo naslednje EC za konstrukcije, katerih vsak je splošno sestavljen iz večjega števila delov:

EN 1990 (EC0) Osnove projektiranja

EN 1991 (EC1) Obtežbe konstrukcij

ENV 1992 (EC2) Projektiranje betonskih konstrukcij

ENV 1993 (EC3) Projektiranje jeklenih konstrukcij

ENV 1994 (EC4) Projektiranje sovprežnih konstrukcij

ENV 1995 (EC5) Projektiranje lesenih konstrukcij

ENV 1996 (EC6) Projektiranje zidanih konstrukcij

ENV 1997 (EC7) Projektiranje geotehničnih objektov

ENV 1998 (EC8) Projektiranje potresno varnih konstrukcij

ENV 1999 (EC9) Projektiranje konstrukcij iz aluminijskih zlitin

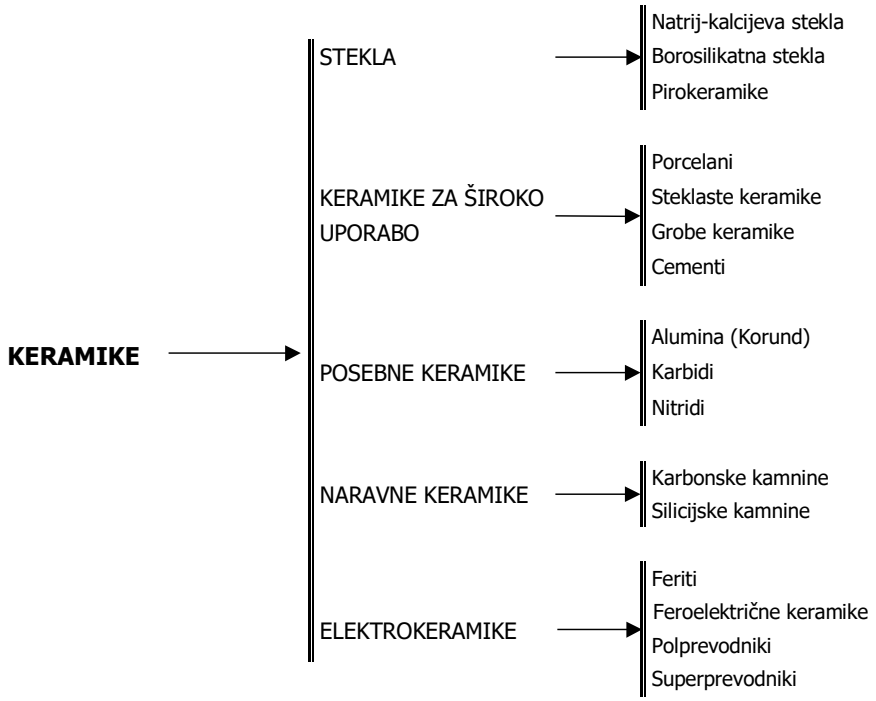
CEN/TC 250 je formiral poseben pododbor za vsakega izmed naštetih EC.

VPRAŠANJA

1. Kaj je standardizacija in kakšno vlogo ima v Sloveniji?
2. Naštejte osnovne pojme s področja standardizacije in jih pojasnite.
3. Kaj omogoča preskušanje, certificiranje in s tem povezano zagotavljanje kakovosti?
4. Pojasnite razliko in povezavo med tehničnim predpisom in standardom ter kdo je pristojen za njihovo pripravo in izdajanje.
5. Pojasnite pojme: akreditiranje, certificiranje, tretja stranka, preskušanje, certifikat o skladnosti, izjava o skladnosti in dobavitelj.
6. Kaj je to raven standardizacije in kateri vrsti standardizacij glede na način njihovega nastajanja poznate?
7. Pojasnite hierarhično razporeditev standardizacije in opišite značilnosti vsake izmed standardizacij po tej razporeditvi.
8. Kateri organ je v Sloveniji pristojen za področje standardizacije in katere dejavnosti sodijo v njegovo pristojnost?
9. Kako poteka delo v zvezi s pripravljanjem in sprejemanjem standardov v Sloveniji?
10. Kako so označeni slovenski standardi in kaj pomeni vsak izmed delov oznake?
11. Pojasni razliko med novim in starim pristopom k tehnični harmonizaciji v Evropi.
12. Navedi in pojasni značilnosti inštrumentov evropske zakonodaje.
13. Kaj je to Direktiva o gradbenih proizvodih in kaj določa.
14. Pojasni pojme: gradbenega proizvod, gradbeni objekt, bistvene zahteve in evropsko tehnično soglasje.
15. Kaj pomeni označevanje z znakom CE in kdaj mora proizvajalec izpeljati postopek ocenjevanja skladnosti.
16. Navedi in pojasni bistvene zahteve Direktive o gradbenih proizvodih.
17. Pojasnite razliko med običajnimi in harmoniziranimi standardi in opišite njihove značilnosti in vrste.
18. Kaj so to Eurocodi? Kako in zakaj je prišlo do njihovega nastanka?
19. Naštejte vse Eurocode z navedbo vrst konstrukcij na katere se nanašajo.
20. Kako Slovenija pristopa k izdelavi svoje tehnične regulative na osnovi Eurocodov in kakšen pomen pri tem imajo "prosti koeficienti"?

KERAMIKE

HIERARHIČNA RAZPOREDITEV KERAMIK



Keramike so večinoma sestavljene iz kovinskih in nekovinskih elementov, četudi obstajajo tudi keramični materiali povsem nekovinske sestave. Med nekovinskimi elementi je pogosto kisik, ki s kovinskimi elementi sestavlja značilne spojine v keramiki kot so silicijev oksid (SiO_2) magnezijev oksid (MgO) in aluminijev trioksid (Al_2O_3). V keramikah se zelo pogosto pojavljajo tudi elementi kot so silicij, ogljik, žveplo, dušik, bor itd.

Po mikrostrukturni sestavi se keramike lahko razvrstijo v tri skupine:

- povsem kristalične,
- povsem amorfne (steklo) in
- delno kristalične, kjer so kristali cementirani z amorfno matriko, ki pogosto predstavlja šibki del celotnega kompozitnega materiala.

Visoko tališče in majhna deformacijska duktilnost kristalastih keramik omejuje načine obdelave in uporabe keramik. Zato se veliko število keramik uporablja v zdrobljeni ali praškasti obliki kot vhodna surovina za izdelavo umetnih materialov. Nekatere naravne keramike (kamen) se z različno stopnjo obdelave pripravijo za uporabo v gradbeništvu. Pri izdelavi umetnih materialov iz naravnih keramičnih surovin se ne da povsem izogniti poroznosti pridelanega materiala, kar je splošna značilnost keramičnih izdelkov, ki jih srečujemo v gradbeništvu.

Stekla

Stekla se uporabljajo v velikih količinah. Njihova letna poraba se približuje porabi aluminija. Večina stekel ima za osnovo kremen (SiO_2), ki pa nima kovinski značaj. Čisti kremen ima visoko tališče, z dodajanjem spojin kot so CaO, Na_2O in B_2O se tališče bistveno zniža, kar omogoča lažjo proizvodnjo stekla iz osnovnih surovin. Najbolj pomembni predstavniki tovrstnih stekel so ***natrij-kalcijeva stekla***, ki vsebujejo natrijeve in kalcijeve okside, ki znižujejo tališče in ovirajo kristalizacijo, in ***borosilikatna stekla***. Pri slednjih sta večji del apna in sode zamenjana z borovim oksidom (B_2O_3) in zato imajo ta stekla majhen toplotni raztezek. Stekla so notranje zelo krhka, a se dajo ojačiti s površinskimi utrditvami. Posebna vrsta keramik, ki se še dajo obravnavati kot stekla so ***pirokeramike***. Te niso povsem amorfne kot ostala stekla, temveč jih sestavljajo fini skupki kristalov, ki se tvorijo s kontrolirano kristalizacijo stekla. Značilna je skoraj popolna neporoznost in zaradi tega tudi visoka odpornost na udarce. Pri spremembah temperature se praktično ne deformirajo in so odporna na nagle temperaturne spremembe.

Keramike za široko uporabo

Ta skupina keramik se v vsakdanjem življenju, kamor sodi tudi gradbena praksa, uporabljajo v velikih količinah in zelo pogosto. Najbolj značilni predstavniki so lončarske keramike, gradbena keramika in cementi. Vse razen cementov so v osnovi narejene iz glin katerih značilni predstavnik je kaolinit $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]_2$. Struktura molekule kaolinita je plastovita in zelo higroskopična. Ko se molekula kaolinita veže z molekulami vode, postane glina mehka in zelo plastična. Po oblikovanju mokre gline se voda mora odstraniti prvo s sušenjem na sobni temperaturi in nato tudi s procesom žganja do različno visokih temperatur. Temperatura žganja pogojuje lastnosti keramike. Pri zelo visokih temperaturah zaradi pojava *sintranja* nastaja kompaktna trdna keramika male poroznosti. Sintranje je pojav, pri katerem se pri visokih temperaturah kristalasti keramični delci delno ali v celoti talijo v amorfno steklasto zmes, ki zaliva praznine med njimi in s tem tvori neporozno strukturo.

Najbolj osnovna in tradicionalna groba gradbena in lončarska keramika, ki se še vedno uporablja v manj razvitih deželah, je sušena na zraku in soncu. Je močno porozna in zelo groba. Z žganjem na nižjih temperaturah se dosega različna finost lončarske in gradbene keramike vse do kakovostne in malo porozne keramike pri visokih temperaturah. Na finost in raznolikost uporabnosti keramike vpliva tudi sestava mešanice vhodnih surovin. Značilen predstavnik kakovostne keramike je porcelan, pri kateremu se z ustrezno kombinacijo vhodnih surovin lahko doseže izredno trdna in žilava struktura, v kateri se kot ojačitveni elementi nahajajo tudi vlaknasti kristali.

Posebna vrsta porcelanov ima steklasto strukturo zaradi drugačnega razmerja surovin, iz katerih se izdelujejo običajne vrste porcelanov. Steklasti porcelani se uporabljajo za sanitarno keramiko in ostale posode v široki porabi. Imajo višjo trdnost kot običajni porcelani, a so manj prosojni.

Cementi predstavljajo posebno vrsto keramik za široko uporabo. So osnovno hidravlično vezivo, s katerim se povezujejo drugi keramični materiali (naravne keramike - kamenine, umetne keramike - groba gradbena keramika) v keramične kompozite, med katerimi je beton njihov najbolj značilen

predstavnik. Cemente sestavljajo predvsem minerali apna, kremena, aluminijevega in železovega oksida. Po mešanju z vodo se v procesu hidratizacije židka cementna pasta v določenem času pretvori v trdo in trdno keramično vezivo.

Posebne vrste keramik

Posebne vrste keramik imajo izboljšane mehanske lastnosti, ki se dosežejo s posebnimi postopki izdelave in obdelave, ki jih bistveno podražijo. ***Alumina*** (aluminijev oksid) sodi med najbolj uporabne keramike izmed tistih, ki ne vsebujejo silicija. Uporablja se za visoko kakovostne toplotne in električne izolatorje, za ležaje zaradi izjemne trdote, kot brusilno in polirno sredstvo (korund) in za izdelavo rezalnih orodij.

Tungstenov in titanijev ***karbid*** se uporabljajta za izdelavo vodoodpornih rezalnih orodij in drugih orodij za predelavo kovin, silicijev karbid pa celo za izdelavo močno obremenjenih delov strojev in turbin, ki so izpostavljene visokim temperaturam. Posebni vrsti keramik sta grafit in diamant. Oba sta sestavljena iz čistega ogljika. Grafit se uporablja kot odlično mazivo, diamant pa kot izredno brusilno sredstvo. Karbonska vlakna, ki omogočajo izdelavo izredno trdnih kompozitnih materialov, sodijo med najbolj obetavne materiale bodočnosti.

Silicijevi ***nitridi*** so odporni na trajne deformacije in so zato uporabni za izdelavo delov turbin in avtomobilskih motorjev. Borovi nitridi lahko zaradi izjemne trdote služijo kot brusilno sredstvo.

Naravne keramike

Naravne keramike so ali geološkega ali biološkega porekla. Biološki sistemi, kot je človeško telo, proizvajajo mešanico polimernih in keramičnih materialov, ki večinoma vsebujejo ogljik. Večina bioloških materialov je sestavljenih kot kompoziti. Geološke keramike so izključno keramike, pri katerih prevladuje bodisi kalcij bodisi silicij. Te se lahko v kombinaciji s biogenimi keramikami povezujejo v keramike, ki jih pogosto uporabljamo kot surovine za izdelavo gradbenih materialov. Apno je značilni predstavnik skupine materialov (med nje sodijo tudi kamnine kot so apnenec in marmor), ki so nastale s nalaganjem in preobrazbo (metamorfozo) ostankov živih organizmov. Slednje kamnine sodijo v skupino ***karbonskih kamenin***. Pri ***silikatnih kameninah*** prevladuje silicij v obliki kremena (SiO_2). Najbolj značilne kamenine iz te skupine sta granit in bazalt, ki sta nastala kot neposreden produkt geoloških procesov v notranjosti zemeljske skorje pod vplivom visokih pritiskov in temperatur.

Elektrokeramike

Veliko materialov, ki se uporablja v industriji električnih in elektronskih naprav sodi med keramike. Feriti ($BaFe_{12}O_{19}$) se uporabljajo kot permanentni magneti. Piezoelektrični materiali so tudi keramike (barijev titanat in litijev niobat). Nadalje, keramični materiali tvorijo polprevodnike kakor tudi superprevodnike.

3

GRADBENI KAMEN IN MINERALNI AGREGATI

V petdesetih in šestdesetih letih tega stoletja je prišlo do občutnega zmanjšanja porabe kamna kot tradicionalnega konstrukcijskega materiala zaradi pocenitve in razširjanja uporabe drugih konstrukcijskih gradiv. V zadnjem desetletju pa se naravni kamen vse bolj uveljavlja kot prestižni obložni material, pri kateremu se ceni predvsem barvitost in tekstura. Te lastnosti pridejo še bolj do izraza zaradi novih postopkov obdelave in zaščite, ki zagotavlja trajnost svežega izgleda oblog.

Gradbeni kamen je del kamenine, ki je iz litosfere (zemeljske skorje) odvzet ali na naraven ali umeten način in je uporabljen za izgradnjo gradbenega objekta. Po sestavi je mineralni agregat določene strukture in teksture, geoloških značilnosti ter fizikalnih in mehanskih lastnosti. Po področjih uporabe se ločijo:

- arhitekturno-gradbeni kamen,
- tehnični kamen in
- mineralni agregat.

Arhitekturno -gradbeni (okrasni) kamen ima veliko estetično vrednost, dobre tehnične in ustrezne geološke (možnost odvzema ustreznih blokov iz narave) lastnosti. Nekoč se je uporabljal kot gradbeni kamen za zidavo v obliki bolj ali manj oblikovanih blokov, danes pa večinoma za okrasne obloge in dekorativne elemente.

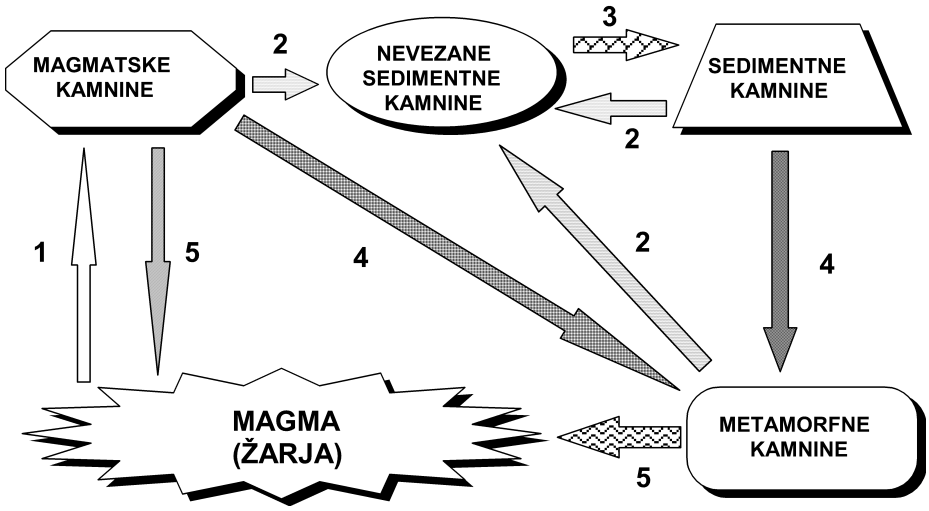
Tehnični kamen odlikujejo predvsem zahtevane fizikalne in mehanske lastnosti. V glavnem se uporablja kot lomljenec različnih frakcij v gradbenih konstrukcijah, pri gradnji prometnic in ostalih inženirskih objektov (pregrade), kot sestavina betona manj pa v obliki večjih blokov kot zidak ali obloga.

Mineralni agregat je močno zdrobljen tehnični kamen frakcij premera do nekaj deset milimetrov. Izdeluje se z lomljenjem (ostrorobi lomljenec) ali izkopom v vodi oblikovanega gramoza (obli agregat). Pri izdelavi lomljenca se tehnični kamen deli v dve skupini: silikatne kamenine (magmatske, sedimentne in metamorfne) in karbonatne kamenine (sedimentne in metamorfne).

VRSTE KAMENIN

Kamenina je naravna snov, sestavljena iz drobnih zrn enega ali več različnih mineralov ali iz odlomkov različnih kamnin. Značilna zrnata sestava kamnine - zlog - določa strukturo in teksturo kamenine. Struktura je posledica oblike, velikosti in medsebojnega količinskega razmerja sestavnih delov. Tekstura podaja položaj teh delov v prostoru in zapolnitev tega prostora. Zlog je velikega pomena pri določanju kamnin, ker se iz njega ugotavlja način nastanka kamenine.

Za kamnino je pomembna mineralna sestava. Mineral je trdna homogena snov z bolj ali manj stalno kemično sestavo, ki pri ustreznih prostorskih pogojih lahko svobodno zraste v lepo kristalno obliko. Omejeno število mineralov je pomembno za posamezne kamenine - to so kamninotvorni minerali. Med najbolj pogoste sodijo: kremen, glinenci (K-glinenci in plagioklazi), sljudi (muskovit in biotit), amfiboli (rogovača), olivin, serpentin, klorit, granati, turmalin, kalcit in dolomit. Ločimo bistvene minerale, ki so glavni sestavni deli kamenine in jo tudi opredeljujejo, značilne minerale, ki kamnino še natančneje opredeljujejo, in akcesorne minerale, katerih količina je praviloma manjša od 1% in za njeno opredelitev niso pomembni.



Slika 5: Zaporedje kroženja kamnin v naravi in spreminjanje enih v druge: 1 - kristalizacija, 2 - erozija (vpliv zunanjih sil), 3 - litifikacija, 4 - metamorfoza (visoka temperatura in pritisk), 5 - paligeneza (taljenje)

Magmatske (vulkanske, eruptivne) kamenine

Nastajajo s strjevanjem in kristaliziranjem tekoče mineralne mase (magme ali žarje) in so zaradi tega kristalaste, masivne (neplastovite) in brez organskih primesi. Po nastanku se ločijo globočnine (nastale v notranjosti litosfere) in žilnine (nastale iz vtisnjene lave v razpokah litosfere) kot posebna skupina globočnin ter predornine (nastale na površju litosfere) in pillow lava (zaobljene oblike, ki so nastale iz lave izlite na morskem dnu) kot posebna skupina predornin. Mase otrdele lave so v glavnem silikatne. Zlog (struktura) je odvisen od stopnje in načina kristaliziranja sestavin, njihove velikosti, oblike in razporejenosti. Obstajata dva osnovna zloga: zrnati in porfirski.

Zrnat zlog je značilen za večino globočnin, ki so se ohlajale počasi pod velikim pritiskom. V njih so vse sestavine kristalizirane v obliki nepravilnih zrn približno enake velikosti. Porfirski zlog je značilen za predornine, ki se hitro ohlajajo. V njih so se v drobnozrnati osnovi izkristalizirali minerali - vtrošniki. Ti so se kristalizirali med dvigovanjem lave na površje, po izlitju pa se ostali minerali niso mogli izkristalizirati zaradi hitrega ohlajevanja in je tako nastala drobnozrnata osnova. Posebnost so vulkanska stekla (obsidian), ki so nastala iz hitro ohlajene zelo kisle riolitne lave.

Za sistematiko teh kamenin in njihovo določitev so pomembni magmatski kamenotvorni minerali: kremen, glinenci, sljude, amfiboli, pirokseni in olivin. Na osnovi teh mineralov so magmatske kamenine razvrščene v pet skupin: granitsko, sienitsko, dioritsko, gabrsko in peridotitsko skupino. Kamenine, ki vsebujejo veliko kremena (70-80%) in so zato svetle, se imenujejo salične. Tiste pa, ki vsebujejo manj kremena (do 50%) in so temne, skoraj črne barve, se imenujejo mafične.

Sedimentne kamenine

Nastajale so kot posledica učinkovanja različnih zunanjih vplivov (temperaturne spremembe, voda, veter) na obstoječe kamenine. Ti vplivi uničujejo (drobijo) kamenine, jih transportirajo v sedimentacijske prostore, kjer se drobci odlagajo. Površinske vode transportirajo velike količine raztopljenih mineralnih snovi. Ta rahli material se po fizikalno-kemičnih procesih (diageneza) sprime (litificira) v trdno kamnino. Sedimentne kamenine se razvrščajo po načinu nastanka in mineralni sestavi.

Klastični (mehanski) sedimenti so nastajali z akumulacijo odlomkov mineralov in kamnin zaradi učinkovanja zunanjih fizikalnih in kemičnih procesov. Sestavljeni so iz mineralov in odlomkov mehansko razpadlih magmatskih, sedimentnih in metamorfnih kamnin. Med minerali prevladuje obstojni kremen. Ločijo se vezane - litificirane (peščenjak, konglomerat) in nevezane klastične kamenine (gline, melji, pesek, prod).

Biogenokemični sedimenti so nastajali kot posledica delovanja organizmov, ki svoj skelet gradijo iz kalcijevega karbonata ali kremena in fizikalno-kemični procesi v okolju. Lahko vsebujejo veliko fosilov, ki so kamninotvorni. Kamenine, v katerih je veliko fosilov, so po njih dobile svoje ime: numulitni apnenec (iz njega so zgrajene piramide v Egiptu), školjkoviti apnenec, koralni apnenec itd.

Kemični sedimenti so nastajali kot posledica čisto fizikalno-kemičnih procesov z neposrednim izločanjem mineralne snovi iz vodnih raztopin ($CaCO_3$) ali pa so se tvorili kot reakcija med mineralno snovjo in vodnimi raztopinami. V to skupino sodijo kamena sol, sadra, anhidrid, lehnjak in nekateri apnenci in dolomiti.

Piroklastične kamenine so ognjeniškega porekla, a se prištevajo h klasičnim sedimentom zaradi načina nastanka. Izvrženi ognjeniški material se je s časom sprijel v trdno kamnino. Obstojajo vezane in nevezane piroklastične kamenine. V to skupino sodijo ognjeniški pepel, pesek in breče, lapile, tufi in tufiti.

Metamorfne kamenine

Nastale so s preobrazbo sedimentnih in magmatskih kamnin pod pogoji povišane temperature in visokih pritiskov. Pri preobrazbi (metamorfozi) nastajajo novi,

le za te vrste kamnin značilni minerali. Preobrazita se mineralna sestava in struktura kamenine. Metamorfoza poteka v globljih delih litosfere. Regionalna metamorfoza zajema obsežno področje litosfere in poteka postopno in se razlikuje od kontaktne metamorfoze. Ta se dogaja pri neposrednem stiku med magmo, ki je vdrla v podzemno odprtino (intruzija) in okolno kamnino. Pri kontaktni metamorfozi nastajajo značilne kamenine imenovane skarni in včasih vsebujejo rudo. Metamorfne kamenine so pogosto plastovite ali skrilave, kjer so mineralna zrna vzporedno razporejena, in so zato podobne sedimentnim kamninam. Po svoji mineralni sestavi so podobne magmatskim kamninam s tem, da vsebujejo samo za metamorfne kamenine značilne minerale. Znana metamorfna kamnina je marmor, ki je nastal po procesih prekristalizacije jedrnatih sedimentnih kamnin - apnenca in dolomita. Zato se pravi marmor močno razlikuje od običajnega okrasnega apnenca (podpeški "marmor", hotaveljski "marmor").

Metamorfne kamenine se razvrščajo na osnovi mineralne sestave in strukture v naslednje skupine: filite, skrilavce, gnajse, amfibolite, marmorje, kvarcite in druge (eklogiti - nastali so pri izredno visokih temperaturah, granuliti).

Nahajališča v Sloveniji

Med magmatskimi kamninami so prisotne globočnine in predornine. Globočnine se nahajajo v okolici Črne pri Mežici (porfiroidni granit permotriasne starosti, 244 - 216 milijonov let) in na Pohorju, kjer so nahajališča tonalita, ki prehaja v granodiorit in čizlakita pri kraju Cezlak.

Predornin je več, kar priča o ognjeniški aktivnosti na našem območju v daljni preteklosti. Iz obdobja pred 250 milijoni let izvirajo temno zelene do skoraj črne kamenine - diabazi. Nahajajo se pod Peco, Uršljo goro in drugod v Karavankah. Naslednji močni ognjeniški izbruhi so bili pred 200 milijoni let. Zapustili so lavo in pepel. Iz lave so nastajale zelenkaste in rdečkaste kamenine - keratofirji, porfirji in porfiriti, iz pepela pa tufi in grohi. Nahajališča so v Julijcih, Karavankah in Savinjskih Alpah. Tretje obdobje ognjeniške aktivnosti je bilo pred približno 32 milijoni let v Zgornji Savinjski dolini (pri Smrekovcu). Na južni strani Smrekovca se nahajajo andezitni grohi (tufi) v plasti debeli okoli 800 m. Vse do Peračice na Gorenjskem in v Spodnji Savinjski dolini se nahajajo andezitni tufi, ki so ostali od izlite andezitne lave. Dacitna lava je zapustila dacite, tonalit in metamorfne kamenine na Pohorju. Zadnje obdobje izbruhov je bilo pri nas pred približno 6 milijoni let, ko je na površje prihajala samo bazaltna lava. Ta se je iz področja Gleichenberga v Avstriji razširila proti naši vzhodni Štajerski in Prekmurju.

Pretežni del našega ozemlja tvorijo sedimentne kamenine med katerimi prevladujejo apnenci in dolomiti. Nekateri vsebujejo fosile: školjke, polže, korale, alge, foraminifere itd. Najdemo skoraj vse vrste v Evropi znanih sedimentnih kamnin vključno s piroklastičnimi kamninami (različni tufi).

Metamorfne kamenine so na Pohorju (regionalne metamorfne kamenine). Zastopani so gnajsi, blestniki, filiti in amfiboliti, manj pa je eklogita (nastopa v lečah), marmorja in kvarcita. V Šempetru v Savinjski dolini stojijo rimski nagrobniki, ki so izdelani iz pohorskega marmorja. Pri procesu regionalne metamorfoze, so nekatere kamenine nastale iz gline, ki je najprej prešla v filit, nato v blestnik in gnajs. Iz diabazov pa so nastali amfiboliti in iz apnenca marmorji.

FIZIKALNE IN MEHANSKE LASTNOSTI KAMNA

Fizikalne in mehanske lastnosti kamenin so odvisne od geoloških razmer pri katerih so nastale (naknadne geološke spremembe vplivajo na dodatne spremembe lastnosti), razporeditve kamnitih masivov, plastovitosti itd. S stališča pridobivanja naravnega kamna je kakovost kamnitih blokov zelo pomembna: monolitnost in masivnost zvišuje kakovostno raven kamna, a otežuje njegovo pridobivanje in obdelavo. Skrilavost in plastovitost lahko zmanjša kakovost in uporabnost kamna a olajšuje njegovo pridobivanje.

V kamnu so različne vrste razpok tako po obsegu kot po širini. So lahko od mikroskopskih izmer (pore) do velikih in odprtih razpok. Olajšujejo pridobivanje kamna iz velikih blokov oziroma kamene mase, obenem pa znižujejo mehanske lastnosti kamna.

Strukturo kamna določajo značilne oblike zrn, njihova velikost in razprostranjenost v masi. Pri gradbenem kamnu je pomembna velikost in medsebojno razmerje zrn. Njihova oblika vpliva na mehanske lastnosti (trdnost, žilavost, obrabnost), poroznost strukture pa vpliva na fizikalne in tehnološke lastnosti kamna (gostota, vodoprepustnost, higroskopičnost, zmrzlinska odpornost).

Fizikalne lastnosti

Gostota

Gostota je enota mase na prostornino vključno s porami. Določa se s sušenjem kamna na 100-110°C. Specifična masa kamene snovi se določa na zdrobljenemu kamnu.

Poroznost

Poroznost vpliva na vse mehanske lastnosti kamna in je zato njegova najbolj pomembna fizikalna lastnost. Določa se kot razmerje skupne prostornine por proti celotni prostornini kamna. Pri manj poroznih kamnih je p = 1-2%, pri zmerno poroznih je p = 2,5-5%, pri poroznih je p = 10-20% in pri zelo poroznih je $p \geq 20\%$.

Higroskopnost

Higroskopnost je sposobnost kamna, da vpija vodo zaradi kapilarnega transporta vlage. Na njo vplivajo le pore, ki so medsebojno povezane oz. odprte. Higroskopnost se določa s preiskavo, pri kateri se vzorec kamna izpostavi pritisku 150 barov. Iz razmerja količine vpijanja vode pod povečanim pritiskom (H_{gp}) in pri atmosferskem pritisku (H_g) se določi koeficient zasičenosti (Z):

$$Z = H_g / H_{gp} \leq 1 \qquad (3\text{-}1)$$

Velikost koeficienta zasičenosti je svojevrstno merilo trdnosti, odpornosti in obstojnosti kamna.

Vodoprepustnost

Vodoprepustnost (permeabilnost) kamna je sposobnost prepuščanja vode v določenemu času pri delovanju določenega tlaka. Odvisna je od poroznosti, vendar ne v proporcionalnem razmerju.

Naravna vlažnost

Naravna vlažnost je tista vlažnost, ki jo ima kamen v naravi pred in neposredno po odvzemu za uporabo. Veter in sonce jo znižujeta in pri tem kamen pridobiva na trdoti in trdnosti (zaradi zmanjševanja površinske poroznosti). Naravno vlažnost je praktično nemogoče spraviti nazaj v osušen kamen.

Zmrzlinska odpornost

Zmrzlinska odpornost kamna je neposredno odvisna od njegove poroznosti in higroskopnosti. Lahko se izraža s koeficientom zasičenosti. Zmrzal praktično ne vpliva na kamen v mejah $1 \leq Z \leq 0{,}92$, v mejah $0{,}92 \leq Z \leq 0{,}80$ pa je kamen še vedno zmrzlinsko obstojen.

Struktura kamna se spreminja zaradi delovanja temperaturnih sprememb. Te spremembe se lahko raziščejo s preiskavami, pri katerih se ciklično spreminjajo temperature (30 ciklov) med sobno (+20°C) in temperaturo -25°C. Na osnovi teh raziskav se določa koeficient zmrzlinske odpornosti kamna (K_m) kot razmerje med tlačno trdnostjo suhega kamna pred zmrzovanjem (β_0) in trdnostjo kamna po zmrzovanju (β'). Zmrzlinsko odporni kamni imajo $K_m \leq 1{,}1$.

$$K_m = \beta_0 / \beta' \qquad (3\text{-}2)$$

Temperaturna obstojnost

Večina kamnov se normalno obnaša do temperature +55°C. Pri višjih temperaturah kamen pri trku ne ″zvoni″, nepravilno poka, znižujejo pa se tudi njegove mehanske lastnosti. Koeficient temperaturnega raztezka (α) je različen pri različnih vrstah kamenin, razlikuje pa se tudi pri enakih kameninah.

Mehanske lastnosti

Trdota

Trdota kamna je odvisna od trdote veznega cementa, ki povezuje mineralna zrna. Pomembna je zaradi izbire orodja za obdelavo kamna, za izbiro kamna za obrabne površine.

Tlačna trdnost

Tlačno trdnost se določa s preskusom kocke, ki ima stranico dolgo 5 cm. Hitrost obremenjevanja je 1,2-1,5 MPa/s. Preskuša se 15 vzorcev in to: 5 vzorcev, ki so sušeni na zraku (β_P), 5 vzorcev, ki so zasičeni z vodo (β_P') in 5 vzorcev, ki so prestali 25 ciklov zmrzovanaja (β_P''). Iz razmerij tlačnih trdnosti se določajo različni parametri, na osnovi katerih presojamo mehanske lastnosti kamna.

Koeficient zmehčanja kamna (K_0) predstavlja kriterij kakovosti kamna:

$$K_0 = \beta_p' / \beta_p \qquad (3\text{-}3)$$

Pri jedrnih kameninah je $K_0 \leq 1$, pri glinastih kameninah pa je lahko le $K_0 = 0{,}66$. Za gradbeništvo so uporabne kamenine, ki imajo K_0 v mejah od 0,75 do 0,90.

Koeficient varnosti kamna (n_k) je odvisen od homogenosti kamenine, trdnosti mineralov in njihove povezave, od vloge kamna v zgradbi in napetostnega stanja, ki ga v kamnu povzročajo zunanje obremenitve.

$$n_k = \beta_p / \sigma_{p.\,dop} \qquad (3\text{-}4)$$

Koeficient varnosti se pri kamninah giblje v območju 10 do 40.

Upogibna in natezna trdnost

Gradbeni kamen ima razmeroma nizko natezno in upogibno trdnost. Take obremenitve pri kamnitih blokih niso nevarne, pridejo pa do izraza pri tanjših kamnitih ploščah.

Strižna trdnost

Strižna trdnost kamna je pomembna lastnost pri njegovi izbiri za vgradnjo v voziščne konstrukcije. Določa se z neposredno strižno preiskavo prizem (5/5/15cm ali 10/10/30cm). Določena je z izrazom:

$$\tau = F / 2A \qquad (3\text{-}5)$$

Odpornost na obrabo

Obraba kamna je odvisna od trdote sestavin in načina njihove sestavljenosti ter načina delovanja obrabne obtežbe. Preskuša se z obrusom kocke na rotirajoči plošči, na katero se posipa korundni prah. Koeficient obrabe (K_h) je odvisen od metode preiskave, zato je vedno treba povedati, na kakšen način je bil kamen preskušan.

$$K_h = (G_0 - G) / \gamma = \Delta G / \gamma \qquad (3\text{-}6)$$

V zgornjem izrazu je ΔG izguba kamnitega materiala zaradi obruska, γ pa njegova specifična masa.

Odpornost kamna na udarce in trdnost robov

Te lastnosti so pomembne pri uporabi kamna v cestogradnji. Preskuša se v jeklenem bobnu, ki ima jeklen zob v notranjosti. V boben se poleg kamna dajo tudi jeklene krogle, ki med vrtenjem bobna okoli svoje osi povzročajo udarne obremenitve preskušancev (metoda Los Angeles). Obraba pri udarcu se izrazi kot razmerje med izgubo kamnitega materiala in njegovo prvotno maso:

$$\alpha = (\Delta G / G_0)\, 100\ (\%) \qquad (3\text{-}7)$$

Žilavost

Žilavost se preskuša z udarno obtežbo do porušitve vzorca. Mera za žilavost kamna je razmerje med celotno porušno energijo in prostornino preskušanca.

Sprijemnost malte in kamna

Sprijemnost malte na kamen je pomembna lastnost pri zidanju kamnitih konstrukcij ali njihovega ometavanja. Odvisna je od obdelave površine kamna, njegove strukture in kakovosti ter sestave malte. Malta se dobro sprime z hrapavim in površinsko poroznim kamnom.

Barva kamna

Barva je odvisna od mineralne sestave kamna in od barve veznega cementa. Pomembna je obstojnost barve pri izpostavljenosti atmosferskim vplivom. Neobstojnost barve se lahko ugotovi z izpostavljanjem poliranega vzorca atmosferskim vplivom in blagim raztopinam žveplene ali klorovodikove kisline.

Poliranje kamna

S poliranjem se poudarja barva in struktura kamna ter povečuje njegova odpornost. Trd, jeder in drobnozrnast kamen kvalitetno kristaliziranih kamenin je zelo primeren za vidne obloge.

ARHITEKTURNO – GRADBENI KAMEN

Značilnosti kamenin, ki se najpogosteje uporabljajo v gradbeništvu

Graniti

Graniti so najbolj pogosto uporabljene magmatske kamenine v graditeljstvu. Nekateri vsebujejo večjo količino glinencev, ki s svojo barvitostjo (modrikasti, rdeči, zeleni, črni, beli) poleg zrn sljude ustvarjajo zanimive površinske efekte in so zato primerni za luksuzne obloge.

Bistvena značilnost granitov in sorodnih magmatskih kamnin je njihova velika gostota (2500 do 2700 kg/m^3), visoka tlačna trdnost (110 do 245 MPa), majhna poroznost (0,3 do 5%) in velika trdota ter drobna do srednje groba zrnatost. Vsebujejo veliko različnih mineralov, kar prispeva k njihovi zanimivosti. Zaradi visoke trdnosti so stroški pridobivanja in obdelave razmeroma visoki. Večji bloki se ločujejo z eksplozivom in nato žagajo z diamantnimi žagami. Uporabljajo se v obliki tanjših obložnih plošč, ki so površinsko grobo obdelane (večje debeline plošč) ali zglajene do sijaja (tanjše plošče celo samo do 25 mm debeline). Njihove površine so zelo obstojne in so zaradi majhne poroznosti sposobne samo-očiščenja. Homogeni graniti sodijo med najbolj obstojna gradiva. Zato je v preteklosti bila zelo razširjena njihova uporaba v cestogradnji (kocke in robniki iz tonalita).

Peščenjaki

Sedimentne kamenine, ki jih pogosteje srečujemo v konstrukcijah, so različni peščenjaki. Večinoma so to kremenčevi okruški velikosti do 2 mm povezani s cementi, ki vsebujejo minerale železa, silicija ali apnenca. Na mehanske lastnosti peščenjakov vplivajo velikosti zrn in trdnosti veziv, na njihovo barvitost pa vrsta mineralov. V naravi se nahajajo v plasteh, kar olajšuje pridobivanje in določa debelino blokov. Njihova trajnost je bolj odvisna od veziva med zrni kot od poroznosti in geološkega izvora. Obstojnost apnenih peščenjakov je ogrožena zaradi vpliva onesnaženega zraka, ki v kombinaciji z atmosfersko vlago povzroča razpadanje apnenega veziva. Poroznost peščenjakov variira od 1 do 25% in tako tudi njihova trdnost. Za gradnjo so primerni peščenjaki tlačne trdnosti 100 do 180 MPa. Peščenjaki so v primerjavi z apnenci bolj grobozrnati in je zato njihova vpojnost manjša (koeficient vpojnosti od 0,5 do 0,7). Njihova zmrzlinska odpornost je v večini primerov ustrezna.

Razmeroma groba zrnatost je pri večini peščenjakov ovira brušenju in poliranju. Onesnaženo okolje lahko povzroča poškodbe zaradi kristalizacije pod površino in spremembe barve ter čistosti površin zaradi prodiranja umazanije skozi povezane pore v notranjost kamna. Znani so primeri, ko so mnogi peščenjaki v onesnaženih okoljih povsem počrneli. Zato so razvili posebne postopke pranja njihovih površin in zaščite z različnimi postopki impregnacije.

Apnenci

Najbolj razširjene sedimentne kamenine pri nas so apnenci in dolomiti, saj je kraški svet apnenca in dolomita. Sestavljeni so pretežno iz kalcijevega karbonata. Tvorijo se z medsebojnim vezanjem apnenčastih plasti pod vplivom vode, ki raztaplja in izloča kalcij. Zelo so zanimivi oolitni apnenci. Sestavljajo jih granule jajčaste oblike, ki so jih tvorile plasti v vodi izločenega apnenca okoli zrnc peska ali lupin živih organizmov. Nečistosti v apnencih povzročajo spremembe barve in teksture. Geološko starejši apnenci so v splošnem bolj gosti, kristalaste strukture in zato bolj trdni in odporni. Nekateri so podobni metamorfnim kameninam (marmorjem) in jih zato lahko kakovostno obdelujemo in poliramo.

Apnenci so zaradi svoje kemične zgradbe zelo občutljivi na zunanje vplive in onesnaženost okolja. Vsebujejo vodo, v kateri so raztopljene soli in kalcijev karbonat. Pod zunanjimi vplivi te snovi potujejo proti površini kamna, kjer kristalizirajo ter tvorijo trdno skorjo. Apnence je lažje obdelovati pred končanjem tega procesa. Vendar pa obstaja mnenje, da je dobro počakati, da se vse soli in ostale škodljive primesi izločijo na površino, s katere jih potem z obdelavo odstranimo. Po procesu izločanja je apnenec zmrzlinsko odpornejši tudi zaradi znižanja vlažnosti. Za obstojnost apnencev je bolj nevarna onesnaženost zraka (nastajanje žveplovih kislin) kot zmrzovanje. Ta na površini apnencev ustvarja trdo skorjo iz kalcijevega sulfata, ki se občasno lušči in s tem povzroča površinske poškodbe kamna. Poseben problem je tudi kristalizacija različnih soli na površini apnenca.

Poroznost apnenca variira od 1 do 40%, najpogosteje okoli 2%. Apnenci z večjimi porami so bolj obstojni. Pri koeficientu zasičenosti nad 60% so apnenci

razmeroma obstojni. Gostota apnencev znaša od 2100 do 2870 kg/m^3, tlačna trdnost pa od 20 do 290 MPa in je močno odvisna od poroznosti kamna.

Marmorji

Marmorji so metamorfne kamenine nastale z rekristalizacijo apnencev in dolomitov. So zrnate strukture z velikostjo zrn od mikroskopsko majhnih do tistih, ki imajo premer nekaj mm. Lahko so povsem beli ali pastelnih barv. Zanimivost in lepota marmorjev je posledica nečistoč, ki so vključene v apneno strukturo in se kažejo kot raznobarvne žile. Pomemben mineral je serpentin, ki daje zeleno barvo. Pogoste so tudi roza, rumena in modra barva. Lepota marmorja se poudarja s poliranjem površin.

Po lastnostih so podobni apnencem, vendar so zaradi manjše poroznosti bolj odporni in obstojni. Njihova gostota je od 2650 do 2820 kg/m^3, tlačna trdnost od 54 do 266 MPa, najpogosteje okoli 120 MPa. Lahko se obdelujejo in brusijo do visokega sijaja. Zaradi vpliva okolja, ki lahko močno poškoduje izgled marmorja, se ti danes večinoma uporabljajo za notranje dekorativne obloge. Po svoji lepoti so zelo znani marmorji iz Brača, z otoka Parosa v Grčiji in Carare v Italiji.

Skriljevci

Nastali so s preobrazbo gline, glinastih skrilavcev in ostalih kamnin pod visokim pritiskom in temperaturo. So izrazito plastoviti. Večje plošče se žagajo v pravilne kose, ki se nato cepijo v tanjše plošče. V nekaterih deželah (Walles, V.B.) pridobivajo izredno tanke plošče (debeline 3 do 5 mm), ki jih uporabljajo kot kakovostno kritino črne, modre, sive ali rdeče barve. Debelejše plošče uporabljajo za tlakovanje, obrobe, okenske police in podobne elemente

Kakovostne lastnosti kamna

V preglednici 9 so prikazane zaželene in nezaželene lastnosti kamnin, ki določajo njihovo primernost oz. neprimernost za uporabo v gradbeništvu. Pri isti vrsti kamenine se lahko pojavijo tudi lastnosti, ki so ravno v nasprotju z zaželenimi lastnostmi.

Preglednica 9: Zaželene in nezaželene lastnosti kamenin

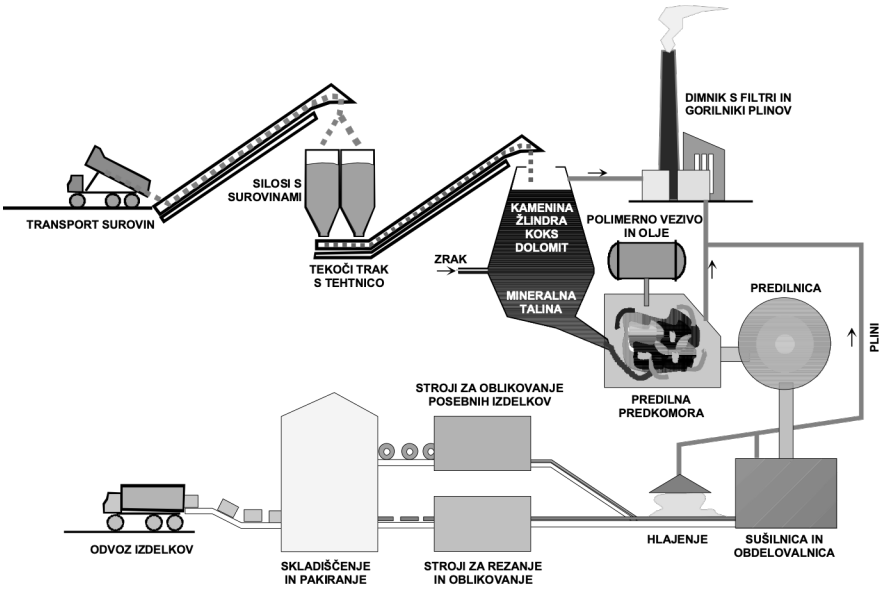
Vrsta kamenine	Zaželene lastnosti	Nezaželene lastnosti
GRANIT, SIENIT	Svežina glinencev, drobna zrnatost, enakomerna velikost zrn, malo enakomerno razporejene sljude, veliko kremenčevih kristalov, velike klade in pravilno razporejene razpoke v zelo omejenem obsegu.	Izgubljena svežina mase, razpadajoči glinenci, majhna trdota (lahko se para z nožem), veliko sljude, ki je koncentrirana v posameznih območjih.
DIORIT, GABRO	Enakomerna razporeditev sestojin, svežina mase, drobna zrnatost, granitna struktura zrnatosti v gabru, pravilno cepljenje.	Slaba cepivost ali školjkasti odlomi, groba zrnatost, gabrova struktura (luskasto zrnata).

PORFIRJI	Malo čvrstih in velikih utrošnikov, osnovna masa je kristalasta in sveža, nož jih ne razi, gladek prelom, velike klade	Veliko utrošnikov, razpadli glinenci, vonj po glini, luskasti odlom, rdeča barva porfirja in porfirita
RIOLIT, TRAHIT, ANDEZIT	Drobni in enakomerno debeli kristali, osnovna zgradba je mikrokristalna, temen andezit .	Poroznost, izrazito ločenje porfirjev, svetla barva andezita
BAZALT, DIABAZ	Jeder in temne barve (črn), majhne količine olivina in nefelina, brez steklaste mase, gladek prelom, debele klade ali prizme.	Poroznost, svetlost barve, veliko olivina in nefelina, hrapav in iverkast prelom, kroglasti odlomi, bele (sončne) pege.
GNAJS	Sveži glinenci, malo sljude, veliko kremena, neizrazita skrilavost, ravne površine, debele klade.	Veliko sljude, razpadli glinenci, nepovezanost, neravnomernost plastovitost, skrilavost.
PEŠČENJAKI	Čim več kremenčevih zrn, kremenčevo vezivo, izrazita plastovitost debelih klad.	Veliko zrn iz glinencev in sljude, glinenčevo vezivo, skrilavost.
APNENEC, DOLOMIT	Jadrnost in čvrstost, nimajo vonja po glini, debele klade, pravilne in na redko razporejene prečne razpoke.	Zemljasta struktura, temnejše barve, imajo vonj gline, tenke plasti in plošče, nepravilne in gosto razporejene prečne razpoke.

Optimalna kakovost kamna je odvisna od njegovih fizikalnih in mehanskih lastnosti, kakor tudi od celotnih geoloških razmer, v katerih je kamenina nastala. Izbor posamezne kamenine za določen namen je odvisen od njenih pričakovanih lastnosti. Odločitev o uporabi posamezne kamenine narekuje poleg lastnosti tudi ekonomičnost njene uporabe, ki je odvisna od bližine naravnega nahajališča, vrste objekta v katerega vgrajujemo kamenino, obremenitve kamenine v objektu, želeni izgled objekta, dostopnost kvalificirane delovne sile itd.

MINERALNA VOLNA

Iz mineralov, ki jih vsebujejo magmatske kamenine, kremenčevi in drugi eruptivni peski, žlindre, odpadno steklo in odpadna mineralna volna se izdeluje material, ki ima izredne izolacijske lastnosti. Znan je kot mineralna volna. Glede na prevladujočo surovino iz katere se proizvaja se imenuje kamena, steklena ali žlindrina volna. Mineralne volne ovirajo izgube energije, ki jo uvajamo v zgradbe, vplivajo na zmanjšanje onesnaženosti zraka, izolirajo pred hrupom in visokimi temperaturami ter s tem ovirajo širjenje požara. Mineralne volne sodijo med časovno stabilne materiale. Njihove izredne termalne, ognjeodporne in akustične lastnosti izvirajo iz strukture, ki jo tvorijo medsebojno prepletene mineralne niti in iz kemične sestave teh niti. Izdelki narejeni iz mineralne volne se razlikujejo po lastnostih, ki jih določa sestava niti, njihove usmeritve in izmer, kompaktiranosti niti in kakovosti ter vrste veziva, ki povezuje niti v razmeroma homogeno celoto. Lastnosti mineralne volne so odvisne od kombiniranja vhodnih surovin, kar medsebojno loči izdelke različnih proizvajalcev.



Slika 6: Shema proizvodnje kamene volne

Osnova za izdelavo mineralne volne so pri 1300ºC do 1500ºC staljeni in medsebojno zmešani minerali. Pri stekleni volni so to kremenčev pesek, natrijev pepel, apnenec in odpadno steklo, pri kameni volni pa bazalt, diabaz in podobne magmatske kamenine, žlindra in odpadna kamena volna ter dolomit kot talilni dodatek. Kot gorivo se uporablja koks, ki gori ob dovajanju vročega zraka. Steklasta talina se prede ali vleče v tenke niti. Pri stekleni volni se niti tvorijo z iztiskanjem taline skozi perforirani rotirajoči boben, pri kamniti volni pa talino razpršijo hitro se vrteča jeklena kolesa. Niti se obdelajo s polimernim vezivom in oljem do želene gostote ter strdijo in osušijo v sušilnici s pomočjo toplega zraka. Trakovi iz mineralne volne se oblikujejo v različne izdelke kot so izolacijske plošče in izolacijske cevi, ostanki pa se vrnejo v proces kot surovina.

TEHNIČNI KAMEN IN MINERALNI AGREGAT

Tehnični kamen se pridobiva kot stranski produkt v kamnolomih, kjer pridobivajo bloke za nadaljnjo obdelavo, v kamnolomih tehničnega kamna in v gramoznih izkopih v aluvialnih dolinah. Nekoč se je tehnični kamen uporabljal tudi za zidavo zgradb (mešani opečno-kamniti zidovi hiš v stari Ljubljani, kamniti zidovi na Primorskem). Danes se tehnični kamen uporablja pri gradnji prometnic (cestogradnja, železniške proge) in kot osnovna surovina za izdelavo betonov. Mineralni agregat kot osnova betonov se razlikuje glede na način pridobivanja. Lomljenec, ki nastane z drobljenjem večjih kosov kamna ima ostre robove in pogosto manj trdna zrna zaradi notranjih razpok. Gramoz, ki je aluvialnega izvora, ima oble robove in je raznolike mineralne sestave v odvisnosti od izvora rečnih nanosov.

Na splošno, agregate lahko definiramo kot čist, trd in inerten material, ki ga vgrajujemo v betonske mešanice. Njihova vloga v betonu je sledeča:

- znižujejo ceno betona; so razmeroma poceni, ker postopek pridobivanja ni drag, saj obsega izkop, pranje in sejanje ter transport do mesta uporabe,
- ustrezno sestavljeni po frakcijah ustvarjajo koheziven beton, ki ga je lahko obdelovati v svežem stanju,

- znižujejo hidratacijsko temperaturo betona, ker so običajno kemično inertni in delujejo kot odvajalci toplote nastale s hidratacijo cementa,
- zmanjšujejo krčenje betona, ker na večino agregatov voda ne deluje in zato lahko omejujejo krčenje cementne paste med hidratacijo.

Poleg navedenega, agregati lahko služijo tudi za:

- uravnavanje površinske trdote betona, ker so večinoma bolj odporni na obrus kot cementni kamen, ki povezuje agregat; pri posebnih zahtevah se lahko uporabijo tudi obrusno odporni agregati iz granita ali ostalih trdih magmatskih kamenin,
- ustvarjanje barvitosti betonske površine ali njene sposobnosti, da odbija svetlobo
- kontrolo gostote
- zvišanje požarne odpornosti betona.

V običajnih betonih agregat tvori okoli 75% njihove prostornine, pri betonih nizke trdnosti (podložni betoni, temelji) pa tudi do 85% prostornine.

Agregate razvrščamo po načinu pridobivanja na drobljence in gramoze aluvialnega izvora. Po mineralni sestavi jih ločujemo glede na vrste kamenin iz katerih so pridobljeni in katere določajo njihove mehanske lastnosti. Granitne in bazaltne agregate odlikuje visoka trdnost in obrabna odpornost, apnenčaste pa velika razširjenost in nizka cena.

Vpliv lastnosti agregata na lastnosti betona

Gostota

Gostota agregatov je odvisna od njihovega izvora in lahko variira od 500 kg/m^3 (lahki agregati) do 7000 kg/m^3 (izjemno težki magnetiti agregati). Gostota običajnih agregatov je 2200 do 2600 kg/m^3. Gostota materiala, ki tvori agregat se pogosto imenuje ‘relativna gostota’ (specifična gostota). To je razmerje med gostoto agregata in gostoto vode. Glede na različno obravnavanje praznin v zrnih agregata ločimo tri definicije relativne gostote:

- normalna relativna gostota kot razmerje med maso normalno suhega agregata in njegove prostornine brez por
- relativna gostota z vodo zasičenega a površinsko suhega agregata kot razmerje mase agregata skupaj z maso vode v porah in prostornine agregata vključno s porami
- relativna gostota agregata osušenega v peči kot razmerje mase osušenega agregata in prostornine agregata skupaj s porami (slika 10c)

Prva izmed naštetih relativnih gostot je najvišja, ker se odprte pore obravnavajo kot da niso del prostornine. Ta se uporablja pri izračunu teoretične suhe gostote agregata pri preiskavah podložnega betona za cestišča. Najnižjo vrednost gostote ima v peči sušen gramoz. Ta gostota se uporablja pri izračunu gostote otrdelega betona v suhem stanju.

Maksimalno zrno

Običajno obravnavamo grobi (zrna premera nad 4 mm) in drobni agregat. Z izrazom pesek ponavadi imenujemo droben agregat nastal z naravnim

razpadanjem skal. Velikost maksimalnega zrna v betonu je odvisna od vrste in izmer konstrukcije v kateri uporabljamo beton. V splošnem, velikost maksimalnega zrna ne sme presegati 25% minimalne izmere konstrukcije, s posebno pozornostjo pri močno armiranih prerezih. Pri večini konstrukcij je maksimalno zrno agregata velikosti 16 mm ali največ 32 mm. Pri betonih v cestogradnji in zlasti pri masivnih inženirskih konstrukcijah (ločne pregrade) so lahko maksimalna zrna 64 mm. Pri slednjih se lahko v beton vgrajujejo tudi veliki kosi kamna, ki pa ne smejo presegati 30% celotne prostornine betona. Povečanje velikosti agregata zmanjšuje njegovo skupno površino v celotni masi betona, se zmanjša tudi potreba po vodi in cementu in s tem zniža cena betona. V 'masivnem' betonu velika zrna in kamni zmanjšujejo hidratacijsko temperaturo ker odvajajo toploto. Po drugi strani, zaradi velikih stičnih površin, tak beton dosega manjšo trdnost. Drobne frakcije agregata so potrebne za enakomerno zapolnitev prostora med večjimi zrni in morajo biti dodani v ustreznem razmerju do maksimalnega zrna.

Oblika zrn agregata

Oblika zrn je odvisna od izvora agregata. Pri vodonosnih so idealno pravilna zrna kroglaste oblike, pri lomljenih pa kvadraste. Večinoma pa so zrna vmesne oblike in so bolj ali manj "nepravilna". Pri običajnih betonih zaobljena zrna omogočajo boljšo vgradljivost, vendar se z lomljenim agregatom lahko dosegajo višje trdnosti pri enakem vodo cementnem razmerju. Pri visokonosilnih betonih ostrorobi agregati ne vplivajo na enak način, saj se tudi z njimi da doseči visoka vgradljivost. Zrna agregata s poudarjeno dimenzijo (paličasta, ploščata) imajo veliko specifično površino in poudarjeno neizotropne lastnosti, kar bistveno zmanjšuje njihovo primernost.

Površinska tekstura

Obstajata dve ekstremno vrsti površin: groba in fina. Prva omogoča izredno dobro sprijemnost med cementnim kamnom in zrnom agregata, kar je pomanjkljivost v drugem primeru. Zrna z grobo površino nekoliko zmanjšujejo vgradljivost betona, po drugi strani pa prispevajo k njegovi višji trdnosti, če so tudi sama dovolj trdna.

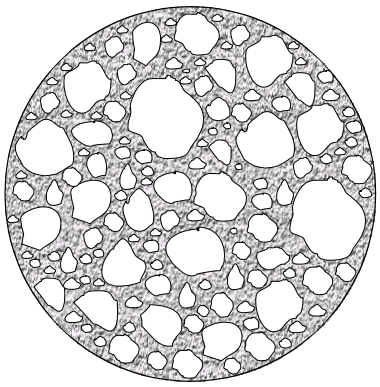
Trdnost agregata

Z uporabo agregata nizke trdnosti ne moremo pripraviti betona visoke trdnosti ne glede na kakovost ali količino ostalih komponent (cement, dodatki, voda). Zrna takega agregata so razmeroma podajan (nizek modul elastičnosti) in zato pod obremenitvijo prevzamejo njen manjši delež, večjega pa prevzame cementni kamen, ki se zaradi tega predčasno poruši. Zato pri betonih visoke trdnosti uporabljamo trdne agregate (granitna zrna), ki pa ne pridejo v celoti do izraza pri srednjih obremenitvah betona. Primernost posameznih vrst agregata se da oceniti z analizo porušitve betonskih kock. Če se je pri porušitvi betona porušilo večje število zrn agregata (npr. več kot 25%), velja razmisliti, ali bi se boljši rezultati dosegli z uporabo trdnejšega agregata. V praksi je treba upoštevati tudi ekonomičnost izdelave betona in preučiti, ali je mogoče večja količina cementa cenejša rešitev kot nabava trdnejšega agregata.

Zrnatost (granulometrijska sestava)

S tem izrazom opisujemo relativno razmerje različnih velikosti zrn med nominalno maksimalnim zrnom in najdrobnejšim prisotnim delcem materiala, ki gre skozi sito z odprtino 0,25 mm. Ustrezna granulometrijska sestava agregata omogoča izdelavo svežega betona ustreznih plastičnih lastnosti (vgradljivost, kohezija odpornost na izločanje vode) in otrdelega betona ustreznih lastnosti (trdnost, trajnost in izgled površine). Ustrezno granuliran agregat dobro zapolnjuje celoten prostor in onemogoča segregacijo sveže betonske mešanice. Praznine med posameznimi večjimi zrni se pri ustrezni sestavi pravilno zapolnijo z manjšimi zrni vse do najmanjših delcev (cementna zrnca). Na sliki 7 je prikazan primer granulometrijske sestave agregata v betonskem prerezu.

Predpisi oz. standardi predpisujejo granulometrijsko sestavo agregata v obliki mejnih krivulj, med katerimi mora potekati krivulja obravnavanega agregata. Krivulje predstavljajo razmerja med odprtino sita (na abscisni osi) in količino presevka skozi določeno sito izraženo v % od celotne količine agregata (na ordinatni osi). Pri sejalni analizi, s katero določamo granulometrijsko sestavo agregata, ločimo pojme: presevek, ostanek na situ in frakcija. Presevek je tista količina agregata, ki pade skozi sito z določenim premerom odprtin. Ostanek na situ je količina agregata, ki ostane na situ z določenim premerom odprtin. Frakcija je količina agregata, ki pade skozi sito z določenim premerom odprtin in ostane na situ z manjšim premerom odprtin. Tako npr. s frakcijo 8/16 označujemo količino agregata, ki je padla skozi sito z odprtinami premera 16 mm in se zadržala na situ z odprtinami premera 8 mm. Na sliki 9 so prikazane mejne krivulje primernosti granulometrijske sestave agregata po standardu JUS.



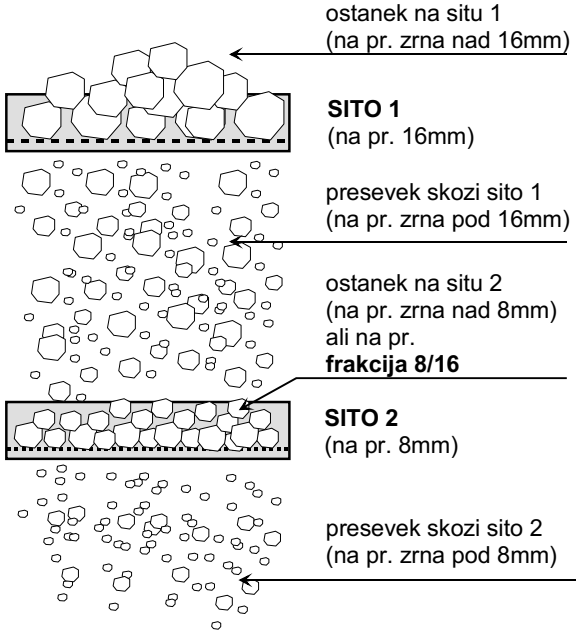
Slika 7: Zrnavost agregata v betonskem prerezu

V fazi projektiranja sveže betonske mešanice sestavimo tako granulometrijsko sestavo betona, ki ustreza postavljenim zahtevam. Posebne vrste betonov lahko tvorimo tudi z modifikacijami granulometrijske sestave. Tako poznamo betone sestavljene iz omejenega števila frakcij ali celo iz samo ene do dveh frakcij. Posebne učinke lahko dosegamo z izpuščanjem določene frakcije in s tem dosežemo boljšo vgradljivost (izpustitev frakcije 4/8). Vendar moramo izvesti vse te modifikacije sestave premišljeno in jih spremljati s preskusi, da ne bi povzročili resnih napak, ki se odražajo v segregaciji svežega betona ali bistveni spremembi želenih mehanskih lastnosti otrdelega betona. V procesu projektiranja sveže mešanice betona je sestavljanje frakcij agregata eno od najbolj občutljivih in pomembnih faz dela.

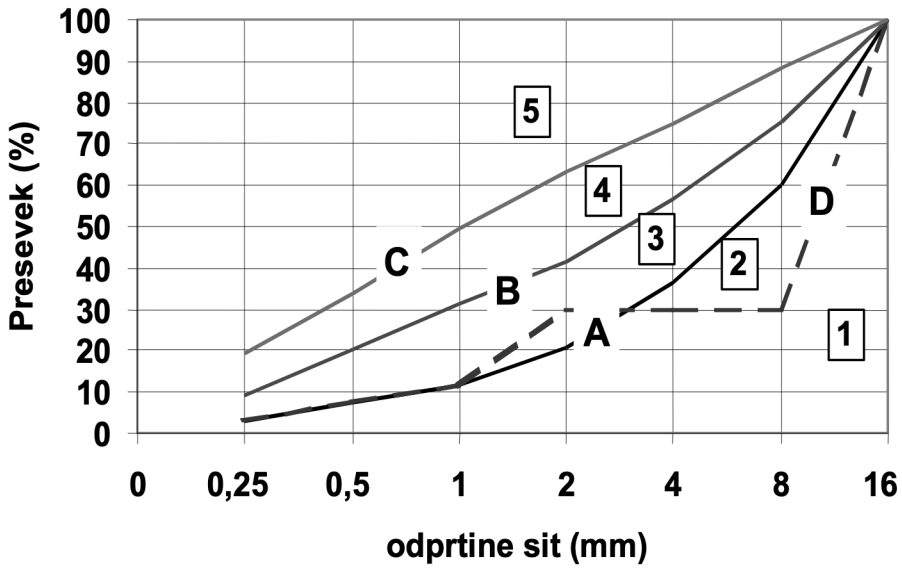
Na sliki 9 so prikazane mejne krivulje, ki jih predpisuje še vedno veljavni standard JUS U.M1.05, prevzete pa so iz nemškega standarda DIN 1048. Te krivulje služijo za določanje ustrezne granulometrijske sestave agregata za beton. Če se s sejalno analizo agregata, ki ga želimo uporabiti za sestavo betonske mešanice, ugotovi, da granulometrijska krivulja poteka v območju **1** ali **5,** taka sestava ni ustrezna in jo je treba popraviti z dodajanjem določenih frakcij agregata. Če granulometrijska krivulja našega agregata poteka v območju **3**, ga lahko uporabimo brez posebnih nadaljnjih preiskav in sprememb razmerja frakcij. Če naša krivulja poteka skozi območja **2**, **3** in **4** so ali potrebne dodatne preiskave za zagotovitev ustrezne kakovosti betona ali pa moramo spremeniti sestavo agregata z dodajanjem potrebnih frakcij.

Krivulja **D** ponazarja "diskontinuirano" granulometrično sestavo. Betoni, ki so narejeni iz agregata take granulometrijske sestave, imajo posebne lastnosti. Taki betoni so lahko zelo kompaktni in visoke kakovosti, če so izpolnjeni tudi drugi pogoji (ustrezen cement, ustrezen vodocementni količnik, ustrezna vgradnja in nega betona itd.) Pomankljivosti diskontinuirane sestave pa so težja vgradljivost betona ob nevarnosti segregacije.

Alternativni pristop k določanju sestave agregata je pristop z upoštevanjem modula finosti agregata. V ZDA in Kanadi se pri betonu predpisujejo deleži grobega in finega agregata. V skupino grobega agregata sodi agregat s premerom zrn nad približno 4 mm, v skupino finega agregata pa agregat manjših dimenzij.



Slika 8: Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov



Slika 9: Mejne krivulje območij primernosti agregata po JUS U.M1.057

Kakovost agregata

Pojem kakovosti agregata se nanaša na prisotnost različnih primesi, ki negativno vplivajo na lastnosti betona.

Praškasti delci

To so drobni mineralni delci, ki padejo skozi sito z odprtino 0,075 mm. Zaradi drobnosti imajo veliko specifično površino. Zato moramo pri pripravi betonske mešanice dodati večjo količino vode zaradi zagotavljanja ustrezne vgradljivost betona. Mivka pogosto vsebuje glinaste delce, ki zmanjšujejo sposobnost sprijemanja cementne paste z mineralnim agregatom ter tako vplivajo na znižanje trdnosti otrdelega betona.

Organske primesi

Organske primesi so po naravi kisle in zmanjšujejo alkalnost cementne paste, ki je nujna za proces njene hidratizacije. To pa vpliva na vezanje paste in njeno končno trdnost. Primesi izvirajo predvsem iz nečistoč, v katerih so ostanki rastlinja ali raznih maščob, ki onesnažujejo nahajališča gramoza.

Soli

Prisotne so v morskih agregatih. Na njihovih zrnih tvorijo tanke plasti, ki pa se lahko odstranijo s spiranjem s pitno vodo. Sol pospešuje zgodnje faze hidratacije cementa in kar je še bolj pomembno in nevarno, povzroča korozijo armature. Zato je treba strogo kontrolirati vsebnost soli v betonu za armirane in prednapete konstrukcije.

Snovi, ki reagirajo

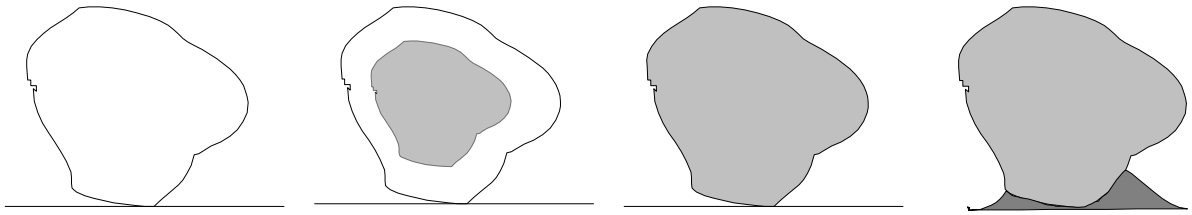
Posamezni minerali, ki se nahajajo v zrnih agregata, močno alkalno reagirajo. V odvisnosti od neurejenosti strukture agregata, njegove poroznosti in velikosti delcev se lahko ob prisotnosti hidroksilnih in alkalno-kovinskih ionov oblikuje alkalno-silikatni gel različne kemijske sestave. Ta povzroči porušitev silikatne

strukture agregata v betonu, temu pa sledi adsorpcija alkalno-kovinskih ionov na površino produktov reakcije. Alkalno-silikatni gel nabrekne, ko pride v stik z vodo, ker zaradi osmoze vsrka veliko količino vode. Nastane hidravlični pritisk, ki povzroča nabrekanje in pokanje agregata, v kateremu se razvija obravnavana reakcija. To povzroči tudi notranje obremenitve v cementnem kamnu in, če gre za razširjen pojav, tudi poškodbe v celotni betonski masi. Značilni minerali, ki se pogosto pojavljajo v agregatu, so opal (amorfna kremenica), silikatno steklo, kalcedon, tridinit, kristobalit in kremen. Slednji je reaktiven le, ko je močno obremenjen ali mikrokristaliziran.

Druga skupina primesi, ki reagirajo, so sulfidi. Možni izvori žvepla so razni minerali (npr. pirit FeS_2). Sulfidi povzročajo površinske madeže podobne rji.

Vlažnost

Agregati večinoma vsebujejo določeno količino vlage. Pri uporabi agregata za pripravo betonske mešanice je pomembno ugotoviti, v koliki meri ta vlaga prispeva k spremembi vgradljivost betona in spremembi vodocementnega količnikja. Glede na količino vlage v agregatu ločimo štiri stanja, ki so shematsko prikazana na sliki 10.



Slika 10: Stopnje količine vlage v agregatu:
(a) osušen v peči, (b) zračno suh, (c) zasičen z vlago in (d) moker

V peči osušimo agregat pri temperaturi 105°C, ki ne vpliva na kemično vezano vodo v mineralih in zato tudi ne vpliva na izgubo teže agregata. V naravi zelo redko dobimo povsem suh agregat. Pri zračno suhem agregatu so vse površine suhe. Tako suh agregat najdemo pri vrhu kupov v deponijah ob stabilnem suhem vremenu. V obeh primerih moramo pri pripravi betona upoštevati potrebo po dodatni vodi. To posebno velja pri agregatih, ki imajo veliko sposobnost vpijanja. V stanju zasičenosti s suho površino je agregat idealen za pripravo betona, ker ne zahteva odstopanj od projektirane količine vode. Najbolj pogosto pa je agregat moker, tako da se del vode nahaja na površini. V takih primerih moramo s preiskavo ugotoviti, kolikšna je količino dodatne vode ter jo upoštevati pri pripravi betona. Drobne frakcije agregata ponavadi vsebujejo večje količine proste vode zaradi večjega števila stičnih površin, med katerimi se sled kapilarnih sil zadržuje voda.

VPRAŠANJA

1. Katere so značilne skupine gradbenega kamna glede na njegovo uporabo in kaj je značilno za vsako izmed skupin?
1. Kaj je kamenina in katere so značilnosti njene sestave?
2. Prikažite osnovne vrste kamenin in procese, s katerimi se te kamenine spreminjajo oziroma prehajajo iz ene v drugo vrsto.
3. Opišite osnovne značilnosti magmatskih kamenin s poudarkom na tiste, ki so pomembne za gradbeno prakso.
4. Opišite osnovne značilnosti sedimentnih kamenin s poudarkom na tiste, ki so pomembne za gradbeno prakso.
5. Opišite osnovne značilnosti metamorfnih kamenin s poudarkom na tiste, ki so pomembne za gradbeno prakso.
6. Navedite osnovne fizikalne lastnosti kamenin in na kratko pojasnite vsako izmed njih.
7. Razložite od česa je odvisna zmrzlinska odpornost kamna in kako jo določamo.
8. Navedite osnovne mehanske lastnosti kamenin in na kratko pojasnite vsako izmed njih.
9. Kako se določata odpornost na obrabo in odpornost na udarce ter trdnost robov kamna?
10. Primerjajte značilnosti granitov in peščenjakov glede na njihovo uporabo v gradbeništvu.
11. Navedite vrste in lastnosti mineralnih voln ter opišite proizvodnjo.
12. Kaj je to mineralni agregat in kakšna je njegova vloga v betonu?
13. Na katere lastnosti betona lahko vplivamo z ustrezno izbiro in pravilno uporabo agregata?
14. Pojasnite pojem maksimalnega zrna agregata.
15. Kakšen pomen imajo oblika zrn agregata, površinska tekstura agregata in njegova trdnost?
16. Kaj je to granulometrijska sestava agregata? Pojasnite pojme, ki jo opredeljujejo.
17. S pomočjo standardiziranih diagramov granulometrijske sestave agregata pojasnite, v katerih območjih morajo biti granulometrijske krivulje agregatov, s katerimi želimo sestaviti beton ustrezne kakovosti.

18. Kaj vpliva na kakovost agregata za pripravo betona. Pojasnite negativne vplive posameznih primesi.
19. Pojasnite, kako vpliva stopnja vlažnosti agregata na pripravo betonske mešanice

4

GRADBENA KERAMIKA IN STEKLO

GRADBENA KERAMIKA

Izdelava gradbene keramike

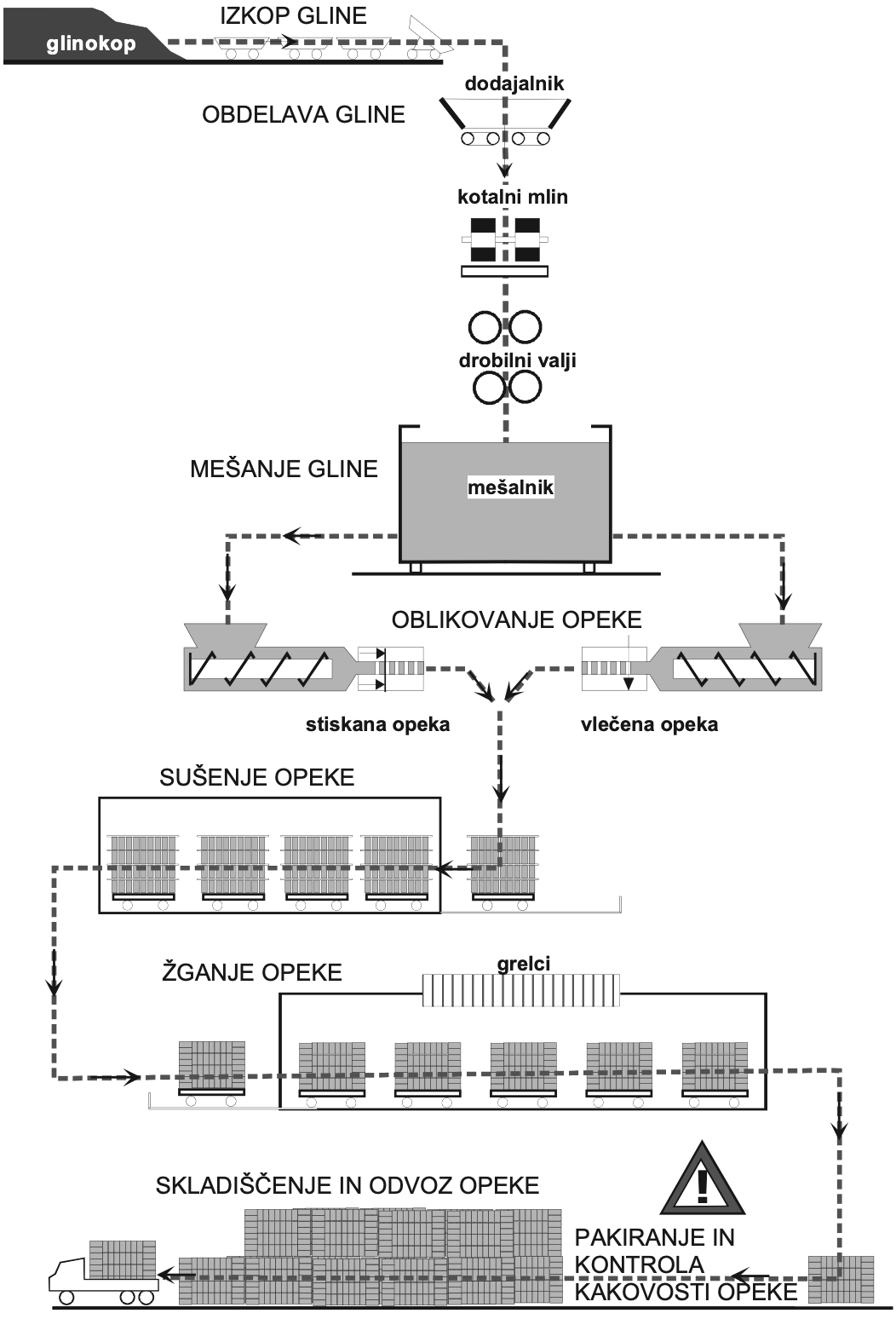
Surovinska osnova

Najstarejša umetna gradiva so bila izdelana iz keramike. Ime so dobila po starogrškem izrazu *keramos*, ki pomeni *lončarska glina*. Stopnjo razvitosti starih civilizacij je opredeljevala tudi stopnja razvitosti veščin za izdelovanje keramik. Surovinska osnova vsebuje dva najbolj razširjena elementa v litosferi - kisik in silicij, ki v obliki kremena (SiO_2) predstavljata osnovo surovine za izdelavo keramike, ki se imenuje glina. Ta je produkt razpadanja silikatnih kamnin. Gline v primarnih nahajališčih vsebujejo kaolin, kremen in glinenec, na sekundarnih pa še veliko drugih primesi, ki so posledica sedimentacije. Osnovna lastnost gline je njena plastičnost, ko vsebuje vodo. Plastičnost je posledica plastovitosti minerala gline in majhnosti njenih delcev (pod 10 μm), med katerimi se nahajajo tudi minerali, ki vplivajo na lastnosti gline. Gline iz sekundarnih nahajališč so bolj plastične zato, ker so njeni delci manjši.

Osnovne sestavine gline so kaolin ($Al_2(OH)_4Si_2O_5$), kremen (SiO_2) in glinenec (albit in ortoklaz). Slednji vpliva na znižanje tališča gline, kar je zelo pomembno za tehnologijo proizvodnje keramike. V keramični industriji uporabljajo različne vrste glin, ki imajo ime po značilni komponenti. Ta vpliva na posamezne lastnosti, ki jih je potrebno upoštevati pri uporabi gline. Kaolinska glina se uporablja za izdelavo ognjestalnih keramik. Montmorilonitna glina nabreka v vlagi in je občutljiva pri sušenju. Redke so vlaknaste gline, so sestavljene iz bazičnih eruptivov. Ilitne gline (vsebujejo ilit, ki je nastal iz sljude) so manj občutljive pri sušenju in jih zato radi uporabljajo v opekarstvu. Keramična masa, ki jo običajno uporabljajo za izdelavo gradbene keramike, vsebuje (masna razmerja) približno 10-25% kaolina, 55-65% kremena in 25% glinenca.

Glina se oblikuje v tekočem, plastičnem, polplastičnem, suhem ali praškastem stanju. Izdelki se sušijo ali pečejo na različnih temperaturah in s tem dobijo določene mehanske lastnosti. Žgani keramični izdelki so produkti faznih sprememb nekovinskih materialov na visokih temperaturah (sintranje). V naravi obstajajo podobni materiali - metamorfne kamnine, ki so nastale iz drugih kamnin pod delovanjem visokih pritiskov in temperatur. Keramični izdelki, ki jih najbolj pogosto uporabljamo v graditeljstvu, so: groba keramika (opeke, strešniki, drenažne in tehnične cevi, tehnična posoda), fina keramika (glazirane in neglazirane ploščice, sanitarna keramika, porcelan, elektroporcelan,

ognjevarna posoda) in steklo. V skupino naštetih materialov sodijo tudi izdelki iz azbesta, ki pa se zaradi njegove škodljivosti povsem opuščajo.



Slika 11: Prikaz izdelave gradbene keramike

Izdelava keramike

Tehnološki postopki za izdelavo keramičnih izdelkov so:

- stiskanje (suho, polvlažno, vlažno),
- vlivanje (na povišani temperaturi) in
- struženje.

Glineno maso pripravijo s suhim in mokrim mletjem, ki potekata v natančno določenem zaporedju. Masa se večkrat preseje in filtrira do primerne finosti glede na zahteve priprave posameznih izdelkov. Iz mase morajo iztisniti zrak, kar se dosega z uporabo hidravličnih in trenjskih preš pod visokim pritiskom (od 25 do 40 MPa).

Struženje (lončarsko kolo) je najstarejši postopek za izdelavo keramičnih izdelkov. Izvaja se ročno ali strojno v več zaporednih fazah. Osnovni pogoji so zadostna vlažnost okolja in orodja ter enakomerna debelina sten izdelka.

Pečenje in glaziranje sledi sušenju izdelkov pri temperaturi 65°C. Keramične izdelke pečejo na temperaturi približno 1000°C in nato glazirajo s potapljanjem, prelivanjem ali brizganjem. Glazuro pečejo na temperaturi od približno 1100°C (posode) do 1410°C (trdi porcelan). V tunelskih pečeh izdelki potujejo in prehajajo iz delov z nižjo v dele z višjo temperaturo. Spreminjanje pogojev pečenja (v posameznih postopkih tudi tlaka in drugih parametrov) je odvisen od želenih lastnosti keramike. Režim pečenja obsega celoten proces, v katerem se izdelki najprej ogrevajo v protitočni smeri plinov, ki izhajajo skozi vhod v peč. Prednost tunelskih peči so zvezne spremembe temperature, ki ne povzročajo termalnih šokov, kot je to možen pojav pri starejših komornih (krožnih) pečeh. Te se po vsakem procesu pečenja hladijo.

Vrste gradbene keramike

Zidaki in modularni bloki

Izdelujejo jih iz peščenih glin z nizkim tališčem ali iz laporastih glin, ki ne vsebujejo škodljivih primesi (kosi kamna, groba apnena zrna, gramoz, sadra, organske snovi). Velikost zrnc je od 2 do 20 μm (finejša zrnavost za tankostenske izdelke). Karbonati izboljšujejo kakovost keramične mase, če so enakomerno razporejeni in v obliki finih zrnc. Znižujejo temperaturo sintranja (delujejo kot topila). Večje granule apnenca morajo zmleti, ker lahko škodljivo delujejo v končnih izdelkih. Apnenec ($CaCO_3$) se med pečenjem pretvori v žgano apno (CaO), ki hidratizira pod vplivom vode (v strešniku, npr.). Tako nastalo gašeno apno ($Ca(OH)_2$) nabreka in povzroča razpoke in krušenje keramičnega izdelka. Zato je ena od pomembnih faz priprave mase za izdelavo opeke in strešnikov drobljenje mlete gline med valji z razmikom 3 mm, 1 mm in celo 0,8 mm. Opeka in strešniki se pečejo pri temperaturah 950 do 1000°C.

Vrste opek in njihova kakovost je opredeljena s standardi. Izmere so izbrane tako, da ustrezajo modularnim meram ob upoštevanju debeline malte 10 mm. Po definiciji je opeka izdelek, katerega lahko enostavno prestavljamo z eno roko. V Sloveniji lahko srečamo nekoliko formatov polne opeke; od starega rimskega formata, do starega avstrijskega formata in novega standardnega formata (normalni format). Slednji ima izmere v razmerju dolžina:širina:višina približno 4:2:1, torej 250:120:65 mm. Večji opečni zidaki se imenujejo bloki in so bolj ali manj votlikavi. Opeke sodijo med zelo trajna in odporna gradiva, toliko bolj če so narejene iz kvalitetne gline in ustrezno žgane. Pri visokih

stopnjah sintranja ima gradbena keramika steklasto strukturo, ki je še posebej trajna in odporna.

Navadni opečni zidaki so polna opeka, polna fasadna opeka, votla fasadna opeka (z več kot 15% votlin), opečni bloki, votle obložne plošče (porolit), radialne opeke za dimnike in votla polnila za stropove. Posebne vrste zidakov se odlikujejo po nekaterih značilnostih, ki določajo področja njihove uporabe.

Zidaki z velikim številom zaprtih por imajo izredno dobre toplotno izolativne lastnosti. Pore se ustvarijo tako, da se keramični masi doda žaganje, premogov prah ali polimerna zrna, ki v procesu žganja zgorijo in tako ostanejo pore v keramiki.

Klinker opeka ima visoko trdoto in obrabno odpornost (dobljena s postopkom sintranja pri 1200°C) ter se zato uporablja za oblaganje obremenjenih površin. V zahodni Evropi se veliko uporablja za pločnike in vozišča v mestih, za oblaganje mostnih opornikov, oblaganje fasad. Klinker zelo malo vpija vodo (do 6%) in je zato tudi zmrzlinsko odporen.

Šamotna opeka je ognjeodporna (do 1600°C). Narejena je iz zmesi ognjeodporne gline (manjši del) in šamotne moke. Uporablja se za obloge kurišč in spodnje dele dimničnih tuljav (magnezitna, dolomitna, boksitna opeka, silika bloki).

Kislinsko odporne opeke se uporabljajo v agresivnih okoljih in so odporne tako na močne kisline (žveplena, solna) kot na luge.

Apneno-silikatni zidaki so narejeni iz kremenčevega peska in gašenega apna (10%). Oblikujejo se s stiskanjem v ustrezne kalupe. V avtoklavu se pod visokim pritiskom (10 barov, 170°C) kemično vežeta $Ca(OH)_2$ in SiO_2. Tako dobimo zidake visokih trdnosti (10 do 40 MPa) in značilne bele barve.

Strešniki

Najbolj običajna in tradicionalna opečna strešnika pri nas sta bobrovec v notranjosti Slovenije in slemenjak (korec) na Primorskem. To sta tudi edini vrsti opečnih strešnikov, ki se danes proizvajata v Sloveniji. Gladek slemenjak se uporablja tako za pokrivanje strešnih ploskev kot za pokrivanje slemen, slemenjak z utori pa se uporablja predvsem za pokrivanje slemen. Pogost opečni strešnik je tudi zareznik, ki je lahko izdelan po postopku vlečenja ali stiskanja.

Vrste zidakov po Eurocode 6

Evropski predstandard za zidane konstrukcije Eurocode 6 razvršča zidake v šest skupin glede na vrsto materiala iz katerega so narejeni. Pri tem se sklicuje na skupino evropskih predstandardov prEN 771. V nadaljevanju so podane standardizirane vrste zidakov.

1. Zidaki iz žgane gline, katerih trajnost se dosega z žganjem pri visokih temperaturah. Njihova gostota se lahko zmanjšuje z različnimi dodatki.
2. Apneno-silikatni zidaki.
3. Betonski zidaki iz agregata običajne gostote, ki se izdelajo iz agregata ustrezne sestave, cementa in dodatkov s postopki vlivanja ali stiskanja.

4. Betonski zidaki iz lahkega agregata (ekspandirana glina, ekspandirana žlindra), cementa in dodatkov, ki se izdelajo s postopki vlivanja ali stiskanja.
5. Avtoklavirani aerirani betonski bloki, ki se izdelujejo iz mešanice finega silicijevega peska, cementa in ustreznega aeratorja ter negujejo v avtoklavu.
6. Zidni bloki izdelani iz obdelane ali delno obdelane kamnine.

Glede na stopnjo kontrole kakovosti se zidaki delijo v I in II kategorijo. Zidaki I kategorije so tisti, ki se proizvajajo ob stalni kontroli kakovosti. Ostali zidaki sodijo v II kategorijo. Med njimi so tudi kamniti bloki.

Zaradi različnih enačb in številčnih vrednosti koeficientov za določanje karakteristične tlačne trdnosti neojačanih zidov, so v Eurocodu 6 zidaki razvrščeni v štiri skupine: skupino 1, 2a, 2b in 3. V sledeči preglednici so prikazane značilnosti posameznih skupin zidakov, ki so pogojene z razporedom in količino lukenj v zidakih.

Preglednica 10: Značilnosti posameznih skupin zidakov po Eurocode 6

	Skupine zidakov			
	1	**2a**	**2b**	**3**
Volumen lukenj (% bruto volumna)	< 25	25 - 45 za glinene zidake in 25 - 50 za betonske zidake	45 - 55 za glinene zidake in 50 - 60 za betonske zidake	< 70
Volumen poljubne luknje (% bruto volumna)	< 12,5	<12,5 za glinene zidake <25 za betonske zidake	<12,5 za glinene zidake <25 za betonske zidake	Omejen s površino (glej spodaj)
Površina poljubne luknje	Omejen z volumnom (glej zgorjaj)	Omejen z volumnom (glej zgorjaj)	Omejen z volumnom (glej zgorjaj)	<28 cm razen za zidake z 1 luknjo, ko je le-ta <180cm^2
Kombinirana debelina (% skupne širine)	> 37,5	> 30	> 20	Ni posebnih zahtev

Luknje lahko potekajo ali v navpični ali v vodoravni smeri skozi zidake ali pa ob strani kot utori. Če izkušnje in eksperimenti dokazujejo, da varnost zida ni zmanjšana pod sprejemljivi nivo, se lahko volumen lukenj poveča nad 55% za glinene zidake in nad 60% za betonske zidake. Pod pojmom kombinirane debeline se razume vsota debelin reber in sten, merjeno vodoravno skozi zidak in pravokotno na zunanjo površino zidu.

Lastnosti zidakov in strešnikov

Opečne zidake in strešnike odlikujejo lastnosti, ki jih uvrščajo v posebno kategorijo gradiv po njihovi estetski vrednosti, nosilnosti in trajnosti. Lastnosti lahko razdelimo v skupini fizikalnih in inženirskih lastnosti, pomembne pa so še posebne zahteve in posebne lastnosti, ki so značilne samo za strešnike glede na njihovo vlogo.

Značilne **fizikalne lastnosti** gradbene keramike so: barva, tekstura, oblika, velikost in dimenzijska obstojnost.

Med **inženirske lastnosti**, ki opredeljujejo uporabnost zidakov in strešnikov sodijo: absorpcija, poroznost, vsrkavanje vlage, trdnost, modul elastičnosti, toplotna prevodnost, akustične lastnosti, požarna odpornost in še posebej za strešnike zmrzlinska odpornost, vodoneprepustnost in odpornost na udarce. Posebne zahteve, ki jim morajo zadostiti kakovostni zidaki in strešniki, so omejena količina večjih apnenih zrnc in omejena količina soli.

Odprta poroznost določa kapilarne lastnosti keramike. Večina opek absorbira vodo s kapilarnim dvigom. Fino porozna suha opeka zelo močno vsrkava vodo, četudi je kapacitivnost por majhna. To lastnost je treba upoštevati pri zidanju. Če je opeka presuha lahko posrka preveč vode iz malte za zidanje (zažgana malta) in ta ne more vezati zaradi pomanjkanja vode. Če je opeka premokra, se vezanje malte upočasni, zid se lahko posede zaradi lastne teže, plast vode med malto in zidakom pa onemogoči dobro sprijemnost med malto in zidakom, kar vpliva predvsem na strižno nosilnost zidov. Zelo enostaven poskus vlažnosti lahko naredimo s kovancem, ki ga obrišemo z voščenko. Znotraj kroga nakapamo 20 kapljic vode. Če opeka posrka vodo prej kot v 90 sekundah je opeka presuha in jo je treba pred zidanjem navlažiti (kratkotrajno pomakanje v vodo).

Gostota gradbene keramike je odvisna od vrste gline in se giblje med 2250 kg/m^3 in 2800 kg/m^3. Dejanska gostota se določi iz izraza, ki upošteva poroznost (n):

$$\rho = \rho_s (1-n) \qquad (4\text{-}1)$$

Poroznost je zelo različna tudi pri opeki enake vrste in zato tudi teža posameznih zidakov zelo varira (pri navadni polni opek med 1,8 in 3,8 kg).

Trdnost keramike je zelo odvisna od njene poroznosti, vrste gline in načina žganja. Keramika ima krhek lom, ki je odvisen od razpok nastalih pri sušenju in različnih vključkov (notranji zarezni učinki). Tlačna trdnost običajnih zidakov se giblje v mejah med 5 in 20 MPa, moduli elastičnosti pa v mejah od 5000 do 30000 MPa. Izjema so visokotrdne opeke, ki dosegajo tlačne trdnosti tudi do 70 MPa.

Eflorescenca (cvetenje) je izločanje v vodi topnih soli, ki se naberejo na površini opečnega izdelka zaradi hlapenja vode. Soli so lahko prisotne v glini, lahko pa v opeko pridejo iz okolja (morje, Benetke). V opekah se običajno nahaja od 0,1 do 1% soli, zgornja dopustna meja pa je 5%. Eflorescenca običajno ni škodljiva in izgine v eni do dveh sezonah. Težave nastanejo, če se soli nabirajo pod ometom in povzročajo njegovo odpadanje.

Apnena zrna so bolj nevarna, saj pri gašenju CaO pride do nabrekanja in krušenja opeke.

Raztezek pri vlaženju nastane pri sveže pečeni opeki in se razmeroma hitro stabilizira. Zato mora opeka po pečenju odležati pred uporabo.

Zmrzal povzroča mehansko popadanje opeke zaradi njenega luščenja. Do tega pride zaradi nabrekanja ledu v porah in širjenja razpok in odprtih por.

Koeficient toplotnega raztezka znaša α_T = 5 do 7 10^{-6} K^{-1}.

Prevodnost opeke znaša od 1,2 $Wm^{-1}K^{-1}$ (8% poroznost, 2400 kg/m^3) do 0,4 $Wm^{-1}K^{-1}$. Prevodnost vlažnih opek zraste zelo hitro. Če opeka vsrka 3% vode glede na svojo prostornino naraste prevodnost za 60%, zaradi vsrka 15% vode pa za približno 135%.

Kemična odpornost običajne keramike je zadovoljiva, nevarne so le ekstremne razmere.

Požarna odpornost keramike je razmeroma visoka, termalni šoki pa lahko povzročijo resne lokalne poškodbe.

STEKLO

Steklo ima lastnosti trdne snovi, ki se v daljšem časovnem obdobju obnaša kot tekočina. To dokazujejo odebelitve starih steklenih okenskih plošč pri njihovem dnu. Visoka viskoznost staljenega stekla med njegovim ohlajevanjem upočasnuje nastajanje kristalov, kar povzroča neke vrste "zamrznjenje" stekla v tekočem stanju. Značilne lastnosti stekla so pogojene z njegovo posebno nekristalasto zgradbo.

Zgodovinski razvoj

Steklo je eno najstarejših gradiv, ki jih je naredil človek. Je tudi material, ki ga najdemo v naravi v različnih oblikah, med katerimi je zelo pogost obsidijan. Ta nastaja v vulkanih pri visokih temperaturah in je običajno črne barve. V odvisnosti od primesi pa je lahko tudi rdeč, rjav ali zelen. Uporabljali so ga za izdelavo orožij, orodij in nakita. Po mnenju zgodovinarjev so steklo začeli proizvajati približno 5000 let pred našim štetjem na območju današnje Sirije. V območju Mezopotamije so našli posode in steklenice iz obdobja 4000 let p.n.š. Najdbe stekla se ujemajo z najdbami ostale keramike in nakita zlasti tam, kjer so poznali postopke glaziranja. V Babilonu so okoli leta 200 p.n.š. iznašli postopek pihanja, kar je bistveno poenostavilo proizvodnjo steklenih izdelkov. Steklarska cev, ki je običajno dolga približno 1,5 m, ima na enem koncu okroglo zabedelitev, ki jo pihalec pomoči v tekoče steklo. S počasnim enakomernim pihanjem skozi ustnik in vrtenjem cevi se na drugem koncu cevi oblikuje votli stekleni balon. Njegova debelina je odvisna od velikosti izdelka. Na ta način se lahko oblikujejo predmeti poljubne simetrične oblike. Z vpihavanjem v kalupe se lahko izdelujejo cele serije enakih izdelkov.

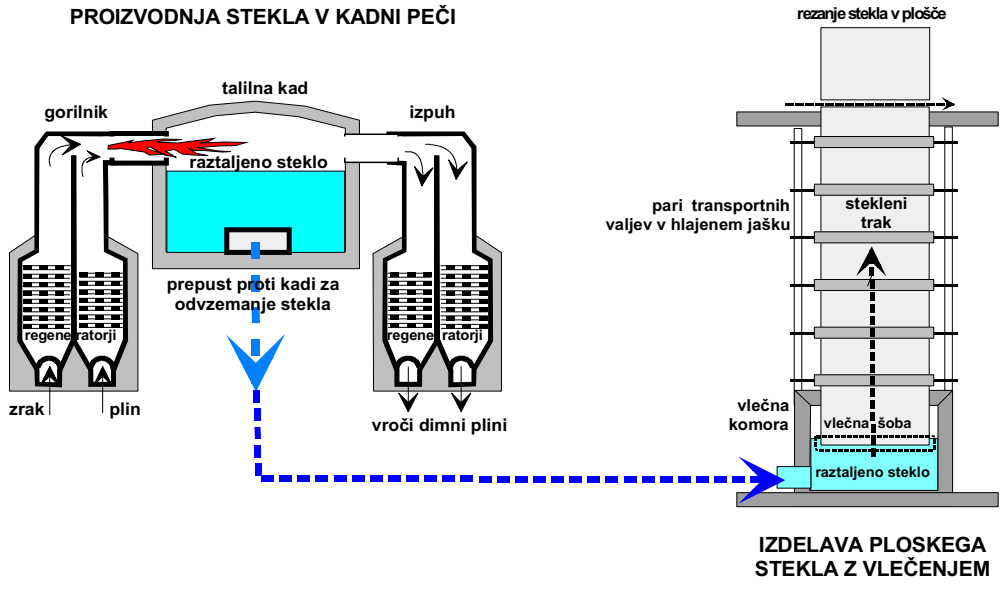
Prvo razmeroma čisto steklo so izdelovali Rimljani. Prve ravne steklene plošče so poskušali narediti s pomočjo kamnitih valjev posutih s peskom, kar je na površini stekla ustvarjalo značilne vzorce. Tovrstno steklo še ni bilo primerno za zasteklitev oken. Po propadu Rimskega cesarstva se je razvoj stekla nadaljeval v Islamskem svetu. Okoli leta 1000 so začeli izdelovati barvano prozorno steklo za cerkve, po katerem so bili znani zlasti Bizantinski mojstri. Pred tem so v Siriji iznašli v 7. stoletju n.š. enostaven in cenen način izdelave okenskih stekel. Na drugo stran napihnjenega steklenega balona so pritaknili palico imenovano *puntil*, odlomili balon od pihalke in ga hitro vrteli okoli puntila. Tako se je ustvarila ploščica v obliki prozornega krožnika, ki je na mestu odstranitve puntila imel ″krono″. Tako oblikovano okensko steklo so imenovali ″kronsko steklo″. Večina okenskih stekel do 19. stoletja je narejenih na

podoben način. Metoda je kasneje doživela izpopolnitev. Namesto kronskega stekla v obliki ˝krožnika˝ so izdelali stekleno cev z dnom, na katerem je bil puntil. Dno so odrezali, plašč pa prerezali po dolgem in izravnali. Tako so istočasno dobili krožno kronsko ploščico in pravokotno ploščico. Obe sta bili uporabni za zasteklitev oken.

Po križarskih vojnah se je umetnost izdelovanja stekla preselila v Benetke. Na izoliranem in dobro zastraženem otoku Murano so razvili proizvodnjo ogledal edinstvene kakovosti. Zato je selitev steklarjev z otoka bila strogo prepovedana z grožnjo smrti. V šestnajstem stoletju so prvi na svetu proizvedli prozorno brezbarvno steklo imenovano *cristallo*. Temu je sledila iznajdba mikroskopa in teleskopa okoli leta 1600, kar je privedlo do neslutenega razvoja znanosti in odkritij. Zato velja, da sodobna proizvodnja stekla izvira iz šestnajstega in sedemnajstega stoletja. Leta 1675 je George Ravenscroft iznašel kristalno steklo, izdelano s pomočjo svinčenega oksida. Ta steklu daje izredno svetlost in mehkobo, ki omogoča lažje oblikovanje in površinsko obdelavo. Leta 1688 so Francozi izpopolnili izdelavo ravnega stekla. Staljeno steklo so zlivali na ravno železno površino in ravnali z valji. Izdelki so imeli grobo, neravno površino, ki so jo naknadno ročno brusili in polirali. Sodobni postopki so podobni, le da obdelavo opravljajo stroji. Libbey-Owens je l. 1905 patentiral postopek neposrednega vlečenja steklenih trakov iz peči in hlajenja z vodno prho. Trakove so ponovno segrevali in ravnali. V Angliji so pri Pilkington Bros razvili flotacijsko metodo izdelave ravnih stekel. Pri tej tehniki se tekoče steklo iz peči zlije na staljen kositer (Sn) ob istočasnem segrevanju obeh ploskev stekla. Ravno steklo se hladi in ob tem dobi značilen lesk.

Proizvodnja in splošne lastnosti stekla

Steklo je superviskozna tekočina, ki vsebuje predvsem kremen in enega ali več kovinskih oksidov v amorfnem oz. nekristalnem stanju. Steklo se običajno mehča pri temperaturi 700°C. Zaradi amorfne zgradbe je steklo značilno prozorno in svetlikavo. Ojači se lahko z vstavljanjem kovinskih mrežic in polimernih folij ter s toplotno in kemično obdelavo. Značilna lastnost stekla je lomni količnik, ki je razmerje sinusov vpadnega in odbojnega kota svetlobe.



Slika 12: Shematski prikaz izdelave ploskega stekla

Osnovna surovina za izdelavo stekla je kremenčev pesek (kremen, SiO_2). Najbolj kakovostna stekla so narejena iz čistega kremena (kvarcno steklo) in predstavljajo izredno stabilen, odporen in trajen material. Surovine za izdelavo običajnega okenskega stekla so kremenčev pesek (SiO_2), apnenec ($CaCO_3$) in sode (Na_2CO_3). Značilna steklena mešanica se sestoji iz 74% kremena, 12% sode, 8% apna in 6% drugih snovi, ki dajejo steklu posebne lastnosti (barvitost, reagiranje na svetlobo in žarčenja, stabilnost itd.). Z dodajanjem različnih kovinskih oksidov se dosega barvitost stekla. Prvotne vrste stekel so izdelovali pri temperturah 1600°C, pri kateri se tali kremen. Tehnologija proizvodnje je napredovala, ko so odkrili, da soda in apno bistveno znižujeta tališče zmesi. Surovine za izdelavo stekla, med katerimi je tudi odpadno steklo, se zdrobljene mešajo v suhem stanju in nato talijo v talilnikih (z vsebnostjo od 100 g do 2 toni) iz žarozdržne keramike do 1600°C, kjer se razplinijo. Talino nato zbistrijo pri 1300-1600°C. Tako se proizvajajo barvna, laboratorijska, optična in kristalna stekla. Pri množični proizvodnji steklenih izdelkov pripravljajo staljeno steklo v kadnih pečeh (vsebnosti do 1200 ton) s kontinuiranim dodajanjem surovin, taljenjem, bistrenjem in odvzemanjem taline.

Posebna lastnost stekla je, da se pri prehodu iz tekočega stanja v trdno stanje ne krči, saj pri prehodu ne nastajajo kristali, ki imajo manjšo prostornino od amorfne snovi. Možen pa je tudi pojav *devitrifikacije* ali delne oziroma polne kristalizacije taline, če se njeno ohlajevanje zadržuje na točki zmrzišča. Devitrifikacija se lahko pospeši z dodajanjem steklenih kristalov, ki so produkt devitrifikacije. Tako se dobi *polikristalinsko* steklo, ki ima večjo trdoto in odpornost na udarce in termalne šoke. Tako steklo se uporablja tudi za posode v gospodinjstvu, ki se jih lahko iz hladilnika da v ogreto pečico.

Po prehodu točke zmrzišča se viskoznost stekla močno poveča, kar ovira pretok atomov skozi material in nastanek kristalov. Steklo se lahko obravnava kot ena velika molekula, kajti prehod svetlobe skozi steklo je neoviran. Različne vrste stekel prepuščajo in odbijajo svetlobo različne valovne dolžine. To lastnost uporabljajo pri toplih gredah, kjer navadno steklo prepušča infrardeče sončne žarke zadržuje pa toplotno sevanje iz notranjosti grede.

Steklo je korozijsko odporno, ker se sestoji samo iz oksidov. Je zelo krhko, zato pri pojavu prve razpoke, porušitev hitro napreduje po celotnem materialu.

Stekla se delijo v sedem glavnih skupin glede na njihovo sestavo in lastnosti. Te so: natrij-kalcijevo, borosilikatno, svinčeno, aluminosilikatno, kremenčevo, čisto kremenčevo in pirokeramično steklo.

Posebne vrste stekel

Postopki proizvodnje stekla temeljijo na njegovi lastnosti enakomernega raztegovanja brez lokalnega nja, kot se to dogaja pri kovinah in polimerih. Zgodnje vrste stekla so bile motne in različnih barv ter zato uporabne predvsem za okrasne izdelke in različne vrste posod. Stekla so v gradbeništvu začeli uporabljati, ko so razvili postopke pridobivanja ravnih stekel. Poleg običajnih prozornih brezbarvnih stekel so zaradi posebnih zahtev (estetične, tehnične) razvili mnoge posebne vrste stekel.

Barvana stekla so začeli proizvajati v srednjem veku in ga uokvirjenega v svinčene trakove vgrajevali v okna palač in cerkva. Barvano steklo se lahko izdeluje tudi kot dvoplastno steklo sestavljeno iz prozornega stekla in nanosa plasti barvnega stekla. Želeno barvo se doseže s pomočjo kovinskih oksidov. Z dodajanjem mangana se dobi škrlatna, s kobaltom plava, z bakrom zelena, s srebrom rumena in z zlatom rdeča obarvanost stekla. Obarvanost stekla pa je odvisna tudi od njegove vrste.

Ornamentna stekla proizvajajo z mehanskim vtiskanjem vzorcev z valjev, s katerimi ravnajo mehko steklo. Posebna vrsta je ˝opalno˝ steklo, ki se izdeluje z vtiskanjem drobnih kristalov v čisto stekleno matriko in daje videz zaledenele površine. Z večanjem količine dodanih kristalov se veča neprozornost stekla. Ornamentiranje stekla se lahko doseže tudi z jedkanjem in s peskanjem. Jedkanje je postopek, pri katerem se s kislinami obdeluje površina stekla tako, da se odstranjujejo deli njegove površinske plasti. S peskanjem se dosegajo podobni učinki.

Ogledala izdelujejo z nanosom tenke kovinske prevleke na eno površino stekla. Originalna beneška ogledala so prekrita z amalgamom ali z zmesjo kositra in živega srebra, ki je strupeno. Danes ogledala izdelujejo s srebrno prevleko, ki jo nabrizgajo ali nanesejo z elektrolitskim postopkom. Pri tem uporabljajo srebrni nitrat. Barvitost ogledal se lahko doseže z uporabo barvanih prozornih stekel in ustreznih kovinskih prevlek. Posebna vrsta ogledal so *enosmerna ogledala*. Ta se izdelujejo s pritrditvijo tanke zrcalne plasti na eno stran steklene plošče. Za osebo v svetlejšem prostoru je tako steklo ogledalo, za osebo v temnejšem prostoru pa prozorno steklo. Podoben učinek se lahko doseže tudi s pritrditvijo tankih (do 20 mm) zrcalastih trakov v medsebojnem razmaku približno 1,5 mm.

Varnostna stekla proizvajajo v različnih izvedbah. Najbolj so znana *žična stekla*, *temperirana stekla* in *laminirana stekla*. V žična stekla so vgrajene tanke kovinske mreže, ki pa ne prispevajo veliko k njegovi nosilnosti. Njihova vloga je predvsem zadržati kose stekla, ko se to razbije. Žična stekla se vse bolj nadomeščajo s temperiranimi ali z lameliranimi stekli. Steklo se običajno razbije zaradi koncentacije napetosti v območjih mikrorazpokanosti, ki je nastala pri ohlajevanju stekla. Pri udarcu se mikrorazpoke hitro povezujejo med sabo in tvorijo večje razpoke, kar pripelje do loma stekla. S postopki temperiranja in z izdelavo večplastnih stekel z vmesnimi lamelami iz drugih materialov se prepreči nagel razvoj in širjenje razpok ob udarcu po steklu.

Temperiranje ali prednapenjanje stekla je postopek, pri katerem se steklo naknadno segreva do mehkega brez izgube predhodne oblike in hladi z zračnimi curki ali z oljem. Zunanja površina stekla se hitro ohladi in zato v njej nastanejo tlačne napetosti. Hlajenje stekla se ustavi pred ohladitvijo po celotni debelini tako, da se notranja plast lahko ohladi počasi. To je *termalno temperiranje*, ki se razlikuje od *kemičnega temperiranja*. Pri slednjemu se žilavost stekla dosega s potapljanjem v kalijev klorid. Kalijevi atomi zamenjajo natrijeve atome na površini stekla. Ker so kalijevi atomi večji od natrijevih so atomi v tako obdelani površini bolj stisnjeni med sabo. Taka stekla so delno odporna na udarce in bolj žilava kot običajna stekla. Problemi nastopijo, če je površina temperiranega stekla lokalno poškodovana ali spraskana. Tu se sproščajo notranje napetosti, kar lahko povzroči razpad stekla na majhne koščke. Zato se stekla mehansko oblikujejo (vrtajo, režejo, brusijo) pred temperiranjem. Do razpada pride takrat, ko so prekoračene tlačne površinske

napetosti. Prednost temperiranega stekla pred navadnim je tudi v tem, da so koščki razbitega temperiranega stekla manjši in manj ostri. Temperirana stekla se največkrat uporabljajo za izdelavo vrat, očal in varnostnih stekel na vozilih.

Lameliranje stekel je sestavljanje plasti steklenih plošč z vmesnimi ojačitvenimi plastmi. Te so najbolj pogosto iz polivinil-butirila. Proizvodnja poteka v ″čistih″ sobah v katerih ni ne prahu ne vlage. Plošče lameliranega stekla se utrjujejo s pomočjo segretih valjev. Lamelirano steklo ima visoko udarno odpornost, saj polimerna plast deluje kot armatura. Običajna lamelirana stekla se uporabljajo za okna vozil. Za krogle neprebojna stekla so sestavljena iz večjega števila plasti stekla in ojačitve.

Stekla, ki reagirajo na žarčenje spremijo barvo ali prosojnost, ko so izpostavljena svetlobi ali žarčenju.

Fotokromatska stekla potemnijo, ko so izpostavljena ultravioletnemu žarčenju (sončna svetloba, toplota) in posvetlijo, ko le-ta preneha. Značilna sestava takih stekel je: 60% kremena, 20% boraksa, 10% sode, 10% aluminijevega oksida, 0,9% jodidovih ionov, 0,6% srebra in 0,3% kloridovih ionov. Ko so izpostavljena svetlobi, srebrni ioni v steklu preidejo v kovinsko stanje. Zato steklo potemni in odbija več svetlobe. Ko svetloba izgine, srebro ponovno preide v srebrne ione in steklo se zbistri. Tovrstna stekla se uporabljajo predvsem za izdelavo očal.

Fotoobčutljiva stekla prehajajo iz prozornega v neprozorno stanje, ko so izpostavljena ultravioletnim žarkom ali toploti. Sprememba je nepovratna. Delujejo kot fotografski film, saj se vzorci v steklu ustvarijo, ko je le-to izpostavljeno žarčenju. Značilna sestava je: 72% kremena, 17% sode, 11% apna, 0,04% selena in 0,02% zlata. Namesto slednjega se lahko uporabita tudi baker in cerij. Ko se določen vzorec vtisne v fotoobčutljivo steklo, se lahko s kemičnim jedkanjem vtisne v površino. Ta postopek se uporablja pri izdelavi mikroskopsko drobnih elektronskih vezij na stekleni osnovi.

Polikromatska stekla so svetlobno občutljiva na celoten barvni spekter. Razvili so jih leta 1978 v laboratorijih podjetja Corning Glas Works. Zaradi njihovih posebnih značilnosti se uporabljajo za shranjevanje podatkov, okrasne predmete, okenska stekla, prosojne plošče in posode. Obarvanost stekel je stalna.

Uporabnost stekel

Poleg običajnih načinov uporabe stekel, se le-ta lahko uporabljajo tudi za tehnološko bolj zahtevne aplikacije.

Steklena vlakna se uporabljajo za izdelavo:

- toplotno in zvočno izolativnih materialov,
- visokonosilnih vrvi in kablov, ki nadomeščajo kovinske zaradi manjše teže in večje odpornosti na agresivna okolja,
- filtrov v polimernih matricah,
- ojačitev polimernih matric,
- izdelavo optičnih komunikacijskih kablov.

Posebne vrste stekel se uporabljajo tudi za:

- izdelavo zaščitnih zaslonov pred viri žarčenj (termalno izolativna stekla),
- oblaganje posod za posebne namene (agresivne tekočine),
- izvedbo velikih površin izpostavljenih obremenitvam (zasteklitve zgradb), kjer se zahteva visoka nosilnost (veter, potres), odpornost na okolje, trajnost in delna prepustnost svetlobe, toplote in ostalega žarčenja.

Uporaba stekla v gradbeništvu narašča, ker le-to nadomešča mnoge tradicionalne materiale in omogoča arhitektom snovanje raznolikih oblik.

Splošne značilnosti stekel, ki pridejo v poštev pri snovanju sodobnih konstrukcij in izdelkov so:

- gostota običajnih stekel znaša 2500 kg/m^3,
- stekla imajo trdoto od 6 do 7 po Mohsovi lestvici (ali 400-600 kg/mm^2),
- tlačna trdnost stekla znaša okoli 950 MPa,
- natezna trdnost stekel znaša od 30 do 70 MPa (palica premera 10 mm) oziroma do 25 000 MPa (vlakna premera 1 μm),
- modul elastičnosti amorfnega stekla znaša približno 7 10^4 MPa,
- ohlajeno steklo je izredno krhko,
- stekla so dobri električni izolatorji,
- koeficient toplotnega raztezka stekla je v primerjavi z koeficienti kovin in polimerov zelo nizek (α_t = 0,5 do 9 .10^{-6} °C)
- toplotna prevodnost je nizka (9 10^{-3} cal/s/cm^2/°C/cm) v primerjavi s kovinami (jeklo 1 10^{-1} cal/s/cm^2/°C/cm),
- izolacije narejene iz steklenih vlaken se lahko uporabljajo do temperature 480°C,
- stekla so odporna na večino kislin, topil in agresivnih kemikalij, vendar pa voda v daljšem časovnem obdobju vpliva na njihovo površino, kar velja tudi za določene luge in
- imajo odlične optične lastnosti.

OGNJEVZDRŽNE KERAMIKE

Ognjevzdržni materiali so odporni na visoke temperature in se zato uporabljajo za oblaganje kurišč ter za izdelavo talilnih posod, toplotnih zaslonov in zaščitnih oblog. To so keramični izdelki, ki so izdelani iz ognjeodporne gline, šamotne moke, aluminijevega oksida in kremena. Ognjevzdržne keramike morajo prenašati visoke napetosti pri visokih temperaturah.

Izdelujejo jih iz oksidnih surovin v grobi zrnasti obliki imenovanih *grog*, ki so povezane z drobnejšimi ognjevzdržnimi zrni. Ta se talijo in povezujejo groba zrna v celoto. Tako dobljena keramika je visoko porozna (20 do 25% por), kar povečuje njeno toplotno izolativnost. Sestavljena je iz oksidov: aluminijevih (Al_2O_3), kromovih (Cr_2O_3), železovih (Fe_2O_3), magnezijevega (MgO) in silicijevega (SiO_2). Razvrščajo se v tri skupine: kisle, bazične in nevtralne.

Kisle keramike vsebujejo tudi do 80% aluminijevih oksidov. Šamotna opeka pred pečenjem vsebuje kaolinit ($Al_2O_3\ SiO_2.\ 2H_2O$) v grobem razmerju 40% : 46% : 14%, ki po pečenju preide v zmes oksidov Al_2O_3 in SiO_2 v razmerju 46%:54%. Taka opeka nima visoke trdnosti ima pa lastnost akumuliranja toplote in je zato namenjena oblaganju kurišč in izdelavi peči. Z večanjem količine Al_2O_3 (dodajanje kaolina) nad 48% (do 80%) se povečuje ognjeodpornost in trdnost ter ostale mehanske lastnosti keramike. Kremenčeva keramika ima visoko trdnost tudi pri visokih temperaturah. Sestoji v glavnem iz SiO_2 (95-97%). Vsebujejo tudi manjšo količino drobnejših oksidnih materialov, ki po taljenju povezujejo večja zrna.

Bazične keramike so večinoma izdelane iz magnezijevega oksida (83% - 93%). Vsebujejo tudi od 2 do 7% Fe_2O_3, dolomit (MgO in CaO) in olivin (Mg_2SiO_4). Bazične keramike so dražje od kislih in se v glavnem uporabljajo v jeklarski industriji in ostalih primerih, kjer je posebej pomembna kompatibilnost materialov.

Nevtralne keramike vsebujejo od 30% do 50% kromovega oksida in do 40% magnezijevega oksida. Uporabljajo se za ločevanje kislih in bazičnih keramik tako, da le-te ne delujejo ena na drugo.

Ostali materiali, ki jih uvrščajo med ognjevzdržne, vsebujejo cirkonij (ZrO_2), cirkon ($ZrO_2.\ SiO_2$) in druge materiale kot so nitridi, karbidi, boridi in grafit. Razni nitridi in cementirani karbidi se uporabljajo za konice orodij za obdelavo materialov z velikimi hitrostmi.

Posebna skupina ognjevzdržnih materialov so kermeti. Sestojijo se iz keramičnih delcev in kovinskega prahu, ki so povezani. Aluminijev oksid in krom sta značilni sestojini. Bolj kompleksne sestojine iz kromovega, železo-

cirkonijevega, titanovega, tungstenovega karbida in uranovega dioksida so osnova tako zahtevni keramiki, kot so obložne plošče vesoljskega plovila (Space shuttle), silicij-aluminijevih vlaknastih izolacij, superprovodnih magnetov in rezalnih orodij.

VPRAŠANJA

1. Pojasnite, katere so osnovne surovine za izdelavo gradbene keramike in kako njihove lastnosti vplivajo na tehnologijo izdelave keramičnih izdelkov.

1. Pojasnite podobnost in razliko v nastajanju naravnih in umetnih gradbenih keramik.
2. Naštejte in na kratko opišite glavne postopke za izdelavo keramičnih izdelkov.
3. Opišite značilnosti surovin in postopka za izdelavo opečnih zidakov.
4. Naštejte vrste opečnih zidakov in opišite njihove osnovne značilnosti.
5. Katere vrste zidakov obravnava standard Eurocode 6?
6. Kako Eurocode 6 medsebojno razlikuje zidake po njihovi kakovosti in obliki?
7. Pojasnite, katere lastnosti opečnih zidakov in strešnikov so pomembne za gradbeno prakso?
8. Pojasnite, zakaj in kako odprta poroznost opeke vpliva na postopek zidanja zidov?
9. Pojasnite vpliv eflorescence in apnenih zrn na kakovost in trajnost opeke.
10. Katere so osnovne surovine za izdelavo stekla in na katere njegove lastnosti vplivajo?
11. Pri katerih vrstah stekla se v amorfnem okolju tvorijo kristali in kako to vpliva na lastnosti takega stekla?
12. Naštejte in pojasnite osnovne značilnosti posebnih vrst stekel.
13. Pojasnite oba postopka temperiranja in postopek laminiranja stekel.
14. Naštejte vrste stekel, ki reagirajo na žarčenja in opišite njihove lastnosti.
15. Naštejte možnosti uporabe steklenih vlaken in posebnih vrst stekel.
16. Navedite tiste splošne značilnosti stekel, ki pridejo v poštev pri snovanju sodobnih konstrukcij in izdelkov.
17. Kaj so to ognjevzdržne keramike in iz katerih surovin jih izdelujejo?

5

MINERALNA VEZIVA

Mineralna veziva so snovi, ki se po mešanju z vodo spremenijo v kašo ali plastično zmes. Ta se po procesu vezanja strdi na zraku ali v vodi in spremeni v čvrsto konstrukcijsko ali izolacijsko gradivo. To gradivo sodi med keramične materiale, ki povezujejo druge keramične materiale in s tem tvorijo konstrukcijske elemente. Mineralna veziva se delijo v skupine:

- zračna veziva, ki vežejo samo na zraku (gašeno apno, mavec, glina),
- hidravlična veziva, ki vežejo na zraku in v vodi (hidravlično apno, cement),
- ognjeodporna veziva (glina) in
- avtoklavna veziva.

V gradbeništvu poleg mineralnih veziv uporabljajo tudi veziva, ki so organskega porekla. To so bitumenska veziva (naravni in umetni bitumni) in plastomerna veziva (termostabilne reaktivne smole).

ZRAČNA VEZIVA

Mavec (gips)

Mavec je ime veziva, katerega osnova je mineral sadra - kalcijeva sol žveplene kisline, kalcijev sulfat ($CaSO_4$). V naravi obstajajo modifikacije z enako kemično sestavo in različno količino molekularno vezane kristalne vode:

- monoklinski dihidrat CaSO4+2H2O z gostoto približno 2300 kg/m3 in
- rombski anhidrit CaSO4 z gostoto približno 2900 kg/m3.

V naravi se sadra nahaja skupno s skladi kamene soli, ker sta obe nastali z izparevanjem morske vode. Sadro lomijo v kamnolomih, kjer se nahaja v različnih stopnjah čistosti. Včasih se dobi v velikih ploščatih prozornih kristalih (“Marijino steklo”). Alabaster je druga oblika naravne sadre in je čist, drobnozrnast in nekoliko prozoren (nahajališče Alabastrom, Zgornji Egipt). V naravi se poleg čiste sadre bele barve nahajajo tudi sadre s primesmi, ki jim dajejo značilno barvo (železo - rdeča, glina - rumena, apnenec - siva). Najbližja nahajališča sadre so v sosednji Hrvaški.

Žganje sadre

Sadro drobijo (30 do 60 mm zrna) in jo očiščeno žgejo in meljejo, ter s tem proizvedejo mavec (gips). Osnovna surovina - sadra je dihidrat, mehka (trdota po Mohsu je 2), težko topljiva v vodi (2 g na 1 l čiste vode). Žge se v nagnjenih vrtljivih bobnih (dolžine okoli 10 m in premera okoli 1,5 m). Pri tem pride do kemične reakcije pri kateri dihidrat preide v semihidrat:

$$CaSO_4\ 2H_2O \rightarrow CaSO_4\ 1/2\ H_2O + 3/2\ H_2O \qquad (5\text{-}1)$$

Vrsta mavca, ki ga dobijo z žganjem sadre je odvisna od temperature žganja in njegovega trajanja. V preglednici so prikazane vrste in sestave mavca, ki ga dobimo pri različnih režimih žganja.

Preglednica 11: Vrste mavca

Ime mavca	Sestava	Temperatura žganja sadre
žgani mavec	semihidrat ($CaSO_4\ 1/2\ H_2O$) in anhidrit ($CaSO_4$)	120 - 180°C 24 ur, ali 150°C 36 ur, ali 180°C 24 ur in 220°C 2 uri
anhidritni mavec	$CaSO_4$ s kristalno vodo	nad 180°C (190°C do 200°C)
mrtvo žgani mavec	$CaSO_4$ brez kristalne vode	400°C do 800°C
estrih mavec	$2CaSO_4 \rightarrow 2CaO + 2SO_2 + O_2$ mešanica $CaSO_4$, CaO in SO_2	800°C do 1000°C
dekomponirana sadra	ves $CaSO_4$ preide v CaO in SO_2	nad 1400°C

Žgani mavec je v mleti obliki uporabno vezivo, ki ga je glede na namen treba presejati do določene finosti. Zmešan z vodo jo prevzame in ponovno preide v dihidrat. Pri tem prevzame več vode, kot jo je izgubil med žganjem. Nevezani del vode ostane med kristali in počasi izhlapi. **Anhidritni mavec** slabše veže kot žgani mavec in bolj ko ga segrevamo, slabša je sposobnost strjevanja. **Mrtvo žgani mavec** nima sposobnosti vezanja, in se pri žganju zelo krči, ker izgublja vezano kristalno vodo. **Estrih mavec** je steklasta in porozna talina. Počasi veže in je zelo trden ter obstojen ne glede na vremenske razmere (Keopsova piramida stara 4000 let je zgrajena s tem vezivom). Njegova trdnost je 3 do 4 krat večja kot trdnost žganega mavca.

Strjevanje mavca

Pri žganju sadre se njena molekularna masa razdeli na molekularni masi produktov:

$$CaSO_4\ 2H_2O \rightarrow CaSO_4\ 1/2\ H_2O + 3/2\ H_2O \qquad (5\text{-}2)$$

molekularna masa: $172{,}172 \rightarrow 145{,}148 + 27{,}024$

od tod izračunamo izdatnost mavca: $i = 145{,}148 / 172{,}172 = 0{,}843 = 84{,}3\%$

Strjevanje mavca ob dodajanju vode:

$$CaSO_4\ 1/2H_2O + 3/2\ H_2O \rightarrow CaSO_4\ 2\ H_2O$$

molekularna masa: $145{,}148 + 27{,}024 \rightarrow 172{,}172$

Teoretično bi potrebovali količino vode: 27,024/ 145,148 = 0,186, to je 18,6% teže mavca

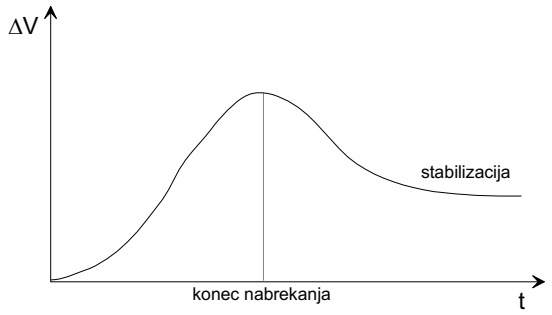
Dejansko mavec sprejme več vode kot jo je oddala sadra, saj se voda ne nahaja samo v kristalih temveč tudi med njimi. Minimalna količina potrebne vode je 25% teže mavca. V praksi porabimo toliko vode kot znaša od 40% do 100% teže mavca. Mavec vedno mešamo tako, da ga počasi sipamo v vodo. Srednje gosto

mešanico dobimo z 60% vode, če uporabimo zelo fini mavec (dentalni mavec), ali z 80% vode pri običajnih mavcih, ki jih uporabljamo v gradbeništvu. Ta razmerja imenujemo vodomavčni količnik (v/m). Manjšo količino mavca lahko zmešamo v zelo kratkem času (10 s), po daljšem mešanju pa dobimo tršo zmes. Med mešanjem ne smemo dodajati ne vodo ne mavec. Preredek ali predolgo mešan mavec ima nižjo trdoto in večjo deformabilnost. V dihidrat se veže le okoli 20% vode, preostali del pa ostane med kristali in s tem povzroča poroznost strjenega mavca zaradi izhlapevanja in izparevanja vode. Mavec v prahu je treba hraniti na suhem, da ne bi prišlo do neželenega strjevanja.

Pri izdelavi mavčnega izdelka ločujemo faze, ki trajajo določen čas:

- mešanje (čas mešanja),
- vlivanje (čas vlivanja),
- stanje plastičnosti (čas plastičnosti),
- vezanje (čas vezanja) in
- konec vezanja (čas strjevanja).

Trajanje faz preskušamo z Vicat-ovim aparatom. Vsakih 30 s spuščamo sondo mase 300 g in premera 10 mm ter merimo globino njenega prodiranja v valjast vzorec mavčne paste. Postopek ponavljamo toliko časa, dokler se po dvigu mavčna masa zapira. Čas vlivanja je čas od priprave mešanice do zapiranja luknjice po dvigu sonde. Mavec je v stanju plastičnosti, dokler sonda lahko prodre do globine 5 mm. Ko se igla ustavi na zgornji površini vzorca je nastopilo vezanje mavca. Časi so odvisni od čistosti mavca, finosti mletja, temperature okolja, vrste mavca (čas žganja sadre) in trajanja mešanja mavčne zmesi. Vezanje lahko pospešimo ali zaviramo z dodatki. Pospešujemo ga s kuhinjsko soljo (od 1% do 2% raztopimo v vodi) ali kalijevim sulfatom (povečuje topljivost). Strjevanje mavca zavirajo boraks (0,8% raztopina) in sladkor. Tak mavec je trši in ga moramo vibrirati med vgrajevanjem, da iztisnemo zračne mehurje.

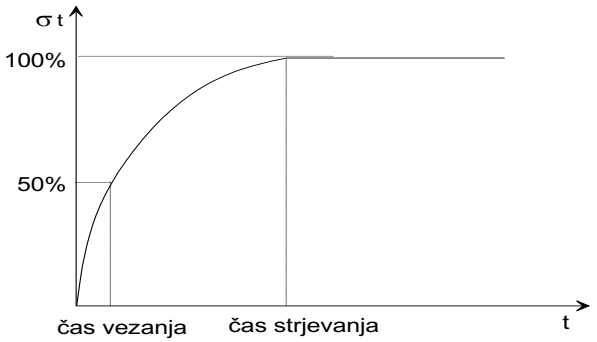


Slika 13: Diagram prostorninske spremembe mavca med vezanjem

Med vezanjem se sprošča hidratacijska toplota, ki je večja na zunanji površini mavčnega telesa. Mavec med vezanjem nabreka (volumska sprememba).

Finost mletja mavca vpliva na njegove lastnosti. Določa se s sejanjem. Velikost maksimalnega zrna je omejena s standardi (JUS omejuje na 0,75 mm), določena pa je tudi zrnatost večine zrn (pod 0,2 mm - ostanek na situ 0,2 mm praviloma ne sme presegati od 10% do 15% celotne količine mavca, le izjemoma do 25%).

Mehanske lastnosti mavca se preskušajo na standardnih prizmah 40/40/160mm. Prizma se preskuša na upogib, polovici pa nato še na tlak. Upogibna trdnost običajnih mavcev znaša 2 MPa, tlačna trdnost pa 4 MPa. Trdnost estrih mavca je 3 do 4 krat višja. Trdnost mavca je odvisna od časa vezanja.



Slika 14: Diagram naraščanja tlačne trdnosti mavca med vezanjem

Časa strjevanja in sušenja se lahko pospešita z vsiljenim sušenjem. Trdnost mavca je odvisna tudi od vlažnosti okolja (mavec potopljen v vodo zgublja na trdnosti).

Gips (hemihidrat) teoretično vsebuje 6,6% vezane vode ($1/2H_2O/CaSO_4$ 9,008/136,14 = 0,066), praktično pa je ta količina nekoliko večja. Standardi jo omejujejo (JUS na 9% v suhem mavcu).

V gradbeništvu se uporabljajo različne vrste mavca. Razlikujejo se po finosti mletja, primeseh in času vezanja.

Štukaturni mavec ima do 10% primesi, finost mletja z 20% ostanka je na situ 0,2 mm, veže pa v 30 minutah. **Modelarski mavec** ima manj primesi in veže v 15 minutah. **Alabaster mavec** je zmlet bolj fino, ima malo primesi (povsem bele barve) in veže v 30 minutah. **Mavec za malte** ima več primesi (do 15%), je bolj grobo mlet (do 30% ostanka na situ 0,2 mm), veže pa v 2 urah. **Estrih mavec** odlikuje visoka trdnost (17 MPa) in veže v 36 urah ter je primeren za razne podloge.

Iz mavca se izdelujejo različni polizdelki, ki se uporabljajo v gradbeništvu. Veliko se uporabljajo različne obložne plošče, ki so armirane s steklenimi, polimernimi ali naravnimi vlakni, mrežicami ali tkaninami (tudi papir), kot polnilo pa se uporabljajo mineralni agregati ustrezne finosti (kamen, žlindra).

Apno

Apno pretežno vsebuje CaO, v manjši količini pa tudi MgO (okoli 10% iz dolomitnega apnenca). Pridobiva se z žarenjem apnenca v pečeh na temperaturi okoli 950°C. Pri tem pride do kemične reakcije pri kateri nastane živo apno:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \qquad (5\text{-}3)$$

Molekulska masa $100,09 \rightarrow 56,08 + 44,01$

in od tod izdatnost $i = 56,08 / 100,09 = 0,56 = 56\%$.

Živo apno je v kosih, ki se meljejo v fini prah. Z dodajanjem vode gasimo živo apno:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \qquad (5\text{-}4)$$

$$56{,}08 + 18{,}016 \rightarrow 74{,}096.$$

Minimalna količina vode za gašenje apna je 18,016 / 56,08 = 0,321 = 32,1%.

Dejansko se potrebuje več vode, saj se v burni reakciji pri gašenju sprošča veliko toplote in voda izpareva. Zato se potrebuje 2 do 2,5 krat več vode od teoretične količine. Po gašenju nastane apnena kaša imenovana **gašeno apno**.

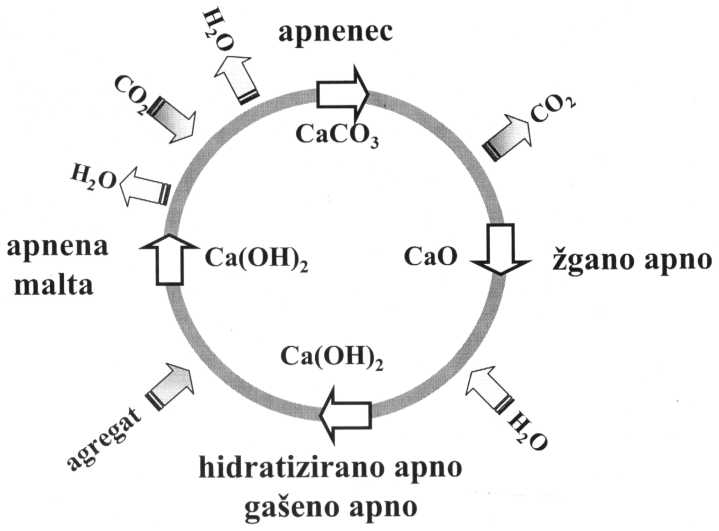
Hidratizirano apno je gašeno apno s teoretično določeno količino potrebne vode (približno 33% mase živega apna). To vezivo je praškasto in se z dodatno količino vode spremeni v apneno kašo. Standardi predpisujejo dovoljeno preseganje količine vode nad teoretično (JUS dovoljuje 10% več vode, to je skupaj okoli 40% vode).

Hidravlično apno se pridobiva iz laporastih in glinastih apnencev, ki vsebujejo do 20% gline. Surovine se žgejo pri 900°C. Po sestavi je podobno cementu, vendar se cement pridobiva na višjih temperaturah. Veže tako na zraku kot v vodi, danes pa ga povsem nadomešča cement.

Apno se uporablja kot vezivo v maltah, kjer skupaj z mineralnim agregatom po strjevanju in sušenju tvori trdno gradivo. Nehidravlična apna se strjujejo s sušenjem, ko se ob vezanju CO_2 in hkratnem izločanju vode ponovno tvori kalcijev karbonat:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (5\text{-}5)$$

Proces je hitrejši, če je malta v suhem in zračnem okolju, kjer je stalen dotok svežega zraka (odvajanje vode in dovajanje CO_2). V maltah pripravljenih iz hidravličnega apna poteka tudi kemični proces, podoben hidratizaciji cementne paste. Pri takih maltah ni nujna prisotnost zraka, ker vežejo tudi v vodi (hidravlično vezivo). Na sliki 5-3 je prikazan krog preobrazbe apna od pridobivanja z žganjem kalcijevega karbonata do pretvorbe kalcijevega hidroksida nazaj v kalcijev karbonat.



Slika 15: Krog preobrazbe apna

Poleg uporabe apnene malte za povezovanje zidakov ali kamnov v zid, se le-ta uporablja tudi za notranje in zunanje omete. Apneno mleko (apno pomešano z vodo) se uporablja za pleskanje ometanih površin. Apno gosto prekriva omet in ga ščiti pred propadanjem. Apneni opleski se enostavno obnavljajo, s tem pa se podaljšuje življenjska doba ometov. Zunanje površine ometov so izpostavljene agresivnim vplivom okolja, med katerimi je najbolj škodljiv "kisli dež", ki vsebuje tudi žvepleno kislino H_2SO_4. Zaradi tega na površini apnene plasti prihaja do reakcije, katere produkt je sadra ($CaSO_4$).

$$CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + H_2O + CO_2 \qquad (5\text{-}6)$$

Voda (dež) spira sadro s površine ometa in ga s tem tanjša. Preden se apneni oplesk povsem izrabi, ga je treba obnoviti in s tem izničiti agresivni vpliv okolja.

Lastnosti apna

Osnovne lastnosti apna so:
- finost mletja,
- vodoapneni količnik,
- stabilnost prostornine in
- trdnost.

Finost mletja se ugotavlja s sejalno analizo. Velikost delcev vpliva na lastnosti apna. Uporabljajo se sita z odprtinami 0,6 mm in 0,09 mm. Apno je ustrezno mleto, če na prvem situ ni ostanka, na drugem pa ga je največ 10% (JUS).

Vodoapneni količnik (v/a) se določa s standardiziranim apnenim poskusom. V prisekan stožec, ki je postavljen na stekleno ploščo stresalne mizice se skozi lijak sipajo apnene kaše, ki so bile pripravljene z različnimi količinami vode (različni v/a). Ko je stožec poln se odstrani in na mizici ostane kolaček iz apnene kaše. Po 15 stresanjih se meri premer kolačka. Kolaček iz standardnega apnenega testa ima po stresanju premer 180±2 mm. Za določeno vrsto apna je vodoapneni količnik enak takemu razmerju vode in apna, s katerim se doseže standardizirani razlez na stresalni mizici.

Stabilnost prostornine se ugotavlja s preskusom 3 kolačkov premera 90 mm in višine 15 mm. Pripravijo se iz apnene malte (apno:standardizirani pesek = 1:2) s količino vode, ki ustreza vodoapnenemu količniku za preskušano vrsto apna. Kolački se hranijo 28 dni v prostoru z relativno vlago 65% (±5%) na sobni temperaturi. Stabilnost prostornine se ugotavlja na osnovi površinskih sprememb (razpoke, drobljenje).

Trdnost apna se preskuša na prizmah 40/40/160 mm, ki se pripravijo iz malte zmešane v razmerju apno:standardizirani pesek = 1:3 in 15% vode glede na suho mešanico malte. Prizme se preskušajo na upogib, polovički pa na tlak po 28 dneh.

HIDRAVLIČNA VEZIVA

Cement

Cement je silikatno hidravlično vezivo, ki po reakciji z vodo (hidratacija) veže in se strdi. Pri tem iz židke cementne paste nastane trd in trden cementni kamen, ki je sestavljen pretežno iz kalcijevih silikat hidratov, ki tudi v vodi ohrani stabilnost in trdnost.

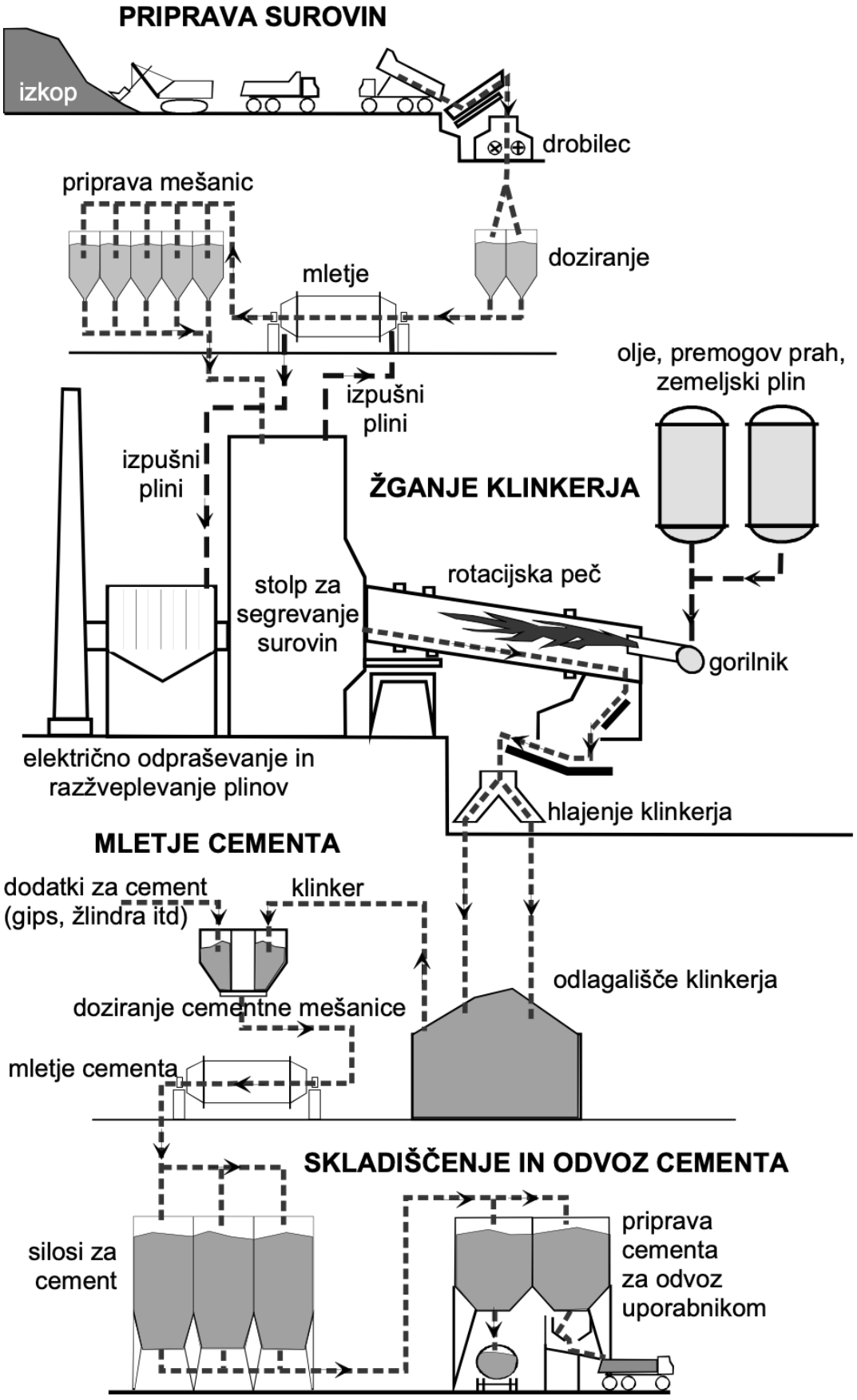
Proizvodnja cementa

Proizvodnja cementa poteka v štirih fazah:

1. proizvodnja surovin
2. mletje surovinske moke
3. žganje klinkerja in
4. mletje cementa

Osnovna surovina so minerali, ki jih vsebuje naravni lapor, apnenec in glina. Ti se po izkopu drobijo in meljejo ter transportirajo v silose. Na osnovi kemijske analize se mineralna mešanica dopolnjuje z manjkajočimi minerali. V Sloveniji primanjkuje laporja za masovno proizvodnjo in se surovinska mešanica, ki mora vsebovati 75 do 78% $CaCO_3$ pripravlja iz apnenca in glin. Ker ni na voljo dovolj čistega apnenca se v mešanicah nahaja tudi dolomit ($CaMg(CO_3)_2$, ki pa v sestavo cementnega klinkerja prispeva nezaželeni MgO. Glinene komponente surovinske mešanice prispevajo okside, kot so SiO_2, Al_2O_3 in Fe_2O_3. Mešanica se po potrebi dopolnjuje s kremenčevim peskom (SiO_2), žganim apnom (CaO) in piritnimi ogorki (Fe_2O_3). Surovine se meljejo po mokrem ali suhem postopku. Produkt mletja je surovinska moka, ki se z vlaženjem spremeni v trde granule premera približno 15 mm, kar omogoča kroženje zraka in plamena v rotacijskih pečeh.

Pred žganjem surovin v rotacijski peči se te segrevajo v izmenjevalcu toplote s protitočno gibajočimi se dimnimi plini iz peči. Rotacijska peč je cilinder, ki je znotraj obložen z ognjevdržnimim materialom. Peč je premera do 5 m in je lahko dolga tudi do 150 m ter je postavljena pod rahlim nagibom. Med obratovanjem se suče okoli vzdolžne osi s hitrostjo enega do dveh obratov na minuto. Žganje surovin poteka v treh intervalih in sicer prvem do 1300°C, drugem med 1300°C in 1500°C ter tretjem, ko se produkt žganja ohlajuje. Pri 100°C surovine oddajajo prosto vodo, pri 600°C se izloča kristalno vezana voda, pri 900°C se talita CaO in SiO_2, med 1200°C in 1300°C pa nastane talina, v kateri se tvorita minerala C_2S pri 1280°C. Pri 1450°C (temperatura sintranja) se tvori mineral C_3S. Dobljena zmes je cementni klinker, ki je podoben pepelu, ima granule s premerom približno 3 cm in je močno porozen. Klinker se hladi na sobno temperaturo in v krogelnih mlinih melje v fini prah - **portland cement**. Klinkerju se med mletjem dodajajo različne snovi, ki dajejo končne lastnosti različnim vrstam cementov.



Slika 16: Shematski prikaz proizvodnje cementa

Klinkerju se med mletjem najbolj pogosto dodajajo:

- sadra, ki je obvezen dodatek za regulacijo vezanja, saj pri cementi z nezadostno količino sulfatov prehitro vežejo,
- žlindra,
- naravni ali umetni pucolani
- apnenec
- elektrofilterski pepel.

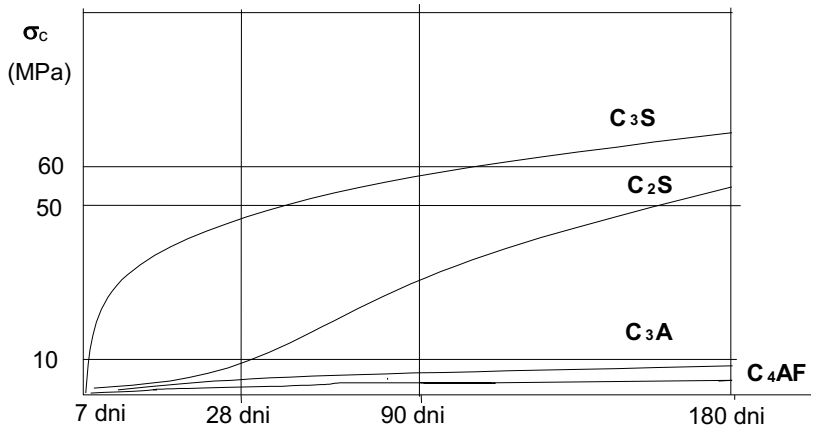
Cementni klinker je po sestavi poli-mineralni material. Osnovne spojine, ki tvorijo komponente klinkerja so:

- CaO - komponenta C (60 do 67%),
- SiO_2 - komponenta S (17 do 25%),
- Al_2O_3 - komponenta A (3 do 8%),
- Fe_2O_3 - komponenta F (0,5 do 6%),
- SO_3 - komponenta S (1 do 3%)
- alkalije (K_2O, Na_2O) (0,2 do 1,3%)
- primesi (nevezan CaO do 2% in MgO do 4%)

Minerali cementnega klinkerja so sestavljeni iz zgornjih komponent.

- trikalcijev silikat (alit) C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$) 40 do 70%
- dikalcijev silikat (belit) C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$) 5 do 30%
- trikalcijev aluminat C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) 7 do 15%
- tetrakalcijev aluminat C_4AF ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$)

C_3S je najpomembnejši mineral običajnih portlandcementnih klinkerjev, močno reagira in pri strjevanju prispeva k visokim trdnostim. Na trgu so tudi cementi, ki so sestavljeni predvsem iz te komponente. C_2S počasi in postopno strjuje in pri tem sprošča bistveno manj hidratacijske toplote kot C_3S. C_3A na začetku hidratacije reagira hitro, sprošča veliko toplote in je občutljiv na sulfatno korozijo. C_4AF strjuje počasi in je bolj odporen na sulfatno korozijo kot C_3A.



Slika 17: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja

Na sliki 16 je prikazan časovni potek naraščanja trdnosti posameznih mineralov cementa. Trdnost najhitreje pridobiva C_3S, saj že po dveh do treh dneh doseže več kot polovico trdnosti, ki jo ima po 28-ih dneh. C_2S na začetku veže

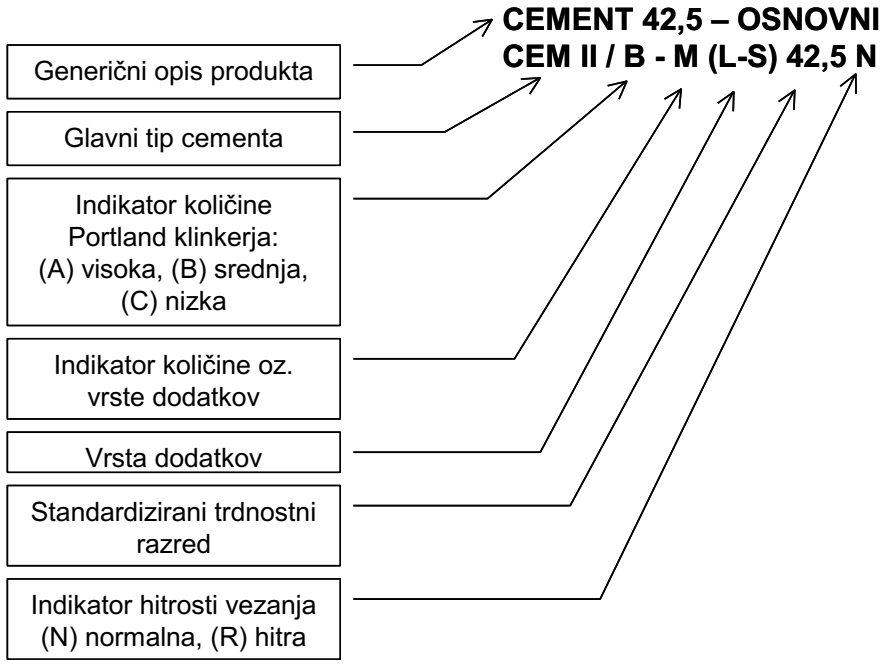
počasneje, vendar dalj časa pridobiva na trdnosti. K trdnosti najmanj prispevata C_3A in C_4AF.

Vse reakcije pri vezanju in strjevanju cementa niso še povsem raziskane. To je področje intenzivnih raziskav, ki vodijo k napredku razvoja betona.Zaradi hitrega vezanja C_3S (prevladujoči delež v cementu) in pri tem razvijajoče se toplote, nastajajo razpoke. C_3A tudi reagira razmeroma hitro. Značilnost portland cementov je dober izbor in kombinacija posameznih mineralov in s tem uravnavanje procesa strjevanja. Dodatna sadra upočasni strjevanje C_3A. Sadra uravnava zgoščevanje cementa tako, da se toplota ne razvije prenaglo. Beton slabo prevaja toploto in je zato potrebno preko cementa uravnavati njen razvoj in količino. Nastajanje toplote se lahko prepreči z **etringitom** ($Ca_6\ Al_2\ [(OH)_4|SO_4]_3\ .24H_2O$), trisulfatom ki kasneje razpade v monosulfat. Etringit lahko nastane tudi v otrdelem betonu, kjer pa zaradi svoje ekspanzivnosti povzroča notranje obremenitve in rušenje betonske strukture (betonska kuga).

Označevanje cementa

Vrsta cementa, njegova sestava in trdnost so razvidni iz standardizirane oznake cementa. Način označevanja in pomen oznak obravnava slovenski standard SIST EN 197-1:2001 (Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente) Nastal na osnovi ustreznega evropskega standarda, kar je vidno tudi iz njegove oznake.

Na naslednji sliki je prikazan standardizirani sistem označevanja cementov.



Slika 18: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1:2001

Generični opis cementa je oznaka, s katero posamezni proizvajalec imenuje svoj cement. Ostali deli oznake cementa so standardizirani. Standard pozna 27 tipov cementa, ki so razporejeni v eno izmed petih glavnih skupin. Te so:

- CEM I - portlandski cement
- CEM II - portlandski mešani cement

- CEM III - metalurški cement
- CEM IV - pucolanski cement
- CEM V - mešani cement

Osnovna oznaka CEM razvršča cemente glede na njihovo celotno sestavo, natančneje pa je sestava podana z nadaljnjimi oznakami. Z A so označeni cementi, ki vsebujejo nad 80% klinkerja, z B tisti, ki vsebujejo od 20 do 80% klinkerja, s C pa cementi, pri katerih je količina klinkerja pod 20%. Cementnem klinkerju je lahko dodan eden ali več dodatkov. Če sta klinkerju dodana dva ali več dodatkov, se to označi s črko M, v oklepaju pa so podane oznake teh dodatkov. Če pa je klinkerju dodan samo eden izmed dodatkov, njegova oznaka sledi neposredno oznaki količine klinkerja.

Preglednica 12: Oznake in imena mineralnih dodatkov

Oznaka dodatka	Ime dodatka
S	Granulirana žlindra
D	Mikrosilika
P	Naravni pucolani
Q	Naravni kalcinirani pucolani
V	Silikatni elektrofilterski pepel
W	Karbonski elektrofilterski pepel
T	Žgani skriljevec
L	Apnenec
LL	Apnenec
M	Dva ali več od zgoraj naštetih dodatkov

Standard loči tri trdnostne razrede cementov in pri vsakemu še tiste kateri vežejo z normalno hitrostjo (N) in tiste, ki pospešeno vežejo (R), kot je to prikazano v sledeči preglednici:

Preglednica 13: Trdnostni razredi cementov [Mpa]

Trdnostni razred	Zgodnja trdnost		Trdnost po 28 dneh	
	2. dan	7. dan	Minimalna	Maksimalna
32,5 N	-	≥16,0	≥32,5	≥52,5
32,5 R	≥10,0	-	≥32,5	≥52,5
42,5 N	≥10,0	-	≥42,5	≥62,5
42,5 R	≥20,0	-	≥42,5	≥62,5
52,5 N	≥20,0	-	≥52,5	
52,5 R	≥30,0	-	≥52,5	

Osnovne vrste cementov

Obstajata dve večji skupini cementov:

- silikatni (glavna sestavina so silikati kalcija, C_3S)
- aluminatni (glavna sestavina so kalcij aluminati, C_3A)

Portland cement

Portland cement je značilni predstavnik silikatnih cementov. Uporablja se brez ali s hidravličnimi dodatki. Dodatki sami ne morejo vezati z vodo, to sposobnost pa dobijo, ko se pomešajo s cementom (žlindra visokih peči, naravna pucolanska zemlja, opalska breča, elektrofilterski pepel). Portland cement lahko mešamo z žlindro (do 30%) ali s pucolanom (do 30 %). Cement, ki vsebuje večjo količino žlindre (od 31 do 85%), se imenuje **metalurški cement**. Cement z veliko količino pucolana (nad 30%) se imenuje **pucolanski cement**. Na vrečah cementa se nahajajo standardizirane oznake, ki označujejo sestavo cementa.

Metalurški in pucolanski cementi so bolj odporni na agresivno delovanje sulfatnih soli, ki se nahajajo v vodi ali v tleh, razvijajo manj hidratacijske toplote kot portland cement, imajo pa manjšo začetno trdnost. Ta se s časom veča in kasneje lahko doseže enako vrednost kot pri ustreznem portland cementu. Uporabljajo se za podmorske gradnje in gradnje masivnih betonskih objektov (pregrade).

Z raznimi dodatki lahko spreminjajo lastnosti portland cementa. Z dodajanjem 1% stearinov (kalcijeva mila, kalcijeve soli maščobnih kislin) dosežejo večjo **vodotesnost cementa**. Z dodajanjem natančno odmerjenih količin smol (približno 0,05%) med mletjem klinkerja nastajajo zelo drobni zračni mehurčki vsrkani v cementni prah, ki se imenuje **aerirani portland cement**. Pri izdelavi betona z aeriranim cementom postanejo mehurčki elastična sestavina betona, ki je zaradi zaprte poroznosti odporen na zmrzovanje in na delovanje soli. Z dodajanjem **ekspanzijskih dodatkov** dobijo portland cemente, ki v začetni fazi vezanja nabrekajo in s tem zmanjšajo ali celo izničijo običajno krčenje cementne paste pri njenem prehodu v cementni kamen.

Žlindra in pucolani vplivajo na lastnosti sveže betonske mešanice. Zmanjšujejo potrebno količino vode za doseganje določene konsistence, poboljšajo obdelovalnost sveže betonske mešanice, zmanjšajo izcejanje vode in segregacijo agregata, zmanjšajo hidratcijsko toploto, podaljšajo začetek vezanja in izboljšajo odpornost na agresivne vplive.

Superfosfatni cementi vsebujejo vsega 5% portland klinkerja, od 12 do 15% sadrovca in od 80 do 85% granulirane žlindre. Odporni so na soli in na šibkejše kisline.

Low-heat cementi razvijajo nizko hidratacijsko toploto. Vsebujejo povečano količino F komponente (Fe_2O_3) na račun komponente A (Al_2O_3).

Beli portland cement ima prevladujoči komponenti C (CaO) in A (Al_2O_3) z zelo nizkim odstotkom (pod 0,3%) komponente F (Fe_2O_3). Izdelujejo ga iz zmesi z velikim odstotkom čistega apnenca in kaolina. Stopnje beline so standardizirane (A, B, C) in so podane v oznaki cementa (BPC npr.)

Aluminatni (boksitni) cement

Pridobivajo ga s taljenjem mešanice boksita in apnenca (ali apna) v plamenih pečeh ali elektropečeh. Ti cementi razvijejo visoko hidratacijsko toploto, imajo visoko začetno in kasnejšo trdnost. Odporni so na sulfatne otopine in otopine ogljikovodikovih kislin. Uporabljajo jih za betoniranja pri nizkih temperaturah. Pri višjih temperaturah (nad +30°C) mu trdnost pada. Uporabljajo ga tudi kot

vezivo pri ognjeodpornem betonu. Mešanice portland in aluminatnih cementov so hitrovezoče z nižjo trdnostjo.

Hidratacija cementa

Hidratacija je proces vezanja vode in cementa. To je kompleksna serija reakcij med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo. Nekatere reakcije potekajo istočasno nekatere pa zaporedno z različnimi hitrostmi in vplivajo ena na druge. Na začetku je proces odvisen od hitrosti raztapljanja klinkerjevih mineralov in kalcijevega sulfata. V nadaljevanju postane proces bolj kontroliran s kontrolo rasti kristalov hidratacijskih produktov, na koncu pa s hitrostjo difuzije vode in raztapljanja ionov.

Hitrost hidratacije je odvisna od:

- sestave klinkerja in količine primesi v mineralih klinkerja,
- mikrostrukture klinkerja, ki je odvisna od razmer pri žganju klinkerja,
- količine in oblike kalcijevega sulfata,
- finosti in granulacijske sestave cementa,
- vodocementnega razmerja pri pripravi mešanice
- razmer pri zorenju mešanice in
- prisotnosti kemičnih dodatkov v mešanici.

V preglednici so shematsko prikazane in opisane posamezne faze hidratacije cementnega klinkerja to je prehoda cementne paste v cementni kamen.

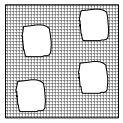
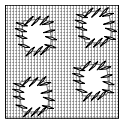
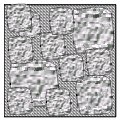
Proces vezanja in strjevanja je odvisen od razmerja vode in cementa v cementni pasti. To razmerje se imenuje vodocementni količnik v/c.

Pri prehodu koloidnega sistema v cementni gel (2. faza v 3. fazo) nastaja porozna struktura. Nastajajo:

- **gelske pore** (0,2 do 5 μm), ki so vedno zastopane v enakem deležu ne glede na stopnjo hidratacije cementa in so zapolnjene z vodo,
- **kapilarne pore** (0,05 do 1,3 μm), ki jih je najmanj pri popolni hidrataciji cementa, to je pri v/c = 0,38, ko se vsa cementna masa transformira v gel, in
- **zračni mehurčki** (10 do 1000 μm), ki so zaprti za vdor vode.

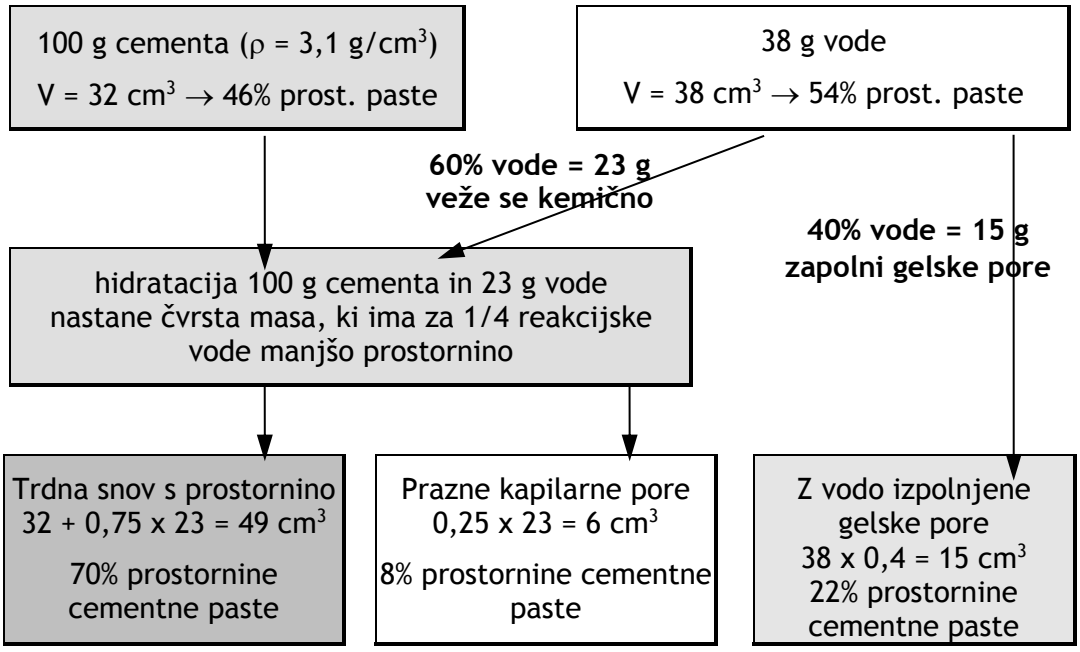
Preglednica 14: Shema in opis hidratacije cementa

Faza	Shema	Opis dogajanja

1.		**Pred-indukcijsko obdobje (traja nekaj minut)** Po mešanju cementa in vode se v vodi hitro raztapljajo spojine in začne se hidratacija mineralov klinkerja. Procesa sta ekzoteremna in ju zato spremlja velik toplotni tok. Na tej stopnji reagira le 2 do 10% C_3S. Mineral C_3A se v deležu med 5 in 25% raztaplja in reagira s sulfatnimi ioni. Ob tem nastaja etringit, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na cementnih delcih. Mineral C_4AF reagira podobno kot C_3A, delež reagiranega C_2S pa je zelo majhen.
2.		**Indukcijsko obdobje - relativno mirovanje** (traja nekaj ur) Po začetni hitri hidrataciji se reakcijska hitrost zelo zmanjša. To zmanjšanje se razlaga na dva načina: - po **teoriji zaščitne plasti** se hidratacijski produkti obdajo z zaščitno plastjo že v pred-indukcijskem obdobju. Zaradi tega se hidratacija upočasni. Zaščitna plast se počasi spreminja in postane propustna, kar omogoči nadaljevanje procesa hidratacije - po **teoriji kristalizacijskih jeder**, nadaljevanje hidratacije ovirajo nastale nasičene raztopine kalcijevega hidroksida. S pojavom hidratacijskih jeder se iz raztopine izločajo mineralni kosmiči, koncentracija kalcijevih ionov se zniža in hidratacijski proces ponovno steče.
3.		**Obdobje pospešene hidratacije** (tretja do dvanajste ure procesa) Nasičena otopine z novo nastalimi kristali preide iz faze sola v fazo cementnega gela, ki je gosto tekoča masa z enakomerno razporejenimi zrni. Hitrost hidratacije C_3S in C_2S narašča in doseže maksimalne vrednosti.
4.		**Obdobje pojemajoče hidratacije** (do konca hidratacije) Hitrost reakcij se zmanjšuje in je odvisna od difuzije ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki tvorijo opno okoli nehidratiziranih jeder cementnih delcev. Nastaja C-S-H gel kot posledica hidratacije C_3S in C_2S. Na začetku nastali etringit reagira s nehidratiziranim C_3A in C_4AF in nastane monosulfat. V nadaljevanju hidratizirani material zori. Nastajajo nove spojine, iz gela se tvori cementni kamen, gel se prepleta z novo nastajajočimi kristali, ti rastejo in tvorijo mrežo.

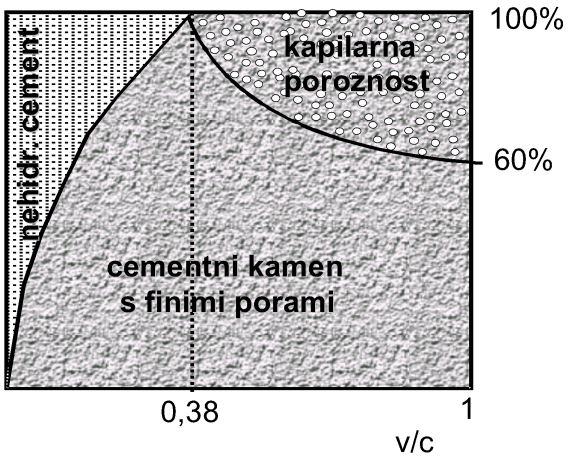
V naslednjem diagramu so prikazane razmere v cementni pasti pri vodocementnemu razmerju 0,38.

v/c = 0,38: mešanica 38 g vode in 100 g cementa,
cementna pasta ima V= 70 cm^3



Glede na velikost vodocementnega razmerja so možni trije primeri:

- v/c < 0,38, premalo vode za popolno hidratizacijo cementa in zato del cementa ostane nevezan v praškastem stanju,
- v/c = 0,38, idealne razmere pri katerih hidratizira ves cement in
- v/c > 0,38, vsa odvečna voda se namesti v kapilarnih porah.



Slika 19: Vpliv vodocementnega razmerja na sestavo cementnega kamna

Pri dejanskih razmerah v praksi v/c =0,38 ponavadi ne zadošča za pripravo betona brez drugih dodatkov. Del vode izhlapi, hidratizacija pa lahko poteka tudi več let. Debelejša zrna nikoli ne hidratizirajo v celoti, ker se temu upirajo odebeljene stene okoli praškastega jedra. V praksi je dosegljiva od 80 do 90% hidratacija cementnih zrnc. Drobna zrnca hidratizirajo v celoti, debela pa samo na površini. Zato je zaželeno, kar se da fino mletje cementa. Nehidratizirani delci cementa ne delujejo škodljivo, saj je trda lupina dovolj trdna.

Lastnosti cementa

Lastnosti cementa se preiskujejo s standardiziranimi postopki. Vzorci, ki jih odvzamejo s sondo se delijo na tri enake dele. Prvi se uporabi za osnovne preiskave, drugi za primerjalne preiskave, tretji pa se hrani za eventualne poznejše dokazne preiskave.

Specifična masa cementa, ki se meri s pomočjo piknometra, znaša 3,1 g/cm^3. Rahlo nasut cement ima gostoto od 0,8 do 1,2 g/cm^3, če ga zbijemo pa od 1,3 do 1,8 g/cm^3. Pomembne lastnosti cementa so finost mletja, vlažnost in žarilna izguba. Cement delno hidratizira v stiku z zračno vlago. Nastanejo strjene kepe. Najprej se strdijo fina zrnca $Ca(OH)_2$ in se vežejo s CO_2 v $CaCO_3$.

Finost mletja

Finost mletja vpliva na proces hidratizacije. Cementi z drobnejšimi zrni imajo višje trdnosti. Skrajnost so cementi, ki jih pobirajo s filtrov v cementarnah in lahko dosegajo marko 55. Finejši cementi med hidratacijo razvijajo več toplote in se bolj krčijo. Hidratacija se razvija na površini zrnc, zato se fina zrna popolneje hidratizirajo. Finost definirata dva parametra:

- specifična površina zrnc (vsota površin vseh zrnc v enoti mase, v 1g npr.)
- granulometrična sestava cementa (ni pravila za najboljšo sestavo in se zato v praksi uporablja le specifična površina zrnc).

V praksi se uporabljata dva postopka za določanje finosti cementa:

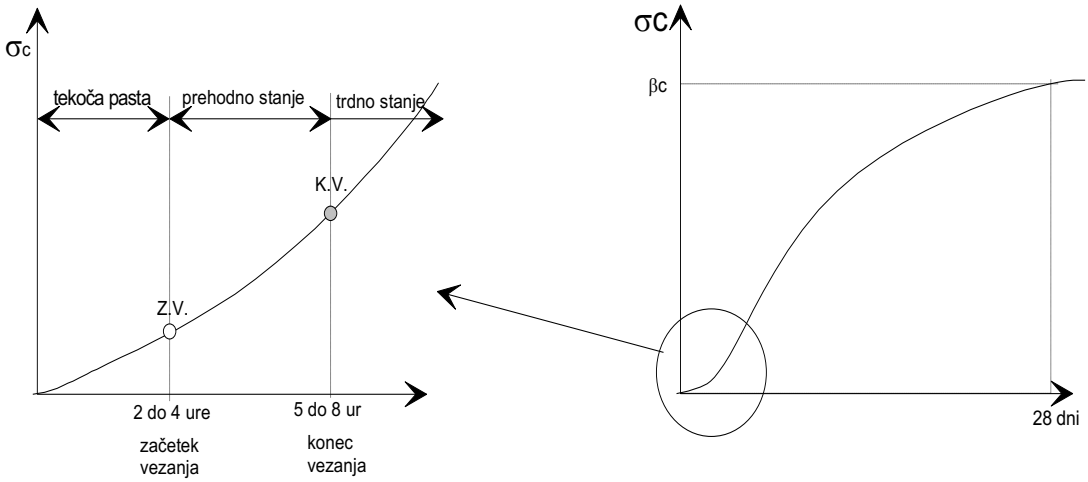
- sedimentacijska metoda (Wagnerjev turbidimeter)
- metoda z zračnim tokom (Blainov permeabilimeter)

Pri sedimentacijski metodi se meri sprememba intenzitete svetlobe, ki jo prepušča suspenzija cementa v petroleju med sedimentiranjem. Pri metodi z zračnim tokom se meri hitrost prehoda zraka skozi zbiti vzorec cementa. Ta je odvisna od finosti cementa, saj te vplivajo na velikost in število por, ki prepuščajo zrak.

Nobena izmed metod ne omogoča določanja absolutne velikosti površin zrnc, omogoča pa primerjavo rezultatov preskušanja različnih vrst cementa. Na osnovi primerjav se da sklepati o finosti določenega cementa. Rezultati, ki izhajajo iz uporabe metode z zračnim tokom, so za približno 80% višji od tistih, ki so dobljeni s sedimentacijsko metodo. Standardi predpisujejo minimalne vrednosti (JUS, 2400cm^2/g po Blainu).

Standardna konsistenca cementne kaše

Standardna konsistenca cementne kaše se ugotavlja z Vicat-ovim aparatom. Kašo pripravimo po standardiziranem postopku. Standardizirana konsistenca je pri kaši dosežena, če se sonda Vicatovega aparata (sonda ϕ10 mm, mase 300 g) ustavi od 5 do 7 mm nad dnom standardnega vzorca višine 40 mm. Začetek vezanja nastopi ko se Vicat-ova igla (površina prereza igle je 1 mm^2 , masa 300 g) ustavi od 3 do 5 mm nad dnom vzorca. Vezanje se konča, ko igla v vzorec prodre le še 1 mm. Na skici diagrama vezanja cementne kaše (slika 19) je prikazan časovni potek procesa vezanja cementne kaše.



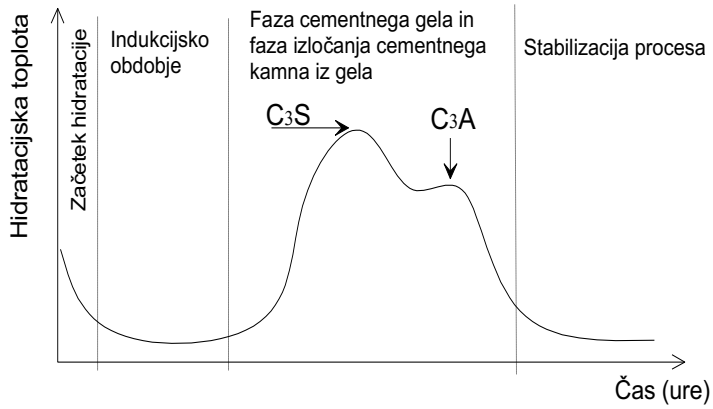
Slika 20: Časovni potek strjevanja cementne paste

Standardi predpisujejo mejne čase vezanja. Tako je JUS dovoljeval, da se je vezanje začelo že po 90 minutah, moralo pa se je končati v 10-ih urah. Kaše, ki so pripravljene z večjim vodocementnim količnikom, vežejo bolj počasi. Višja temperatura okolja vpliva na hitrejše vezanje.

Znana sta tudi dva pojava, ki sta povezana z vezanjem. Ta sta *lažno vezanje* in *hitro strjevanje z zvišanjem temperature*. Prvi pojav je posledica nastanka kristalov sadre, ki se z dodatnim mešanjem razbijejo in se proces vezanja cementa nadaljuje brez motenj. Drugi pojav je povezan s prehitro hidratizacijo cementnega minerala C_3A. Ta proces lahko preprečimo in omilimo njegove posledice z dodajanjem vode in dodatnim mešanjem cementne paste.

Hidratacijska toplota

Hidratacijska toplota se razvija med vezanjem in strjevanjem cementa pri določeni temperaturi okolja. Meri se v J/g. K razvoju hidratacijske toplote veliko prispeva Al_2O_3. Na sliki 20 je prikazan razvoj toplote v prvih urah hidratacije cementa. Na krivulji je viden vpliv različnih hitrosti strjevanja mineralov C_3S in C_3A.

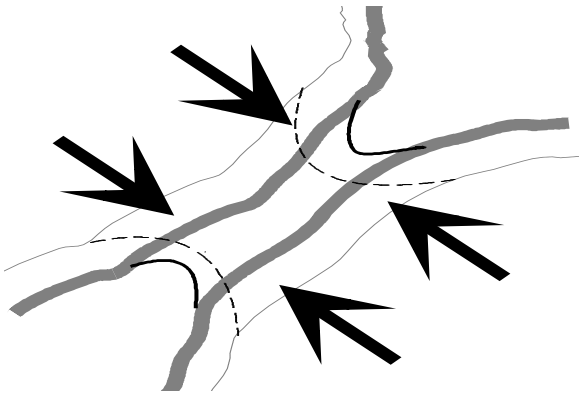


Slika 21: Razvoj hidratacijske toplote v prvih urah vezanja cementne paste

Krčenje

Cementna pasta se krči med strjevanjem. Celotno krčenje je posledica krčenj zaradi različnih vzrokov, ki so spodaj navedeni.

- **Hidratacijsko** krčenje, ki nastane zaradi kemijske reakcije, pri kateri se prostornina čvrste cementne mase zmanjša za prostornino 1/4 reakcijske vode.
- **Plastično** krčenje v primeru slabe nege betona, ki se razvije v prvem dnevu. Nastane zaradi površinskega izhlapevanja vode v času vezanja cementne paste, pojavijo se površinske razpoke.
- **Izsuševanje** cementnega kamna in manjšanje meniskov v kapilarah privedejo do povečanja kapilarnih sil, ki povzročajo oženje kapilar in nadaljnje povečanje kapilarnih sil (slika 21).



Slika 22: Shema kapilarnega krčenja cementnega kamna

Krčenje je večje pri cementnih pastah, ki imajo večji vodocementni količnik, drobnejša zrna cementa in ki razvijajo višjo toploto. Krčenje cementnega kamna je eden osnovnih vzrokov krčenja gradiv, ki vsebujejo cement (malte, betoni).

Stabilnost prostornine

Cementna pasta spreminja svojo prostornino zaradi različnih zunanjih vplivov, kar povzroča nastanek razpok. Zaželeno je, da krčenje na zraku in nabrekanje v vodi poteka enakomerno. Nabrekanje je lahko tudi posledica hidratacije MgO ali apnenih zrn, zaradi reakcije C_3A z mavcem (sulfatna ekspanzija). Te reakcije so počasne, zato jih pri preiskavah skušamo pospešiti. Običajno se poslužujemo treh vrst preiskav:

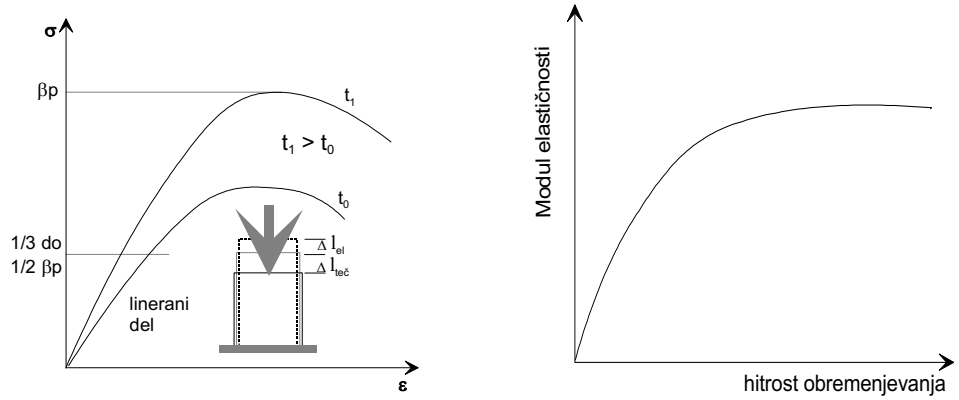
- preiskave s kolački (3 kolački, ϕ 90 mm, h = 15 mm, 24 ur, 20°C, vlaga 95%),
- preiskave po Le Châtelier-ju (3 vzorci, prstan, po 1 dnevu 3 ure kuhanja, povprečni razmik igel manjši od 10 mm) in
- preiskave v avtoklavu (odkrivanje ekspanzije MgO in CaO, 20 barov pritiska, sprememba dolžine je mera prostorninske nestabilnosti).

Tečenje (lezenje)

Pri kratkotrajnih obremenitvah nastanejo trenutne deformacije cementnega kamna, trajajoča obtežba pa povzroča časovne deformacije zaradi pojava tečenja. Deformacije so večje pri mlajšem cementnem kamnu, kjer se hidratacija ni še povsem končala.

Deformacije cementnega kamna pod stalno obtežbo se stabilizirajo po 5-ih do 10-ih letih, ko se proces tečenja ustavi. Deformacije zaradi tečenja so lahko 2 do 3 krat večje od deformacij pod enako trenutno obtežbo.

Velikost deformacij cementnega kamna zaradi tečenja je odvisna od vrste in količine cementa, vodocementnega količnika, intenzivnosti obremenitev in vplivov okolja.



Slika 23: Vpliv hitrosti obremenjevanja na nosilnost in na modul elastičnosti cementnega kamna

Pri večji hitrosti obremenjevanja dosežemo večjo trdnost (slika 22) in hkrati tudi na modul elastičnosti, saj je ta večji pri večji hitrosti obremenjevanja. Pri določeni hitrosti pa se porast modula elastičnosti v odvisnosti od naraščanja hitrosti stabilizira.

Trdnostni razred cementa

Trdnostni razred cementa se določa z upogibnim in tlačnim preskusom prizem in kock narejenih iz standardizirane cementne paste po 28 dnevnem staranju preskušancev v vodi. Malta se pripravi iz cementa in naravnega kremenčevega peska v masnem razmerju 1:3 in z vodo, ki jo je po masi pol manj kot cementa. Standardni pesek je sestavljen iz treh frakcij v enakem razmerju (frakcije 0/0,5, 0,5/1 in 1/2 mm).

Standardne prizme 40/40/160 mm se preskušajo na upogib, odlomljena kosa pa še na tlak. Trdnost cementa je odvisna od poroznosti, ki je višja pri nižjem vodocementnem količnikju. Razmerje med upogibno in tlačno trdnostjo cementa je približno 1:5 do 1:10.

Korozija cementa

Agresivno okolje povzroča propadanje cementnega kamna in s tem tudi betona. V večini primerov agresivne snovi prodirajo v cementni kamen v obliki vodne raztopine. Snovi kemično reagirajo s sestavinami cementnega kamna in betona, kar povzroča njihovo propadanje oz. korozijo.

Vicatov indeks

Odpornost cementa na korozijo izraža **Vicatov indeks**, ki je razmerje kisle in bazične skupine spojin, ki sestavljajo cementne minerale:

$$I = (SiO_2 + Al_2O_3) / (CaO + MgO) \qquad (5 - 7)$$

Odpornost cementa je sorazmerna kislemu deležu snovi, to je pri večji vrednosti Vicat-ovega indeksa. Indeks aluminatnih cementov je večji od 1, portland cementov manjši od 0,5, z dodajanjem žlindre in pucolanov pa se indeks portland cementov lahko dvigne nad 0,5 vse do 1.

Korozijo cementa lahko znižujejo s sledečimi ukrepi:

- nižjim vodocementnim količnikom in s tem manjšo poroznostjo cementnega kamna oz. manjšim številom kapilarnih por,
- zmanjšanjem deleža cementnega minerala C_3S (dodajanje žlindre in pucolana),
- ustrezno izbiro vrste cementa glede na pričakovane vplive okolja in
- z zaščito cementnega kamna z izolacijskimi sredstvi, ki ne reagirajo s snovmi v agresivnem okolju.

Mehke vode

Mehke vode raztapljajo in izpirajo prosto apno $Ca(OH)_2$ in s tem znižujejo trdnost cementnega kamna. Na površini betona se pojavijo beli madeži.

Pojav karbonatizacije površinskih plasti cementnega kamna, ki je sicer škodljiv pojav zaradi izgubljanja njegove bazičnosti, zavira raztapljanje in izpiranje prostega apna, saj to prehaja v apnenec:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (5 - 8)$$

Vode z ogljikovo kislino

Ogljikova kislina se pogosto nahaja v naravnih mineralnih vodah. Take vode reagirajo s prostim apnom $Ca(OH)_2$ in spirajo produkt reakcije (kalcijev hidrokarbonat), ki je topen v vodi.

$$Ca(OH)_2 + 2\ CO_2 \rightarrow Ca(HCO_3)_2 \qquad (5 - 9)$$

Kisline

Kisline se nahajajo ali v odpadnih vodah ali pa nastanejo z raztapljanjem plinov iz onesnaženega zraka (SO_2, Cl).

Eden izmed možnih korozijskih pojavov je reakcija prostega apna v cementnem kamnu in kislin ter nastajanje v vodi topnih snovi, ki jih voda spira in s tem povzroča votlikavost cementnega kamna (5-10).

$$Ca(OH)_2 + 2\ HCl \rightarrow CaCl_2 + 2H_2O \qquad (5 - 10)$$

Druga izmed mnogih možnosti je poškodovanost cementnega kamna zaradi nabrekanja, ki ga povzroča kalcijev sulfat (5-11).

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4\ 2H_2O \qquad (5 - 11)$$

Kisline reagirajo tudi z drugimi minerali v cementnem kamnu in s tem povzročajo njegovo propadanje.

Magnezitna korozija

Magnezijeve spojine so prisotne v morski vodi in v mineralnih vodah. Reagirajo s prostim apnom v cementnem kamnu. Produkti reakcij ($CaCl_2$, $CaSO_4\ 2H_2O$) so topni v vodi, ki jih le ta spira in s tem povzroča votlikavost cementnega kamna.

$$Ca(OH)_2 + MgCl_2 \rightarrow CaCl_2 + Mg(OH)_2 \qquad (5 - 12)$$

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2\ H_2O \rightarrow CaSO_4\ 2H_2O + Mg(OH)_2 \qquad (5 - 13)$$

Korozija zaradi mineralnih gnojil

Fosfatna in dušikova gnojila prehajajo v podtalnico ali v površinske vode, ki v stiku s cementnim kamnom reagirajo. Superfosfat $Ca(H_2PO_4)_2$ reagira s sadro in nastane prosta fosforna kislina. V dušikovih gnojilih se nahajata amonijev sulfat in amonijev nitrat, ki reagirata s prostim apnom v cementnem kamnu, produkti reakcij pa so topni v vodi (5-14).

$$Ca(OH)_2 + 2\ NH_4 + 2\ H_2O \rightarrow 2NH_3 + Ca(NO_3)_2\ 4\ H_2O \qquad (5 - 14)$$

Sulfatna korozija

Sulfatna korozija povzroča nastajanje etringita v cementnem kamnu, kar je ena izmed najbolj nevarnih pojavov korozije. Etringit imenujejo "cementna kuga" saj močno nabreka in od znotraj ruši strukturo cementnega kamna in betona. Sulfati v beton prodirajo z morsko vodo, z industrijskimi odplakami in naravnimi podzemnimi vodami.

Organske snovi

Organske snovi kot so ocetna, mlečna in vinska kislina, maščobe s stearinsko kislino, fenol in sorodne snovi reagirajo s minerali cementnega kamna in s tem povzročajo njegovo korozijo.

VODA

Na splošno velja, da je pitna voda primerna za pripravo mešanic z vezivi. Pri bolj zahtevnih konstrukcijah (prednapete betonske konstrukcije) je zaradi občutljivosti visoko trdnih jekel za kable v vsakem primeru treba analizirati sestavo vode. Morska voda vsebuje velike količine mineralov in je zato le pogojno uporabna za nearmirane betone nižjih trdnosti. Zgornja meja prisotnosti soli v vodi za pripravo armiranega betona je 5 g/l, morska voda pa jo vsebuje okoli 7 krat več.

Drobnih delci (glina, organske snovi) in soli, ki so razpršeni v vodi, ustvarjajo prevleke na agregatu in prekinitve med zrnci cementa ter s tem bistveno vplivajo na proces hidratizacije in sprijemanje cementne paste z agregatom. Posamezne spojine, ki so raztopljene v vodi, povzročajo tudi korozijo cementnega kamna.

Vpliv neznane vode na trdnost cementne paste lahko preskušamo s primerjalnimi preskusi prizem izdelanih z vodo znane in neznane kakovosti. Neprimernost vode se lahko pokaže tudi z naslednjimi pojavi: eflorescenca (površinsko izločanje soli), prostorninska nestabilnost cementnega kamna, sprememba časovnega poteka hidratacije paste, sprememba barve paste in različne vrste korozije.

Zgornja meja vsebnosti raztopljenih trdnih snovi je običajno 2‰. Višje koncentracije niso vedno problematične, kar je odvisno od vrste cementa.

Karbonati in natrijevi ter kalijevi bikarbonati vplivajo na potek strjevanja cementne paste. Natrijev karbonat povzroča pospešitev strjevanja, natrijev bikarbonat pa lahko pospešuje in zavira strjevanje. Velika koncentracija teh soli znižuje trdnost cementnega kamna in jo je treba preveriti pri koncentracijah teh snovi nad 1‰.

Natrijev klorid ali natrijev sulfat sta lahko prisotna v razmeroma velikih koncentracijah (NaCl do 2% in Na_2SO_4 do 1%) brez bistvenega vpliva na cementni kamen. Kalcijevi in magnezijevi bikarbonati ne smejo presegati 0,4‰.

Koncentracije magnezijevega sulfata in magnezijevega klorida do 4% ne vplivajo na trdnost cementnega kamna, lahko pa povzročijo magnezitno korozijo. Kalcijev klorid se pogosto uporablja kot pospeševalec vezanja cementne paste v koncentracijah do 2% mase cementa. Njegova uporaba ni dovoljena pri prednapetem betonu ali betonih, ki so v stiku z aluminijem.

Železne soli so lahko prisotne vse do koncentracij 4%, v naravnih vodah pa so koncentracije tudi tisočkrat manjše.

Soli mangana, cinka, bakra, kositra in svinca lahko vplivajo na znižanje trdnosti in spremembe časa strjevanja. Kot zaviralci strjevanja se uporabljajo soli, ki vsebujejo natrijev jodat, natrijev fosfat, natrijev arzenat in natrijev borat v koncentracijah nekaj promilov mase cementa. Pri koncentraciji natrijevega sulfida nad 0,1‰ je potrebna posebna pozornost in preverjanje njegovega vpliva.

Morska voda v povprečju vsebuje 3,5% soli in je uporabna za nearmiran beton. Tak beton pri staranju pridobival hitreje na trdnosti, vendar je njegova marka nekoliko nižja v primerjavi z betonom pripravljenim s pitno vodo.

Na splošno, voda, ki v celoti vsebuje manj kot 1% koncentracije anorganskih kislin, ne vpliva na trdnost cementnega kamna. Primernost vode se lahko izraža tudi s pH količnikom, a je vsebnost izražena v % tehnično bolj primerna. Pri nevtralni vodi je pH količnik enak 7.

Koncentracija natrijevega hidroksida pod 5‰ mase cementa ne vpliva na trdnost cementnega kamna. Kalijev hidroksid v koncentracijah do 1,2% mase cementa lahko zniža trdnost samo določenih vrst cementa.

Veliko pozornost je potrebno posvetiti uporabi prečiščenih odpadnih industrijskih vod. Čvrsti delci se lahko odstranijo v kakovostnih usedalnikih, več težav pa povzročajo raztopljene snovi. Zato je pred morebitno uporabo takšne vode potrebna ne le kemična analiza, temveč tudi primerjalna preiskava vpliva vode na trdnost cementnega kamna.

Sladkor v koncentraciji od 0,3‰ do 1,5‰ mase cementa običajno zavira proces strjevanja. V določenih primerih lahko pride do nižje trdnosti po 7-ih dneh in višje trdnosti po 28-ih dneh. Pri vsebnosti sladkorja nad 2‰ se strjevanje pospešuje, pri koncentraciji nad 2,5‰ pa poleg hitrejšega strjevanja pride tudi do znižanja trdnosti 28 dni starega cementnega kamna. Zato je treba preskušati vode s koncentracijo nad 0,5‰ s primerjalnimi preiskavami vzorcev cementnega kamna.

Koncentracija drobcev gline do 2‰ ni problematična. V večjih koncentracijah glina lahko deluje kot ostale škodljive primesi mineralnemu agregatu. Vode, ki vsebujejo mivko in glino se čistijo s sedimentiranjem delcev v posebnih rezervoarjih.

Mineralna olja manj vplivajo kot olja organskega porekla. Koncentracija olj nad 2% mase cementa znižuje trdnost cementnega kamna za približno 20%.

Organske primesi kot so npr. alge lahko povzročijo veliko znižanje trdnosti zaradi povzročanja odprte poroznosti ali oblepljanje zrn agregata in s tem njihovega ločevanja od cementne paste.

VPRAŠANJA

1. Katere vrste veziv poznate in v čem so si različna?
1. Prikažite in pojasnite proces pridobivanja mavca.
2. Navedite vrste mavca in pojasnite procese, pri katerih nastajajo.
3. Kako se medsebojno razlikujejo vrste mavca in za kaj se uporabljajo?
4. Pojasnite proces strjevanja mavca, pojem izdatnosti ter teoretično in dejansko količino vode, ki je potrebna za strjevanje.
5. Katere faze ločimo pri izdelavi mavčnega izdelka in kako ugotavljamo trajanje posamezne faze.
6. Pojasnite razliko med gašenim, hidratiziranim in hidravličnim apnom.
7. Prikažite in pojasnite spremembe mavca, ki nastopijo pri njegovem vezanju, in naraščanje njegove tlačne trdnosti med vezanjem.
8. Narišite, opišite in pojasnite procese, ki tvorijo krog preobrazbe apna.
9. Naštejte in opišite posamezne lastnosti apna.
10. Opišite postopek proizvodnje portland cementa.
11. Katere mineralne dodatke se dodaja klinkerju med mletjem.
12. Iz katerih komponent je sestavljen cementni klinker in katere osnovne spojine jih tvorijo?
13. Prikažite časovni potek naraščanja trdnosti posameznih mineralov cementa in pojasnite, kako lahko uravnavamo proces strjevanja.
14. Pojasnite in na primeru prikažite sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1:2001.
15. Naštejte vrste cementov in mineralnih dodatkov kot jih navaja standard SIST EN 197-1:2001.
16. Navedite trdnostne razrede cementov v skladu s standardom SIST EN 197-1:2001.
17. Pojasnite razliko med portland cementom in aluminatnim cementom.
18. Kako uravnavamo lastnosti portland cementov z različnimi dodatki in katere posebne vrste cementov poznate?
19. Opišite proces hidratacije cementa.

20. Opišite vrste por, ki nastajajo na prehodu koloidnega sistema v cementni gel.
21. Prikažite razmere v cementni pasti pri vodocementnem količniku v/c = 0,38.
22. Opišite in z diagramom prikažite razmere v cementni pasti pri različnih vrednostih vodocementnega količnika.
23. Na kaj vpliva finost mletja cementa in kako jo določamo?
24. Kaj je to standardizirana konsistenca cementne kaše in kako jo določamo?
25. Prikažite in pojasnite časovni potek strjevanja cementne paste ter pojava lažnega vezanja in hitrega strjevanja.
26. Prikažite in pojasnite razvoj hidratacijske toplote med vezanjem cementa in s tem povezane pojave krčenja cementne paste.
27. Kaj vpliva na stabilnost prostornine cementne paste in kako jo preskušamo?
28. Pojasnite pojem tečenja in prikažite ter pojasnite vpliv hitrosti obremenjevanja na doseženo trdnost in modul elastičnosti cementnega kamna.
29. Kako določamo mehansko trdost cementa?
30. Kako določamo odpornost cementa na korozijo in s katerimi ukrepi lahko zmanjšamo njen vpliv?
31. Pojasnite, zakaj je pri pripravi cementne paste potrebno posebno pozornost posvetiti vodi in opišite vsaj tri primere vpliva škodljivih snovi v vodi?

6

MALTE IN BETONI

MALTE

Vrste malt in osnovne sestavine

Malte so vezna gradiva, ki nastanejo s strjevanjem homogene kašaste snovi sestavljene iz mineralnega veziva, agregata, vode in dodatkov. Dodatki izboljšujejo mehanske lastnosti, izolativnost, trajnost, obrabno odpornost, vodonepropustnost, zmrzlinsko odpornost in druge lastnosti malt. Zvišanje mehanskih lastnosti malt se lahko dosega tudi z dodajanjem mrežaste mikroarmature in polimernih vlaken. Kašasta snov se po pripravi in vgradnji strdi zaradi kemičnih in fizikalnih procesov, izmed katerih je najpomembnejša hidratacija veziv. Malte se uporabljajo za zidanje, ometavanje, izdelavo talnih oblog, zidov in stropov.

Sveža malta mora biti dovolj plastična, lepljiva in se mora dobro prilegati na površino. Strjena malta mora imeti zadostno trdnost, stalno prostornino, obstojnost na zunanje vplive itd.

Zračne malte vežejo in se strjujejo samo na zraku, hidravlične pa na zraku in v vodi. Vrste zračnih malt so:

- apnena (apno, pesek, voda),
- mavčna (mavec, voda; možno je dodati tudi pesek in apno),
- magnezitna (sorel-cement, voda, lesno žaganje),
- glinena (ilovica, voda, slama, pleva, pesek) in
- šamotna (šamotna moka, ognjeodporna glina v prahu, voda).

Vrste hidravličnih malt so:

- hidravlična apnena (pesek, voda, ali hidravlično apno ali navadno apno s hidravličnimi dodatki - pucolani, žlindra, opalska breča),
- cementna (cement, pesek, voda),
- podaljšana cementna (cement, apno, pesek, voda) in
- polimerna (polimerno vezivo, polnilo-pesek, kamena moka).

Večji del malte se sestoji iz agregata, ki je lahko naravnega ali umetnega izvora.

Naravni agregat se pridobiva iz naravnih nahajališč z odkopom iz aluvialnih nanosov ali v kamnolomih. Aluvialni agregat po preverjanju ustreznosti mineraloške sestave presejejo in očistijo z izpiranjem. Agregat iz kamnolomov pridobijo z lomljenjem večjih skalnatih gmot in ga nato razvrstijo s sejanjem v

frakcije. Pesek ima količinsko v malti največji delež, njegove karakteristike (sejalna krivulja, kemijska sestava, oblika) pa pomembno vplivajo na lastnosti malte tako v plastičnem kot v strjenem stanju.

Umetni agregat pridobivajo ali iz osnovnih surovin ali pa iz raznih odpadnih materialov in stranskih produktov industrije.

V prvo skupino sodijo tako imenovani posebni proizvodi, ki so projektirani za doseganje drugačnih lastnosti malt, kot so le-te pri naravnem agregatu. Pogost način proizvodnje je ekspandiranje naravnega materiala, ki se sestoji iz postopkov mešanja vhodnih surovin, njihovim žganjem in kontroliranim sušenjem. Med tovrstne agregate sodijo ekspandirana glina, ekspandirani vermikulit in ekspandiran perlit.

V drugo skupino se uvrščajo odpadni in stranski produkti različnih industrijskih procesov. Ob ekonomski upravičenosti je recikliranje pomembno tudi z ekološkega vidika. Najbolj znana tovrstna agregata sta žlindra (zgorevanje oglja in koksa) ter elektrofilterski pepel (zgorevanje premoga). Ti materiali morajo ustrezati točno določenim zahtevam, saj bi sicer lahko bili ekološko nevarni.

Veziva omogočajo povezavo agregata v kašasto zmes. Glede na svojo sestavo vežejo na zraku ali pa tudi v vodi. Posebne lastnosti malte se lahko dosegajo z uporabo polimernih dodatkov. Tovrstne malte so kompoziti, ki so sestavljeni iz keramičnih in polimernih materialov.

Dodatki omogočajo uravnavanje procesa vgradnje, strjevanja in lastnosti strjene malte. Večinoma se dodajajo v majhnih količinah suhemu vezivu ali vodi pri mešanju malte.

Plastifikatorji omogočajo lažjo vgradnjo malte zaradi povečanja njene plastičnosti. Po sestavi so običajno organske smole ali naravni in umetni detergenti.

Pospeševalci in upočasnjevalci vezanja vplivajo na časovni potek vezanja malt tudi v primerih manj ustreznih pogojev zaradi prenizkih ali previsokih temperatur okolja. Pospeševalci vezanja (akceleratorji) starejše generacije so bili sestavljeni na osnovi kloridov, novejši pa so sestavljeni na osnovi karbonatov, silikatov, aluminatov in organskih snovi. Upočasnjevalci vezanja (retarderji) se pogosto uporabljajo v tovarniško zamešanih maltah, ki se dobavljajo vlažne. Običajno so sestavljeni na osnovi sulfonatov in sladkorjev. Z uporabo upočasnjevalcev ostanejo malte nevezane in s tem uporabne od enega do treh dni po dobavi. Pri tem je treba paziti, da se malte v času do vgradnje ne izsušijo.

Aeratorji omogočajo vgrajevanje zračnih por v svežo malto. Aerirane malte imajo večinoma manjšo tlačno trdnost, slabšo sprijemnost ter krajšo življenjsko dobo. Vendar pa so zmrzlinsko bolj odporne in imajo manjšo toplotno prevodnost ter so hkrati tudi bistveno lažje.

omogočajo barvitost malte in s tem tudi ometov in ostalih oblog. Med najbolj zastopanimi pigmenti so mineralni oksidi, ki so inertni in kemično stabilni. Količina dodanega pigmenta znaša nekaj odstotkov mase veziva, vendar ne sme presegati 10%, saj s tem lahko občutno vpliva na tlačno trdnost malte.

Malte za zidanje

Malte za zidanje imajo s standardi predpisane lastnosti, kar zagotavlja doseganje ustrezne kakovosti in trdnosti. Po konsistenci se ločijo na tekoče in plastične. Za pripravo malt lahko uporabljamo različne agregate: rečni pesek, drobljenec, izkopani pesek, pri tem pa je pomembna ustrezna granulometrijska sestava in velikost maksimalnega zrna. Ta pri večini malt ne presega 4 mm. Pomembna je tudi čistost agregata (glinena zrna pod 1% v rečnem pesku in pod 1,5% v izkopanem pesku, organske snovi pod 0,01%).

Kakovost in primernost malt se preskuša v svežem in strjenem stanju. Preskuša se kakovost osnovnih sestavin (vezivo, pesek, voda, dodatki), konsistenca sveže mešanice ter trdnost, homogenost, vodonepropustnost, zmrzlinska odpornost in ostale lastnosti strjene malte.

Vsaka izmed osnovnih sestavin malt vpliva njene določene lastnosti:

- cement - trdnost, vodonepropustnost, odpornost, hitrost vezanja,
- apno - obdelovalnost, vodonepropustnost, elastičnost, lepljivost,
- pesek - trdnost, ekonomičnost,
- voda - plastičnost, hidratacijo, obdelovalnost.

Priprava malte

Malta se pripravlja ročno ali strojno. Pomembno je zaporedje mešanja posameznih komponent, ki pa ni enako pri vseh vrstah malt.

Apnena malta

Prostorninsko razmerje apna in peska je a:p = 1:1 do 1:4. Pripravi se v sledečem zaporedju dodajanja sestavin:

voda + gašeno apno → apneno mleko + pesek → plastična masa (malta)

Apneno malto pripravljeno iz gašenega apna je treba vgraditi najkasneje v 12 urah po pripravi. Pri vezanju sta potrebna voda in ogljik. Stalno dovajanje svežega zraka (prepih) in visoka temperatura okolja pospešujeta vezanje malte, mraz in zasičenost okolja z vlago pa ga zavirata.

Cementna malta

Prostorninsko razmerje cementa in peska je c:p = 1:1 do 1:4. Pripravi se v sledečem zaporedju dodajanja sestavin:

cement + pesek (suho mešanje) → dodajanje vode → plastična masa (malta)

Cementno malto je treba vgraditi takoj, pred začetkom vezanja cementa (okoli 1 ure). Strjevanje cementne malte je kemični proces hidratizacije cementa, pri kateremu se 15 - 20% vode veže, ostala količina pa izhlapi. Zato se cementna malta krči bolj kot apnena.

Podaljšana cementna malta

Običajna prostorninska razmerja cementa, apna in peska so c:a:p = 1:1:5, 1:2:5, 1:1:6, 1:2:6. Pripravi se v sledečem zaporedju dodajanja sestavin:

cement + apno + pesek (suho m.) → dodajanje vode → plastična masa (malta)

Podaljšano cementno malto se lahko vgradi nekoliko pozneje kot čisto cementno malto, kar pa je odvisno od deleža cementa. Proces vezanja je daljši, trdnost manjša od trdnosti cementne malte, večja pa je duktilnost in boljša je vgradljivost. Krči se manj kot cementna in nekoliko bolj kot apnena malta.

V preglednici 15 je prikazana odvisnost tlačne trdnosti apnenih, cementnih in podaljšanih cementnih malt od razmerja posameznih komponent.

Preglednica 15: Eksperimentalno določene trdnosti malt v odvisnosti od njihove sestave

Razred cementa (MPa)	Vrsta malte	Masno razmerje	Prostorninsko razmerje	Marka malte (MPa)
-	apnena a:p	1:3	1:1	0,5
35	podaljšana c:a:p	1:2:14	1:1:4,5	2,5
35	podaljšana c:a:p	1:2:11	1:1:3,5	5
45	podaljšana c:a:p	1:2:16	1:1:5	2,5
45	podaljšana c:a:p	1:2:13	1:1:4	5
35	cementna c:p	1:4	1:2,5	10
45	cementna c:p	1:5	1:3	10

Glinena malta

Uporablja se za zidanje z nežgano opeko in za obzidajo kurišč. Pripravlja se iz goste, dobro premešane in pregnetene kaše iz ilovnate gline z dodatkom pleve ali sesekljane slame. Pesek se dodaja v primeru, ko je ilovica premastna. Strdi se s sušenjem, voda pa jo ponovno zmehča.

Šamotna malta

Uporablja se za zidanje oblog kurišč in dimnikov s šamotno opeko. Pripravlja se v razmerju šamotna moka:ognjeodporna glina = 1:1 z dodajanjem vode. Otrdi s sušenjem in žganjem.

Malte za omete

Namen obdelave površin z malto - ometom je:

- izravnava površin in priprava podlage za barvo ali dodatno oblogo,
- zaščita zidu pred okoljem, vlago, mehanskimi poškodbami,

- izboljšava izolativnosti pred vodo, zvokom, ognjem, toploto, plini,
- izboljšava higienskih pogojev - olajšanje vzdrževanja zglajenih površin in
- doseganje estetskih učinkov.

Ločimo:

- malte za obdelavo notranjih in zunanjih površin zidov in stropov, ki se dodatno barvajo,
- dekorativne malte, ki vsebujejo barvo in dodatke za doseganje določene teksture in
- posebne malte - izolativne, odporne na obrabo, itd.

Omet se nanaša na zid ali strop, ki se je že ustalil (usedel, posušil). Podlaga mora biti enolična, hrapava, čista in dovolj vlažna. Za izvajanje zunanjih del je najbolj primeren čas spomladi in zgodaj jeseni. Omet in podlaga se morata približno enako raztegovati pri toplotnih spremembah. Če gre za materiale z zelo različnimi koeficienti toplotnega raztezka, je med podlago in malto potrebno dodati vmesno vezno plast. Tako je posebno pozornost treba posvetiti ometavanju lesenih ali kovinskih površin z mineralno malto. Včasih zadoščajo posebni dodatki k malti (polimerne emulzije), najbolj pogosto pa je treba uporabiti razne mrežice (rabic, polimerna mrežica pri demit fasadah, trska, plošče iz mavca ali lesenih ostankov-heraklit).

Malta se na zidove nanaša v plasteh. Običajno se s spodnjim grobim ometom doseže izravnava površine, z zgornjim finim ometom pa zaključni izgled. Z dvema ali več plastmi ometa se dosega želena stopnja zaščite površine.

Apnenemu ometu za zunanje površine se dodaja določena količina cementa, ki zvišuje njegovo trdnost. Odpornost na atmosferske vplive se je zviševala z dodajanjem lanenega olja in drugih naravnih polimerov, danes pa se uporabljajo dodatki izdelani na osnovi umetnih polimerov.

Mavčni omet se uporablja predvsem za pokrivanje notranjih suhih površin. Zaradi zaviranja strjevanja se dodajajo dodatki kot so apno, lepilo ali alkohol.

Cementni omet se uporablja tako za zunanja kot tudi za notranja dela. Običajna prostorninska razmerja cementa in peska so c:p = 1:3 in 1:5. Uporabljajo pa se tudi razmerja 1:1 in 1:2 tam, kjer se želi doseči večja vodonepropustnost ometa. Podaljšan cementni omet se uporablja večinoma v prostorninskih razmerjih c:a:p = 1:1:3 ali 1:1:6.

Pri zaključnih delih v gradbeništvu se uporabljajo različne vrste ometov med katerimi so spodaj navedeni najbolj pogosti.

- Omet z izgledom umetnega kamna, ki se pripravi iz cementa, kamnitega agregata in oksidne barve. Po strjevanju se mehansko površinsko obdela v globino od 1 do 2 cm. Posebna vrsta je prani kulir, ki se dobi z obdelavo delno posušene površine z curkom vode tako, da se cementna pasta odstrani z vrhnje plasti ometa in do izraza pridejo zrna agregata.
- Plemeniti suhi omet, ki se pripravi iz cementa, hidratiziranega apna, peska in oksidnih barv. Suha mešanica se pripravi na industrijski način in brizga na površino v dveh ali treh plasteh.
- Plastični omet se pripravi iz polimernega veziva, kamnitih zrn in kamnite moke ter pigmenta na industrijski način in brizga na pripravljeno površino.

Poškodbe ometov

Trajnost ometov je odvisna od njegove kakovosti, kakovosti podlage, obremenitev z mehanskimi vplivi in vplivi okolja. Najbolj pogoste poškodbe ometov so:

školjkasto luščenje zaradi večjih zrn živega apna, ki se v stiku z vlago gasi, nabreka in ruši strukturo ometa,

cvetenje ometa zaradi soli, ki se izločajo na podlagi (eflorescenca zidov) ali znotraj posameznih plasti ometa,

pokanje ometa zaradi krčenja pri prevelikih količinah cementa v mešanici,

odpadanje ometa zaradi slabo pripravljene podlage, slabe nege ometa med strjevanjem (cementni ometi), predčasnega sušenja ali zmrzovanja ometa,

pokanje ometa zaradi preobremenitve podlage (posedanje zidov) ali delovanje reg (dilatacij), ki ne smejo biti prekrite z ometom, in

delovanje alg in plesni na območju toplotnih mostov, kjer se kondenzira vlaga (slabo izolirana podlaga).

Polimerno modificirane malte

S polimeri modificirane malte so kompozitna gradiva, pri katerih je del cementnega veziva nadomeščen s polimernim vezivom. Delež polimernega veziva znaša od 3 do 25% mase cementnega veziva in v odvisnosti od količine vpliva na lastnosti malte. Polimeri se lahko dodajajo v obliki praškov, disperzij, vodotopnih polimerov, tekočih smol ali tekočih monomerov. Med najbolj uporabljanimi sta polivinilacetat in 100% akrilni polimer.

Z dodajanjem polimernih disperzij cementnim maltam vplivamo na njihovo obdelovalnost, zadrževanje vode, upočasnitev vezanja, trdnost, sprijemnost s podlago, vodotesnost, odpornost na udarce in obrus, odpornost na kemikalije, zmrzlinsko odpornost in odpornost na atmosferske vplive.

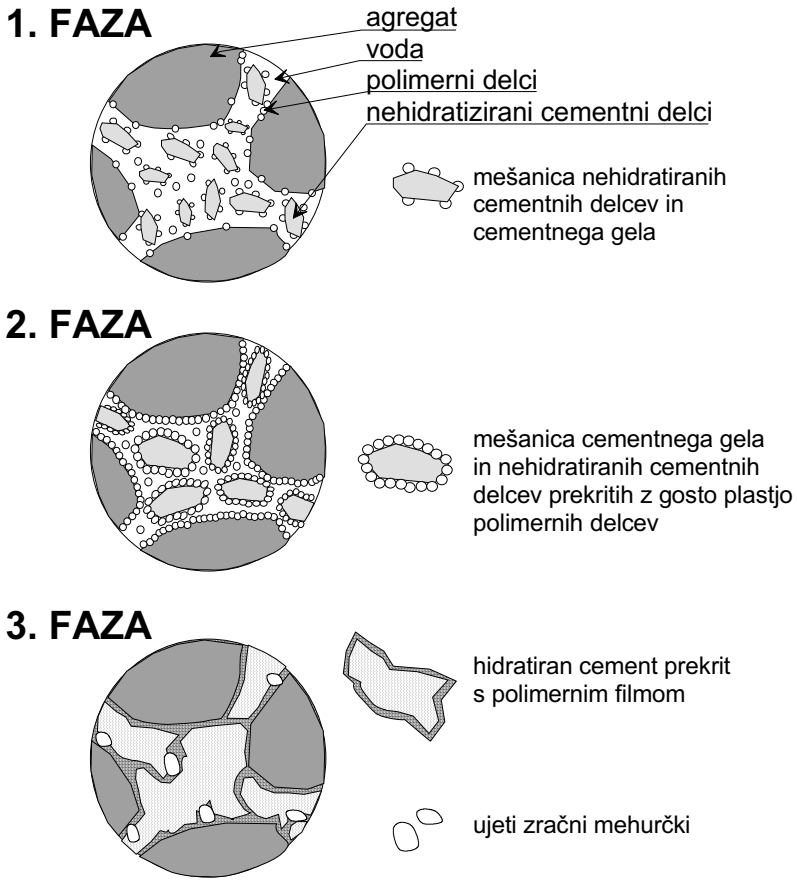
Naštete lastnosti so posledica oblikovanja polimernega filma, ki v času hidratizacije cementa ustvari monolitno matrico mrežaste strukture. Celoten proces poteka v treh fazah, kot to prikazuje slika 23.

Po mešanju malte so delci polimerov enakomerno razporejeni v sveži cementni malti. Na površino cementnega gela, na površino še nehidratiziranih cementnih delcev in na površino zrn agregata se postopoma odlagajo delci polimerov (1. faza). Na površini agregata se tvori tudi plast kalcijevega silikata, ki nastaja kot produkt reakcije med $Ca(OH)_2$ in silikatno površino mineralnega agregata.

Z nadaljevanjem hidratacije izgineva voda iz por in se zato delci polimera sprijemajo v zvezno in na gosto zbito plast, ki prekriva cementni gel in agregat ter zapolnjuje pore (2. faza). Nekateri polimeri lahko kemijsko reagirajo s silikatno površino agregatov.

Pri izteku procesa hidratacije cementa iz por skoraj povsem izgine voda. Iz gosto zbitih delcev polimera nastane nepretrgan film, ki tvori monolitno polimerno mrežo (3. faza). Ta mreža prepreda hidratiran cementni gel, zapolnjuje večje pore ter povezuje agregat in cementni gel.

Podoben proces poteka tudi pri polimerno modificiranih betonih.



Slika 24: Proces hidratacije in nastajanja polimernega filma v polimerno modificiranih cementnih maltah

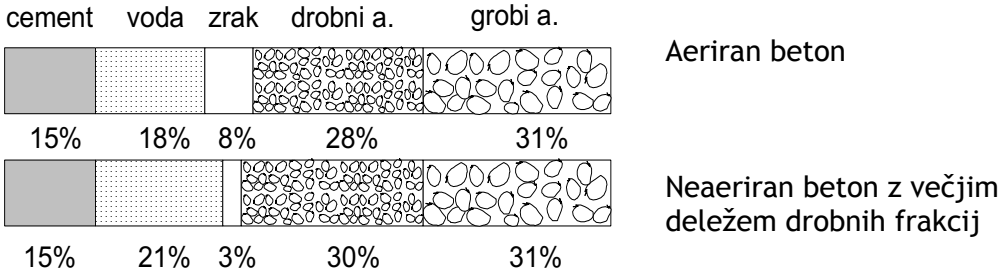
BETONI

Sveža betonska mešanica

Sestavine betonske mešanice

Beton je v ožjem pomenu keramični kompozitni material, pri katerem je mineralni agregat polnilo v matrici iz cementnega kamna. Cementni kamen otrdelega betona nastane v procesu hidratacije in strjevanja cementne paste. Ta nastane z mešanjem cementa, vode in različnih dodatkov, s katerimi se regulirajo lastnosti betona. Betonska struktura vsebuje določeno število odprtih in zaprtih por, ki jih zapolnjuje zrak. Poleg povsem mineralnih betonov se v graditeljstvu uporabljajo tudi betoni z organsko, bitumensko matrico (asfaltni betoni), ki so po sestavi keramično-polimerni kompozit. V to skupino sodijo tudi posebne vrste betona z mineralno matrico (cementni kamen) in organskimi agregati (npr. polistirenski agregat). V mineralnih betonih se lahko uporabijo tudi dodatki, ki so sestavljeni iz organskih spojin, ki modificirajo lastnosti keramičnega materiala (polimerne emulzije).

Cementna pasta, ki s strjevanjem preide v cementni kamen, tvori od 25 do 40% celotne prostornine betona (7 - 15% cementa, 14 - 21% vode). Na sliki 24 je prikazana sestava dveh vrst betonov: betona s povečano količino zaprtih por (aeriran beton) in betona normalne gostote s povečano količino drobnih frakcij.



Slika 25: Primerjava sestave aeriranega betona in betona normalne gostote

Agregat tvori večino betonske mase in je zato njegov izbor (zrnavostna sestava, čistost, oblika, primesi, itd.) ključnega pomena za kakovost in lastnosti betona. Drugi odločilni parameter je kakovost cementne paste, ki je odvisna od cementa, vode in posebnih dodatkov. V idealno projektiranem in izdelanem betonu je vsako zrno agregata oblepljeno s cementno pasto, vsi prostori med zrni so zapolnjeni, cementna pasta pa vsebuje le drobno zaprto poroznost (pri idealnem v/c = 0,38). Dejanske razmere se razlikujejo od idealnih, vendar razvoj tehnologije betona stremi k čim bolj idealnim razmeram.

Parameter, ki najbolj vpliva na lastnosti betona je vodocementno razmerje (razmerje med količino vode in cementa za pripravo cementne paste).

Zmanjšanje količine vode vpliva na sledeče lastnosti betona:

- zvišanje mehanskih lastnosti,
- zvišanje vodonepropustnost in znižanje absorptivnosti betona,
- zvišanje odpornosti na vremenske vplive in na agresivnost okolja,
- boljšo sprijemnost med plastmi betona in med betonom in armaturo,
- zmanjšanje prostorninskih sprememb pri sušenju in namakanju in
- znižanje števila in velikosti razpok zaradi krčenja.

Na splošno velja, da je velikost vodocementnega količnika (v/c) obratno sorazmerna kakovosti betona ob pogoju enake vgradljivosti. Zniževanje vodocementnega količnika zmanjšuje vgradljivost betona, zato se pri nizkih v/c poslužujemo posebnih dodatkov, ki prispevajo k zvišanju vgradljivosti. Toge betonske mešanice (nizek v/c) vgrajujemo s pomočjo vibratorjev, kjer tako vnesena energija povzroča večjo mobilnost zrn agregata in cementne paste. S tem se dosega tudi večja kompaktnost betona in boljše mehanske in tehnološke lastnosti materiala.

Dodatki, ki jih večinoma dodajamo vodi za pripravo betona, vplivajo na:

- časovni potek vezanja in strjevanja cementne paste,
- zmanjšanje potrebe po vodi,
- poboljšanje obdelovalnosti betona,
- vgradnjo zračnih mehurčkov in ustvarjanje zaprte poroznosti betona,
- reguliranje ostalih lastnosti betona.

Lastnosti sveže mešanice

Mešanje betona

Osnovne sestavine betona (agregat, cement, zrak, voda, dodatki) se morajo pazljivo zmešati v homogeno celoto. Pri tem je odločilnega pomena zaporedje dodajanja posameznih sestavin. Pomembno je, kdaj se doda voda v suho mešanico agregata in cementa ter kolikšna je hitrost obračanja bobna mešalca. Pomembna je količina mešanice glede na kapaciteto mešalca, čas polnjenja glede na čas mešanja, oblika ter stanje bobna in njegovih lopatic. Bobni dobrih mešalcev omogočajo izmenjavo materiala z enega na drugi konec bobna s kotaljenjem, pregibanjem in gnetenjem. Dodatki betonu se v večini primerov dodajajo v obliki vodne raztopine.

Konsistenca

Konsistenca betona je tisti parameter, ki določa plastičnost betona. Standardi predpisujejo metode določanja konsistence sveže betonske mešanice (Ve-Be metoda, metoda s posedom, metoda z razlezom, metoda z vibriranjem) in kriterije za posamezne stopnje konsistence (trdoplastična, srednjeplastična, mehkoplastična in tekoča). V splošnem velja, naj bo mešanica taka, da se jo lahko oblikuje z rokami. Tekoč beton uporabljamo pri betoniranju tankih profilov ali izjemno gosto armiranih elementov. Tak beton mora imeti vse lastnosti homogene betonske mešanice. Zato se plastičnemu betonu dodajajo supreplastifikatorji, ki povečujejo vgradljivost. Plastična mešanica omogoča izdelavo trdnega in homogenega betona, vendar je pri vgradnji potrebno nekaj več energije.

Vgradljivost

Stopnjo vgradljivosti betona določajo enostavnost vgrajevanja, konsolidacija sveže betonske mešanice in njeno končno oblikovanje (finalizacija).

Pri transportu in vgradnji betona morajo vsa zrna v plastični mešanici ostati enakomerno razporejena brez pojava segregacije in prekomernega izcejanja vode. Homogenost je lastnost, ki jo beton mora ohraniti vez čas vgrajevanja in strjevanja ter tako tvoriti homogen otrdeli beton. Beton je treba pripravljati kar se da blizu mesta vgradnje ali pa ga transportirati v ustreznih mešalcih. Zrak, ki je vgrajen v beton, zmanjšuje pojave segregacije in izcejanja vode.

Izcejanje vode

Izcejanje vode je pojav, pri katerem na vrhu sveže mešanice betona nastaja plast vode. Pojav je posledica istočasne sedimentacije trdnih delcev (cementnih in drobnih agregatnih zrn) in potovanja vode znotraj mešanice navzgor proti površju. Pri tem nastaja vrhnja plast betona s pretirano visokim vodocementnim količnikom. Ta plast ima nizko odpornost proti zunanjim vplivom, je neobstojna in ima slabe mehanske lastnosti. V ekstremnih primerih se na površini ustvarijo žepi in večje odprte pore kraterske oblike.

Po izhlapevanju izcejene vode je otrdela površina betona nižja od nivoja površine sveže betonske mešanice. Pojav se imenuje krčenje zaradi posedanja. Kapacitete izcejanja (posedek otrdelega betona na enoto višine sveže betonske mešanice) se povečuje z večanjem v/c-ja, z višino betonske plasti in z večanjem zunanjega tlaka. Vpliv in obseg izcejanja se da zmanjšati z ustrezno

granulometrijsko sestavo agregata, kemičnimi dodatki, aeriranjem, dodatnimi in nadomestnimi cementnimi materiali, in finejšimi cementi (cementi višje kakovosti). Zmanjševanje izcejanja je pomembno pri betonih, ki jih uporabljamo za zalivanje votlin, podpor in izdelavo nepropustnih plasti, ki med seboj dobro nalegajo.

Konsolidacija

Pri vgradnji z dovajanjem energije (vibratorji, nabijala) se delci svežega betona spravijo v gibanje, zmanjša se njihovo medsebojno trenje, mešanica pa pri tem prehaja v stanje gostega fluida. Vibriranje omogoča uporabo bolj toge mešanice z večjimi zrni, pri kateri je potrebna manjša količina cementne paste za oblivanje zrn agregata in s tem manjša potreba po vodi.

Vibriramo beton, ki ga ne moremo kvalitetno ročno vgraditi. Pri ročno vgradljivem betonu vibriranje lahko povzroči njegovo segregacijo. Med različnimi vrstami vibratorjev se najbolj pogosto uporabljajo vibratorji, ki so pritrjeni na kovinske opaže (izdelava prefabriciranih betonskih elementov) in vibratorji z iglo (vibriranje betonov pri neposredni vgradnji v konstrukcijo). Premeri vibracijskih igel so odvisni od frekvence vzbujanja vibracij (višje frekvence, tanjše igle). Pri visokofrekvenčnih vibratorjih (140 - 250 Hz) se uporabljajo igle premera od 20 do 40 mm pri nižjefrekvenčnih vibratorjih (70 - 140 Hz) pa igle premera od 130 do 180 mm.

Hidratacija, vezanje in strjevanje betona

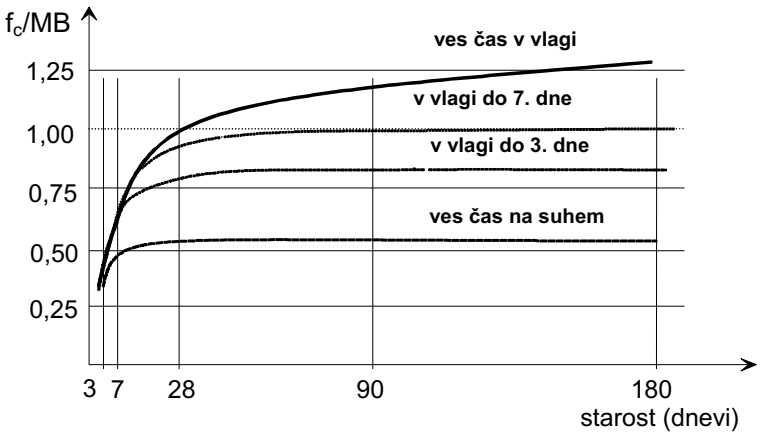
Proces spreminjanja sveže betonske mešanice v otrdeli beton je posledica prehoda cementne paste v cementni kamen (poglavje 6). Poroznost cementne paste bistveno vpliva na mehanske in tehnološke lastnosti tako sveže betonske mešanice kot otrdelega betona. Trdnejši betoni imajo manj odprtih in zaprtih por, kar pa je povezano v velikostjo vodocementnega količnika.

Poseben problem je razvoj hidratacijske toplote in njen vpliv na lastnosti cementnega kamna. Pri nizkih temperaturah okolja hidratacijska toplota delno varuje beton pred zmrzovanjem. Pri masivnih konstrukcijah (pregrade) hidratacijska toplota povzroča lokalne notranje obremenitve zaradi njenega neenakomernega odvajanja. Počasi vezoči cementi razvijejo v prvih treh dneh približno polovico hidratacijske toplote, hitrovezoči pa v veliko krajšem času. Načrtovanje časov transporta in vgradnje je možno le, če dobro poznamo proces hidratizacije uporabljene vrste cementa. Hitro strjevanje je zaželena lastnost potem, ko je beton že vgrajen. K pospeševanju vezanja prispeva sadra, ki se dodaja portland klinkerju med mletjem, finost mletja cementa, finost frakcij agregata, razni dodatki, količina vode in toplota materialov med njihovim mešanjem.

Otrdeli beton

Nega betona

Končna trdnost betona je odvisna od nege v času strjevanja, kot to kažejo diagrami na sliki 26.

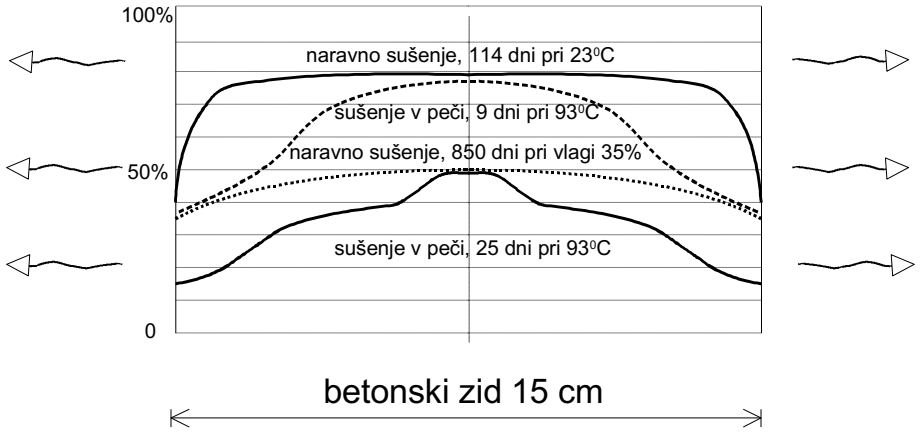


Slika 26: Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti betona

Trdnost betona narašča ves čas staranja, dokler se v cementni pasti še nahajajo nehidratizirana zrnca cementa. Proces lahko poteka nemoteno, če je relativna vlažnost okolja nad 80% in če je temperatura okolja dovolj visoka. Pri nižji vlažnosti in temperaturah pod mejo zmrzovanja, se hidratacija in naraščanje trdnosti praktično ustavita. Prekinjena hidratacija in naraščanje trdnosti se lahko nadaljujeta, če se izsušeni beton po celi svoji prostornini ponovno navlaži. Uvajanje vlage v izsušeni beton je praktično težko izvedljivo, zato je nujna nega betona z zagotavljanjem ustrezne vlažnosti okolja vsaj v prvem mesecu starosti betona. Na sliki 6-3 je prikazan vpliv vlažnosti okolja na rast trdnosti mladega betona.

Sušenje betona

Sušenje betona ne prispeva k njegovemu strjevanju, saj proces hidratizacije potrebuje vlago. Osušen beton ni vedno tudi beton, ki je dosegel predvideno stopnjo trdnosti, saj je zaradi pomanjkanja vlage del cementa lahko ostal nehidratiziran. Fizikalne lastnosti betona so bolj razumljive, če poznamo vplive stopnje suhosti na lastnosti otrdelega betona. Sušenje poteka od zunanjih površin proti notranjosti betonskega telesa. Hidratizacija poteka na mestih, kjer je vlažnost betona višja od 80%. Prehitro sušenje povzroča razlike med lastnostmi betona v notranjosti betonskega telesa. Tanke betonske plošče se pogosto površinsko luščijo, ker vrhnja plast betona ni hidratizirala zaradi hitre izsušitve (neustrezna nega betona). Med sušenjem se beton krči in poka. Število in širina razpok sta odvisna od hitrosti sušenja in stopnje izsušitve. Ne glede na hiter proces površinskega sušenja, se razmere v notranjosti spreminjajo počasneje. To dokazujejo tudi raziskave tega pojava. Na sliki 26 so prikazane razporeditve vlažnosti po prerezu 15 cm debele betonske stene, ki je bila izpostavljena različnim režimom sušenja. Preiskave so pokazale, da je vlažnost betona v sredini stene sušene po naravni poti padla na 50% šele po 850 dneh, večji del prereza pa ima približno 80% vlažnost po 114-ih dneh sušenja na zraku.



Slika 27: Vpliv naravnega in umetnega sušenja betona

Betoni, ki imajo v primerjavi s svojo prostornino razmeroma veliko odprto površino (plošče, stene), se sušijo veliko hitreje kot masivni betonski elementi (npr. stebri mostov). Količina vlage, ki je prisotna v betonu, vpliva na njegov modul elastičnosti, lezenje, izolativnost, ognjeodpornost, obrabnost, elektro prevodnost in trajnost.

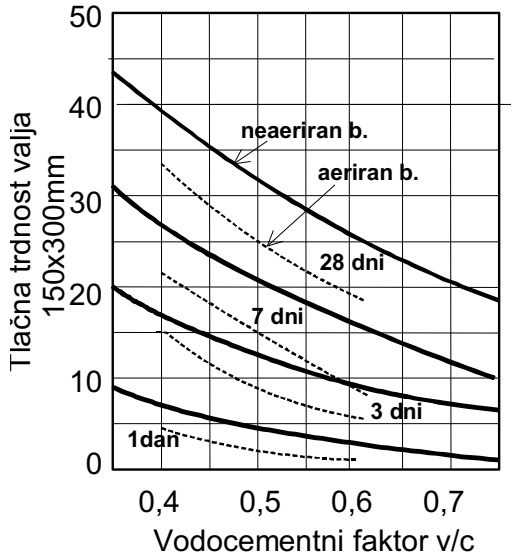
Mehanske lastnosti

Tlačna trdnost betona (f'_c) je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev pri starosti betona 28 dni. Tlačna trdnost betona se lahko preskuša na vzorcih v obliki kock ali valjev. Preizkušance moramo ves čas pred preiskavo hraniti v vodi ali v prostoru z najmanj 95% relativno vlago pri temperaturi 20±3°C. Na trdnost betona zelo vplivata vodocementni količnik (v/c) in stopnja dosežene hidratizacije cementnega kamna, ki je v normalnih razmerah proporcionalna starosti betona. Z večanjem v/c trdnost pada, s starostjo pa raste. Na sliki 6-5 sta prikazana primera vpliva vodocementnega količnika na trdnost določenega betona normalne poroznosti in aeriranega betona.

Karakteristična tlačna trdnost betona je vrednost, pod katero je za preiskani beton možno pričakovati največ 10% vseh rezultatov preiskav tlačne trdnosti (10% fraktilna vrednost).

Marka betona (MB) je normirana tlačna trdnost betona izražena v [MPa], ki izhaja iz karakteristične tlačne trdnosti pri starosti betona 28 dni. V projektu betonske konstrukcije se lahko določi tudi karakteristična tlačna trdnost betona pri starosti različni od 28 dni. Za armiranobetonske konstrukcije se ne uporabljajo betoni manjših mark od MB 15. Običajno se za armiranobetonske konstrukcije uporabljajo betoni od MB 20 do MB 35. Betoni marke višje od MB 40 se obravnavajo kot betoni visoke trdnosti. V praksi so že uporabili betone izjemno visokih trdnosti (MB 140).

Upogibna natezna trdnost betona je v sorazmerju s tlačno trdnostjo. Določa se z upogibnim preskusom betonskih prizem. Pomembna je pri dimenzioniranju hodnikov in plošč položenih na razmeroma podajno podlago. Njena velikost znaša približno 15% tlačne trdnosti betona ugotovljene s preskusom kock oz. 20% tlačne trdnosti betona ugotovljene s preskusom valjev.



Slika 28: Odvisnost trdnosti betona od vodocementnega količnika

Cepilna nateza trdnost betona je pomembna pri oceni obremenitev, pri katerih nastanejo razpoke v betonu. Preskuša se z zvezno linearno obremenitvijo po sredini nasprotnih ploskev kocke ali po tvorilkah plašča valjastih preskušancev. Njena velikost znaša približno 7% tlačne trdnosti betona ugotovljene s preskusom kock oz. 10% tlačne trdnosti betona ugotovljene s preskusom valjev. Ta trdnost je približno enaka natezni trdnosti betona pri enoosnem nategu. Razmerja med tlačno trdnostjo in ostalimi trdnostmi betona so odvisne od sestave betona in velikosti tlačne trdnosti. Pri višjih markah so natezne trdnosti procentualno manjše kot pri nižjih markah betona.

Modul elastičnosti betona se določa s preiskavami betonskih prizem. V predpisih so podani izrazi za izračun modulov elastičnosti na osnovi tlačne trdnosti betona. Zelo približno so vrednosti modulov elastičnosti okoli 1000 krat večje od tlačne trdnosti.

Gostota običajnih betonov znaša od 2200 do 2400 kg/m^3. Na gostoto vpliva sestava (granulacija agregata, poroznost) in vrsta agregata. Sveži beton je nekoliko bolj gost, saj količina vode, ki izhlapi med strjevanjem znaša od 0,5 do 3% mase betona. Minimalna gostota lahkih betonov znaša okoli 250 kg/m^3, maksimalna gostota težkih betonov pa tudi 6000 kg/m^3.

Tehnološke lastnosti betona

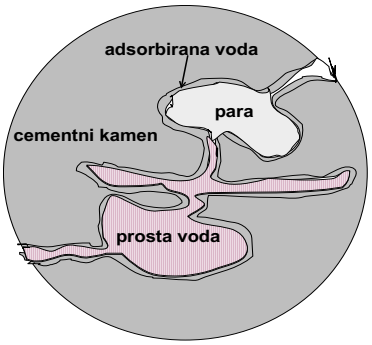
Obrabnost je pomembna pri betonih, ki se uporabljajo za površine, ki so izpostavljene mehanskim vplivom in tekoči vodi. Proporcionalna je trdnosti betona. Visoko odporni betoni so narejeni z nizkim vodocementnim količnikom, iz trdnega in trdega agregata (eruptivne kamnine) ter so površinsko ustrezno obdelani.

Vodotesnost je lastnost, ki jo morajo imeti betoni izpostavljeni atmosferskim in ostalim ekstremnim vplivom pri konstrukcijah, ki morajo zadrževati vodo brez vidnega prepuščanja. Določa se s količino pretoka vode skozi beton, ko le-ta deluje pod določenim pritiskom. Prepuščanje vode je odvisno od prepustnosti cementnega kamna in agregata ter razmerja med njima. Manj prepustni betoni so bolj odporni na vpliv kemikalij, ki se transportirajo kot

vodne raztopine. S to lastnostjo je neposredno povezana tudi zmrzlinska odpornost betona. Cementni kamen je manj prepusten, če je cementna pasta bila pripravljena z manjšo količino vode (nižjim vodocementnim količnikom), če je stopnja hidratacije visoka in če je bil beton negovan med strjevanjem. Ti parametri vplivajo tudi na znižanje stopnje segregacije in izcejanja, kar še dodatno prispeva k vodotesnosti betona. Aeracija betona prispeva k tesnjenju, vendar ne vpliva veliko na vodoprepustnost. Največji vpliv na vodotesnost pa imata razpokanost in odprta poroznost betona.

Prepustnost zrele cementne paste znaša od 0,1 10^{-12} cm/s do 120 10^{-12} cm/s pri vodocemnetnih količnikih od 0,3 do 0,7. Prepustnost kamnine agregata znaša od 1,7 10^{-9} cm/s do 0,35 10^{-12} cm/s. Zrel beton dobre kakovosti ima prepustnost okoli 10^{-10} cm/s.

Posebni betoni, ki se uporabljajo za drenaže, podloge tenis igrišč, letališke steze, parkirišča, pločnike itd. so izdelani tako, da imajo večjo vodoprepustnost. Taki betoni so narejeni iz granulacij agregata, ki vsebujejo zelo malo drobnih frakcij. Taki betoni so močno porozni, tako da se voda lahko pretaka med agregatnimi zrni in cementnim kamnom. Tak beton vsebuje v porah veliko zraka in je primeren tudi za toplotne izolacije.



Slika 29: Shematski prikaz vode v porah

Zmrzlinska odpornost je pomembna lastnost, ki prispeva k trajnosti betona. Cikli zmrzovanja in tajanja znižujejo življenjsko dobo betona, prisotnost kemikalij (soli, kisline) pa dodatno pospešuje proces propadanja betona (prometnice, fasade). Zmrzlinska odpornost se lahko zviša z aeracijo betona, saj sistem zaprtih por ovira pretok vode in nastajanje ledu. Odprte pore v agregatu so bolj nevarne od por v cementnem kamnu, ker so praviloma tanjše. Zato lahko dodatne notranje obremenitve zaradi nabrekanja ledu povečajo notranjo razpokanost betona.

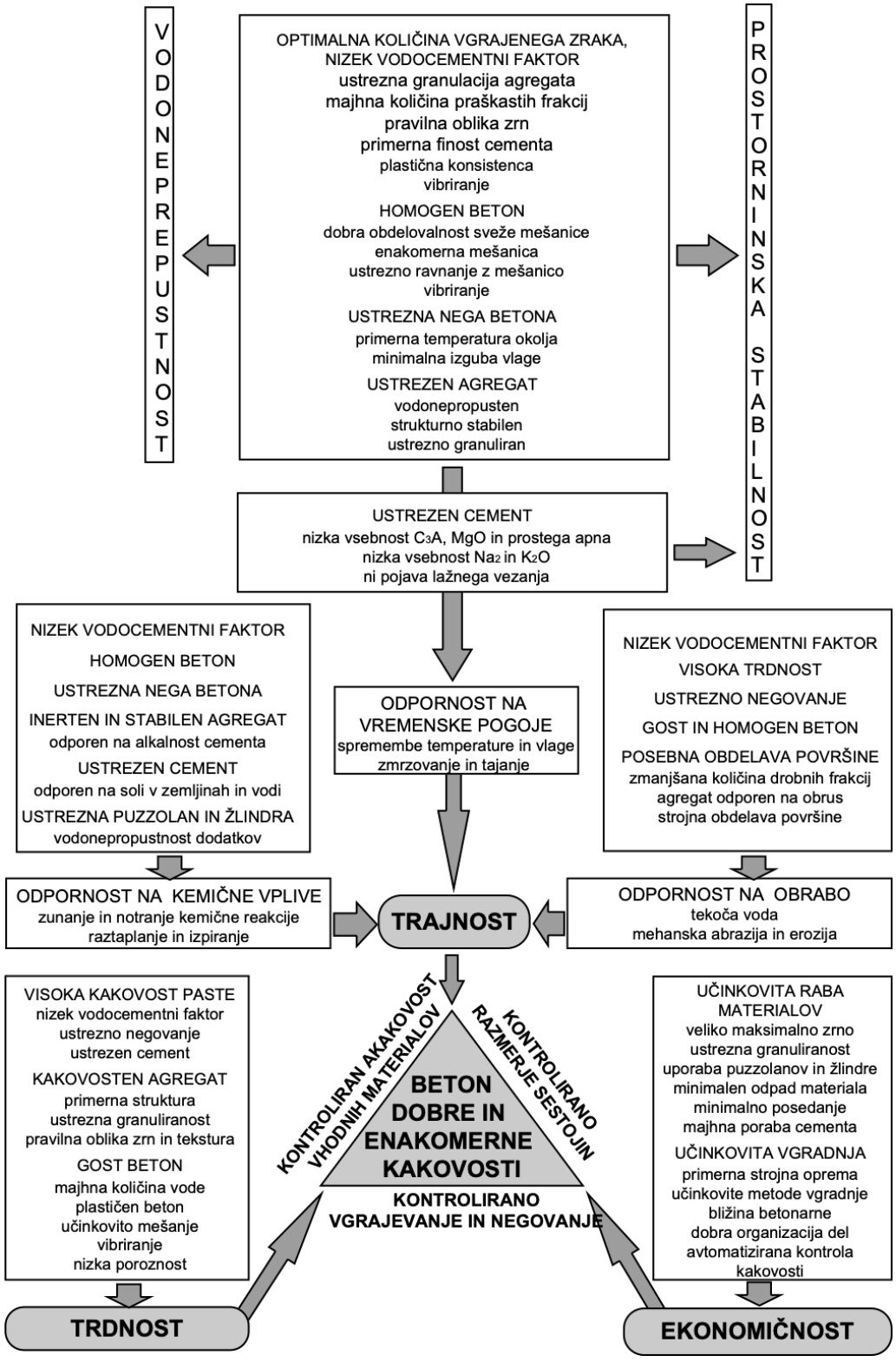
Pri betonih višje kakovosti (z nižjim v/c) je agregat manj prepojen z vodo in je zato učinek zmrzovanja manjši. Med aeracijo betona se del vode izcedi iz agregata, kar še dodatno prispeva k večji zmrzlinski odpornosti betona. Zmrzlinsko so zelo odporni betoni z nizkim vodocementnim količnikom in od 4% do 8% stopnjo aeracije. Taki betoni zdržijo veliko ciklov zmrzovanja in tajanja brez pojava poškodb.

Prostorninska stabilnost betona vpliva na njegovo delovanje znotraj konstrukcijskega sistema v katerega je vgrajen. Otrdeli beton rahlo spreminja prostornino zaradi temperaturnih sprememb in sprememb vlage okolja in obremenitev. Spremembe so reda velikosti od 0,1 do 0,8‰. Koeficient linearnega toplotnega raztezka betona (α_t = 10^{-6} /°C) je enakega velikostnega

reda kot pri jeklu, kar v armiranem betonu omogoča sodelovanje armature in betona.

Beton, ki je izpostavljen stalni vlagi, rahlo nabreka, ko pa se osuši, se skrči. Obseg nabrekanja in krčenja je sorazmeren z velikostjo vodocementnega količnika. Poleg tega ima vpliv tudi granulacija in vrsta agregata, oblika betonskega telesa, relativna vlažnost in temperatura okolja, način nege betona med strjevanjem, stopnja hidratacije betona itd. Pojavi elastičnega deformiranja in tečenja zaradi delovanja obtežbe dodatno prispevajo k spremembam oblike in prostornine betona.

Na kakovost betona in njegovo odpornost na zunanje vplive ter ekonomičnost vplivajo mnogi parametri, kot je to prikazano v nadaljevanju. Pregledno prikazani vpliv na lastnosti betona lahko služi kot vodilo za pripravo betonov optimalnih lastnosti.



Slika 30: Shematičen prikaz glavnih lastnosti dobrega betona, njihovega medsebojnega vpliva in elementov, ki vplivajo na njegove lastnosti

Vrste betonov

Osnovna vrsta betona je sestavljena iz standardno granuliranega mineralnega agregata in portland cementa z manjšo količino dodatkov. Značilna gostota običajnih betonov je 2400 kg/m^3 in trdnost v razponu od 15 do 40 MPa. Različne zahteve narekujejo tudi uporabo na različne načine sestavljenih in modificiranih betonov. Posebne vrste betonov se dobijo z variiranjem količine ali sestave osnovnih komponent in z dodajanjem različnih dodatkov, ki omogočajo modifikacijo lastnosti betonov. Med modificirane betone sodijo tudi tisti, pri katerih se z dodajanjem polimerov k cementnem vezivu ali večinskim nadomeščanjem le-tega s polimernim dosegajo kompozitni materiali podobni betonom. Iz nazivov betonov se da sklepati, katere njihove lastnosti so poudarjene v primerjavi z običajnimi betoni. V nadaljevanju bomo obravnavali:

- konstrukcijske betone nizke gostote in običajne trdnosti,
- konstrukcijske betone nizke gostote in nizke ter srednje trdnosti,
- konstrukcijske betone visoke gostote,
- konstrukcijske betone visoke trdnosti,
- konstrukcijske betone zgodnje visoke trdnosti,
- masivne betone,
- prepakirane betone,
- valjane betone,
- zemljo-cementne betone,
- brizgane betone (torkretni betoni),
- betoni s kompenziranim krčenjem (neskrčljivi in nabrekajoči betoni),
- porozne betone,
- bele in barvane betone,
- polimer-portland cementne betone,
- ferocemente in
- vlaknasto armirane betone.

Konstrukcijski betoni nizke gostote in običajne trdnosti

Značilnost lahkih in pollahkih betonov je njihova manjša gostota v primerjavi z gostoto običajnih betonov. Uporabljajo se kot nekonstrukcijski in kot konstrukcijski betoni. Gostota lahkih betonov znaša od 240 do 1850 kg/m^3, gostota pollahkih pa med 1850 in 2150 kg/m^3. Trdnosti lahkih in pollahkih betonov so v razponu od 0,7 do 40 MPa. Med konstrukcijske betone sodijo tisti s trdnostjo nad 15 MPa.

Te vrste betoni so sestavljeni iz drobnih frakcij agregata normalne gostote in iz grobih frakcij lahkega agregata. Uporabo takih betonov pogojuje ekonomičnost, saj so lahki agregati dražji od običajnih, zmanjšana gostota celotnega betona pa omogoča prihranke pri zasnovi konstrukcije in njeni uporabi. Stroški se zmanjšujejo zaradi zmanjšanja lastne teže konstrukcije in od tod tudi zmanjšanja potrebne količine armature in stroškov temeljenja. Dodatna prednost je tudi možnost doseganja višje požarne odpornosti betona.

Lahki agregati, ki se uporabljajo za izdelavo lahkih in pollahkih betonov so :

- v rotacijski peči ekspandirane gline in skrilji,

- sintrane ekspandirane granule gline ali skriljev (Leca, Keramzit),
- ekstrudirani elektrofilterski pepeli in
- ekspandirana žlindra.

Gostota naštetih agregatov znaša od 560 do 1120 kg/m^3, kar je od 1,5 do 2 krat manj od gostote običajnih agregatov. Značilnost lahkih agregatov je njihova velika higroskopnost zaradi večje poroznosti. Lahki agregati vpijejo do 20% vode glede na njihovo maso in jih je pred uporabo treba navlažiti do zasičenosti.

Značilna **tlačna trdnost** lahkih in pollahkih betonov, ki se uporabljajo za konstrukcije znaša od 20 do 35 MPa. Obstajajo tudi tehnološki postopki s katerimi se lahko dosegajo tudi višje tlačne trdnosti pollahkih betonov, kar pa je povezano z višjimi stroški. Projektiranje tovrstnih betonov mora spremljati tudi preskušanje svežih mešanic in otrdelega betona zato, ker lastnosti lahkega agregata močno vplivajo na vodocementni količnik. Poroznost agregata, njegova površinska sprijemnost in trdnost zrn so lastnosti, ki lahko bistveno vplivajo na trdnost betona.

Z **aeriranjem** se lahko doseže povečana zmrzlinska odpornost, boljša obdelovalnost, manjša segregacija in izcejanje pri lahkih in pollahkih betonih. Stopnja aeracije je prilagojena velikosti maksimalnega zrna in se giblje v razponu od 4 do 9%.

Lahki in pollahki betoni se **mešajo** na podoben način kot običajni betoni, le da so hitrosti in smeri mešanja prilagojene lastnostim lahkega agregata, ki ga je pogosto treba dodatno navlažiti pred mešanjem. Ustrezna **obdelovalnost** betonov se dosega s prilagoditvijo količine cementne paste lastnostim agregata in količini drobnih frakcij. Zaradi manjše teže grobih frakcij agregata je pri enaki konsistenci v primerjavi z običajnim betonom posedanje manjše. Pri redkejši konsistenci obstaja nevarnost segregacije grobega agregata, ki pogosto izplava na površino betona. To je treba upoštevati tudi pri vgrajevanju betona z vibriranjem. Lahki in pollahki betoni so lažje vgradljivi kot običajni betoni. Najlažje se vgrajujejo betoni mehkoplastične konsistence.

Konstrukcijski betoni nizke gostote in nizke ter srednje trdnosti

Gostota betonov nizke gostote in nizke trdnosti znaša od 240 do 800 kg/m^3, trdnost pa od 0,7 do 7 MPa. Gostota betonov nizke gostote in srednje trdnosti znaša od 800 do 1900 kg/m^3, trdnost pa od 7 do 15 MPa. Obe vrsti betonov se uporabljajo za izdelavo termalnih in zvočnih izolacij, kritin, izravnalnih površin, požarnih zidov, blokov za izgradnjo zidov, predizdelanih armiranih panelov za zidove, strehe in strope. Glede na njihovo sestavo jih lahko razdelimo v tri skupine:

Skupina I: Betoni sestavljeni s pomočjo ekspandiranih agregatov, kot so perlit, vermikulit in polistiren, gostote od 240 do 800 kg/m^3.

Skupina II: Betoni sestavljeni iz ekspandiranih, sintranih ali kalciniranih agregatov (žlindra, glina, pepel) in tufov, gostote od 720 do 1440 kg/m^3.

Skupina III: Celičasti betoni narejeni z vnosom celičaste strukture v cementno pasto. Celičasta struktura se lahko ustvari z vnosom pene v beton običajnih lastnosti na mestu vgradnje (penobeton) ali z penastim agensom (aluminijev prah) v posebej sestavljeni betonski mešanici v proizvodnih obratih (siporex). Gostota je v razponu od 240 do 1900 kg/m^3 in je odvisna tudi od zapolnjenosti betona z zračnimi porami. Ta lahko doseže tudi 80% prostornine. Celičasti betoni so lahko nizke ali srednje trdnosti.

Betoni iz prve skupine vsebujejo od 25 do 35% zraka. Pri njihovi izdelavi je potrebno omejiti količino vode na najmanjšo možno mero zaradi doseganja ustrezne izolativnosti, zmanjšanja vplivov krčenja in onemogočanja nastanka razpok, ki bi lahko uničile sistem vodonepropustnih celic. Pri izdelavi betonov iz druge skupine so običajna mešalna razmerja 100 kg cementa na 0,24 do 0,90 m^3 agregata.

Obdelovalnost tovrstnih betonov je odlična zaradi velike vsebnosti zraka zlasti še pri betonih gostote manjše od 800 kg/m^3. Celičasti betoni se pri vgradnjo obnašajo kot tekočina in jih ni treba posebej komprimirati. Njihova toplotna prevodnost je obratno sorazmerna gostoti in vlažnosti. Betoni, ki dosegajo trdnosti do 1 MPa, so primerni za izolacijo podzemnih parovodov. Betoni, ki jih uporabljamo za strešne izolacije, morajo razmeroma hitro pridobiti na trdnosti zaradi pohodnosti. V takih primerih običajno zadoščajo trdnosti od 0,7 do 1,5 MPa, vendar se pogosto zahtevajo trdnosti okoli 3,5 MPa. Šibka lastnost teh betonov je razmeroma veliko krčenje zaradi velike poroznosti. Krčenje znaša od 0,1 do 0,6% in je odvisno od vrste in količine agregata. Običajni betoni se od 2 do 10-krat manj krčijo.

Konstrukcijski betoni visoke gostote

Visoka gostota betonov se dosega predvsem z uporabo agregatov visoke gostote. Značilni **težki agregati** so barit, ferofosfor, hematit, limonit, magnetit, ki večinoma vsebujejo železo ali druge kovine. Kot agregat se lahko uporabljajo tudi kovinski opilki in svinčene kroglice. Med srednje težke agregate sodita tudi boksit in serpentin, ki imata kristalno vezano vodo. Poseben pomen ima izbira čistega agregata zrn pravilnih oblik. S težkimi agregati se lahko dosežejo gostote betona do 4650 kg/m^3, višje gostote pa se lahko dosežejo le z dodajanjem opilkov in svinčenih kroglic.

Betoni visoke gostote se uporabljajo za izdelavo zaščitnih zaslonov pred različnimi sevanjimi in za izdelavo uteži in balastov. Težki betoni učinkovito ščitijo pred žarki x, γ in nevtroni zlasti še v primerih, ko se lahko uporabijo poljubne debeline betonskih zaslonov. Betoni večje gostote bolje ščitijo pred žarki γ, pred nevtroni pa ščiti tudi kristalno vezana voda v mineralih, iz katerih je sestavljen agregat. Borokalcit kot dodatek betonu še poveča izolativnost pred nevtroni, po drugi strani pa lahko škodljivo vpliva na proces strjevanja betona in vezanja cementa.

Lastnosti težkih betonov se lahko variirajo z ustrezno izbiro materialov. Težki betoni se po ostalih fizikalnih lastnostih ne razlikujejo veliko od običajnih

betonov. Lahko se vgrajujejo na klasičen način, vendar se pogosto uporablja metoda prepaktiranja. Med opaž se vgradi ustrezno granuliran agregat v katerega se nato pod pritiskom dovaja mešanica cementa, peska in vode. Tovrstna vgradnja je lažja od klasične zlasti še, ker uporaba črpalk pri vgradnji težkih betonov redko pride v poštev. Ena izmed metod vgradnje je tako imenovani "puddling". Pri tem postopku se na plast cementne paste debeline 50 ali več mm položi težki agregat, ki se z vibriranjem pomeša s cementno pasto. Postopek se ponavlja do želene debeline betonske plasti.

Konstrukcijski betoni visoke trdnosti

V sodobni gradbeni praksi se vse bolj uveljavljajo betoni visokih trdnosti, to je trdnosti od 40 do 140 MPa. Ko se uporabljajo za izdelavo elementov, ki so obremenjeni po daljšem času, se trdnost betona določa pri starosti 56 dni ali celo 90 dni namesto običajnih 28 dni.

Betoni visoke trdnosti se izdelujejo iz mešanic visoko kakovostne sestave in goste konsistence ob skrbni kontroli vhodnih materialov in postopkov proizvodnje. Kontrola proizvodnje je lažja v obratih za izdelavo montažnih elementov. Na gradbišču se uporabljajo trdni opaži, v katere se beton vgrajuje s podaljšanim vibriranjem ali stresanjem. Pogosto se uporabljajo tudi različni dodatki, med katerimi so tudi supreplastifikatorji in zmanjševalci potrebe po vodi. S tem se zniža vodocementni količnik in poveča učinkovitost cementov in nadomestnih cementnih materialov (silika, žlindra). Dodajanje zraka ni zaželeno niti potrebno, saj se visokotrdni betoni uporabljajo v okoljih, kjer jih ne ogroža zmrzovanje in tajanje.

Poseben pomen ima izbor materiala za izdelavo visokotrdnih betonov. Zato je faza projektiranja takih betonov ključnega pomena, projektant betona pa mora dobro poznati lastnosti uporabljenih materialov in jih mora po potrebi tudi sproti preverjati z laboratorijskimi preizkusi.

Agregati morajo biti pozorno izbrani in vse tiste lastnosti, ki se zahtevajo od dobrih agregatov morajo biti dosežene. Na kakovostno sestavo betonske mešanice vplivajo torej trdnost, velikost, oblika, površinska tekstura, mineraloška sestava in čistost agregata ob pogoju ustrezne granulometrijske sestave. Izkazalo se je, da se najboljši betoni dosegajo z agregati, kjer je maksimalno zrno do 16 mm, vendar se v posameznih primerih visokotrdni betoni dajo izdelati tudi z bolj grobim agregatom. Pomemben parameter je trdnost stika med cementnim kamnom in zrnom agregata. Zaradi tega imajo lomljeni agregati nekatere prednosti pred oblimi. V nekaterih primerih je potrebno površine agregata temeljito sprati in s tem odstraniti fine mineralne delce. Pri uporabi večje količine cementa je to treba upoštevati pri granulometrijski sestavi agregata z zmanjšanjem deleža drobnih frakcij.

Zaželene so tiste vrste cementov, ki dolgo pridobivajo na trdnosti, po 7 dneh pa morajo doseči vsaj 30 MPa trdnosti. Pri tem je treba poznati tudi njihove trdnosti pri starosti 28, 56 in 90 dni. Običajna količina cementa, ki se porabi za m^3 visokotrdnega betona je od 400 do 550 kg. Cementu se običajno dodajajo tudi mikrosilika ali elektrofilterski pepel v količini od 5 do 20% mase cementa. Pri tem pa je treba paziti, da se vodocementni količnik prilagodi zahtevani konsistenci svežega betona, ki naj bi bila srednjeplastična ali mehkoplastična.

Visokotrdni betoni se morajo vgrajevati zelo pozorno in brez zamud, ki bi lahko povzročile prezgodnje vezanje betona pred vgradnjo. Beton je treba vibrirati

takoj po vgradnji z visokofrekvenčnim vibratorjem ustrezne velikosti. Preveliki vibratorji lahko povzročijo segregacijo. Posebno je pomembna dovolj dolga nega vgrajenega betona. Pri mešanju betona v betonarni mora biti vzpostavljena stroga kontrola proizvodnje zaradi zagotovitve enakomerne kakovosti betona.

Konstrukcijski betoni z zgodnjim doseganjem trdnosti

V gradbeni praksi se občasno pojavi potreba po betonih, ki v kratkem času od nekaj ur do nekaj dni morajo doseči razmeroma visoko trdnost. Tovrstni betoni se uporabljajo za izdelavo prednapetih elementov, ki jih je treba montirati kmalu po njihovi izdelavi, pri sanacijskih ukrepih, betoniranju v hladnih okoljih, betoniranju vozišč, ki jih je treba hitro usposobiti za uporabo itd.

Take betone lahko sestavimo z običajnimi sestavinami in posebnimi postopki ali pa z uporabo posebnih dodatkov.

Najbolj pogosto se uporabljajo naslednji dodatki oz. vrste materialov in postopki:

- hitrovezoči cementi,
- cementi z reguliranim časom vezanja in ostale vrste posebnih cementov,
- mikrosilika ali pucolani,
- kemični dodatki,
- povečana količina običajnih cementov (400-600 kg/m^3 betona),
- nizek vodocementni količnik (v/c od 0,2 do 0,45),
- segrevanje sveže betonske mešanice,
- segrevanje betonske mešanice v času nege betona,
- izolacija betona, ki zadržuje hidratacijsko toploto,
- nega betona z dovajanjem toplote s paro ali v avtoklavih.

Masivni betoni

Pri velikih konstrukcijah kot so ločne pregrade se betoni vgrajujejo v masovnih količinah. Pri tem se od takih betonov zahtevajo določene lastnosti, ki vplivajo na njihovo ekonomičnost in tehnološko primernost. Poseben problem pri masovnih betonih sta vpliv hidratacijske toplote in krčenja. Značilnost masivnih betonov je njegova vgradnja v pasovih širine od 0,6 do 1 m in sestava, pri kateri je količina cementa nad 350 kg/m^3.

V primeru, ko se beton vgrajuje v velikih blokih in ima razmeroma nizko količino cementa ter razmeroma nizko trdnost, se temperatura ne sme dvigniti za več kot 10 do 15°C nad povprečno letno temperaturo okolja. Ta problem nastopi zlasti pri izvedbi tako velikih objektov kot so ločne pregrade. Zaradi tega je treba poskrbeti za znižanje hidratacijske toplote. To se lahko doseže z naslednjimi ukrepi:

- uporaba razmeroma majhne količine cementa za pripravo betona
- (120 - 270 kg/m^3)
- uporaba večje količine grobega agregata, ki odvaja toploto (okoli 80% grobega agregata z maksimalnim zrnom od 75 do 150 mm),
- uporaba cementov, ki razvijajo nizko hidratacijsko toploto,
- uporaba nadomestkov cementa (žlindra, pucolani)

- redukcija začetne temperature betona na okoli 10°C s hlajenjem materialov za pripravo betona,
- hlajenje vgrajenega betona s pretokom hladne vode skozi vgrajene cevi,
- uporaba jeklenih opažev, ki hitro odvajajo toploto,
- nega betona s hladno vodo in
- z nizkimi plastmi betoniranja (največ do 1,5 m).

Prepaktirani betoni

Značilnost prepaktiranega betona je vgradnja posameznih komponent betona v dveh fazah. Med opaž se najprej nasuje agregat ustrezne granulometrijske sestave in nato se injektira cementna pasta z dodatki. Lastnosti prepaktiranih betonov so podobne lastnostim običajnih betonov. Prepaktirani betoni se manj krčijo pri toplotnih spremembah in pri sušenju, ker je agregat vgrajen bolj kompaktno. Granulacija agregata je sestavljena tako, da je med zrni okoli 40% praznin, ki jih zapolni cementna pasta. Injekcijska masa je sestavljena iz cementa, vode, dodatkov in finih frakcij večinoma med 1,25 mm in 2 mm.

Prepaktirani betoni se uporabljajo pri sanacijskih delih, za izdelavo zaslonov, ki ščitijo pred žarčenjem (težki betoni), za podbetoniranje zgradb posebnega pomena (reaktorske posode), za izgradnjo stebrov mostov in za izgradnjo podvodnih objektov. V visokogradnji se tovrstni betoni uporabljajo zaradi doseganja posebnih arhitekturno-estetskih učinkov s pranjem površine betona kmalu po njegovi vgradnji.

Valjani betoni

Valjani betoni so betoni trde konsistence, ki se kompaktirajo s pomočjo vibracijskih valjarjev ali žab. Ti betoni so skoraj suhi in zelo pusti, saj vsebujejo od 60 do 360 kg cementa na m^3 betona. Valjani betoni se uporabljajo pri hitri izgradnji velikih težnostnih pregrad, parkirišč ob avtocestah, manj pomembnih cest, servisnih površin na letališčih, podlog vozišč itd. Pri izgradnji pregrad so običajne trdnosti valjanega betona od 7 do 30 MPa, vendar pa se s to tehnologijo lahko dosežejo tudi višje trdnosti. Valjani beton se vgrajuje v plasteh debeline 20 do 30 cm tako, da je možna ustrezna komprimacija. Pri večplastni vgradnji betona je treba poskrbeti za dobro povezavo plasti.

Zemljo-cementni betoni

Zemljo-cementni betoni so mešanica zdrobljene ali granulirane zemljine, cementa in vode. Zemljina je lahko poljubna kombinacija peska, gline, mivke, gramoza, tehničnega kamna, recikliranega zdrobljenega materiala pridobljenega z rekonstrukcijo vozišč itd. V teh betonih se uporablja od 80 do 225 kg cementa na m^3 betona. S tem se lahko dosegajo trdnosti od 2 do 5 MPa po 7 dneh in končne trdnosti do okoli 20 MPa.

V cestogradnji so ti betoni znani tudi pod imeni "cementna stabilizacija" ali "cementno modificirana zemljina". Mešanica se kompaktira do visoke gostote in postane trden in trajen material po hidrataciji cementa. Pogosto se uporablja za izdelavo temeljne plasti prometnic, čez katero se polaga bitumenski beton ali običajni (portlandcementni) beton. Zemljo-cementni beton je primeren tudi za izdelavo podlag pod temelji, stabilizacijo brežin vodotokov in zemeljskih pregrad.

Brizgani betoni (Torkret, Shotcrete)

Brizgani beton je groba cementna malta ali beton, ki se z veliko hitrostjo s pomočjo stisnjenega zraka nanaša na površino konstrukcije. Velikost maksimalnega zrna agregata znaša do 16 mm. Postopek so razvili leta 1911 in je do danes ostal praktično nespremenjen. Razmeroma suha mešanica se konsolidira na navpičnih ali vodoravnih površinah. Uporablja se za izdelavo novih konstrukcij (obloge tunelov, športni objekti - steze za bob) in sanacijo obstoječih konstrukcij. Tehnologija brizganja betona je zlasti primerna za izdelavo tenkih lupinastih konstrukcij razgibanih oblik. Dosežena trdnost je odvisna tudi od kakovosti izvedbe in usposobljenosti izvajalca, je pa lahko podobna trdnosti običajnih betonov.

Uporabljata se dva postopka: suhi in mokri. Pri suhem postopku se zmes cementa in vlažnega agregata s stisnjenim zrakom potiska do ustnika brizgalke, kamor se po ločeni cevi dovaja voda. Tako dobljena mešanica se brizga na površino konstrukcije. Pri mokremu postopku se sestavni deli betona predhodno zmešajo. S pomočjo stisnjenega zraka se mešanica potiska skozi ustnik brizgalke, kamor se po posebni cevi dovaja stisnjen zrak, ki še poveča hitrost brizganja mešanice na konstrukcijo. Pri tem velja omeniti, da morajo biti opaži, ki so opora novonastajajoči konstrukciji, dovolj trdni, da zdržijo obremenitve med nanašanjem brizganega betona.

Betoni s kompenziranim krčenjem (neskrčljivi in nabrekajoči betoni)

Betoni s kompenziranim krčenjem se proizvajajo s pomočjo ekspanzijskih cementov ali z dodajanjem ekspanzijskih dodatkov običajnim cementom. Beton nabreka med hidratacijo cementa do nekoliko večje prostornine od potrebne končne prostornine. Zato je po krčenju nabreklega betona prostornina približno taka, kot je predvidena brez vpliva krčenja. Armatura se po ekspanziji betona obremeni z nategom, pri krčenju pa se večji del te napetosti sprosti. Deformacije nabrekajočega betona imajo nasprotni predznak glede na deformacije pri krčenju betona, kar zmanjšuje pojav razpok zaradi krčenja.

Porozni betoni

Porozni betoni so sestavljeni iz grobih frakcij približno enake velikosti zrn brez večje količine finih zrn. Količina cementne paste je omejena tako, da ne zalije vseh praznin med zrni agregata. Pri tem se uporablja nizek vodocementni količnik, zato je beton suh. Obremenitve se prenašajo preko kontaktov med zrni agregata, cementni kamen pa jih le povezuje v celoto. Pri takem betonu se doseže od 20 do 35% poroznosti in velika vodopropustnost. Običajna gostota znaša 1600 do 1900 kg/m^3, trdnost od 3 do 30 MPa in vodoprepustnost od 100 do 900 l/min/m^2. Zaradi velike poroznosti je tak beton tudi toplotno izolativen.

Porozni betoni se uporabljajo za izdelavo drenažnih plasti na parkiriščih, v podlagah športnih igrišč, letalskih stez, pločnikih in povsod tam, kjer se zahteva hitro odvajanje meteornih vod ob nalivih. Uporabljajo se tudi za izdelavo večplastnih toplotnih izolacij v visokogradnjah za izdelavo nosilnih plasti za ostale toplotno izolacijske plasti.

Beli in obarvani betoni

Zaradi estetskih razlogov se v praksi uporabljajo tudi betoni, ki niso značilno sive barve. Pri takih betonih se kot vezivo uporablja beli portland cement. Pomembno je tudi, da so agregati čisti in nimajo posebnih barvnih primesi. Enako velja tudi za vodo. Posebno pozornost je treba posvetiti izdelavi takih betonov, saj opaži ne smejo biti naoljeni ali premazani z odstopajočimi premazi.

Barvitost betona se doseže z izborom agregata in/ali z dodajanjem pigmenta belemu cementu. Razmeroma majhna količina pigmenta povzroči močno obarvanost. S približno 1,5% pigmenta glede na maso cementa se doseže pastelna obarvanost, s 7% pigmenta pa se dosežejo že dokaj temni toni. Po betoniranju se lahko površina takega betona še dodatno obdela na različne načine. Spiranje površine kmalu po betoniranju je le ena izmed možnosti.

Polimer - portlandcementni betoni

V to skupino sodijo različne vrste betonov, ki so modificirani z dodajanjem polimerov. Osnovni princip delovanja polimerov v portlandcementni mešanici je že razložen v poglavju o maltah. Polimer ali monomera se dodajajo med mešanjem betona. Pogosto se uporabljajo termoplastični ali elastomerni lateksi ali pa tudi epoksidi. Lateks poveča duktilnost, trajnost, lepljivost, odpornost na kloride, sprijemnost ter tlačno in natezno trdnost betona. Lateksno modificirani betoni imajo veliko odpornost proti zmrzovanju in tajanju, odpornost na obrabo in udarce ter so zato uporabni za izvedbo oblog in drugih površin, ki so izpostavljene mehanskim obremenitvam. S pomočjo določenih vrst polimerov se lahko doseže tudi odpornost betonov na kemijske spojine (kisline, luge, organska topila). Zaradi svojih izolativnih lastnosti in velike površinske odpornosti se taki betoni uporabljajo kot obloge konstrukcijskih betonov.

Ferocementi

Ferocementi so posebne vrste armiranega betona. narejeni so iz dveh blizu položenih tankih kovinskih ali nekovinskih mrež, ki sta obdani s cementno malto. Elementi iz ferocementa se izdelujejo z ročnim nanašanjem, strojnim nanašanjem (torkretiranje), z vtiskanjem mreže v svežo cementno malto (lameliranje) ali s kombinacijo naštetih načinov. Običajna razmeja cementa in peska v malti so c:p = 2:3 do 2:5. Mešanica mora biti primerno suha in zato vodocementni količniki znašajo od 0,35 do 0,50. Armatura tvori približno od 5 do 6% prostornine ferocementa. Kakovost ferocementa se lahko poveča z dodajanjem vlaknaste armature ali z dodatki k cementu. Površina izdelkov iz ferocementa se zaradi zmanjšanja poroznosti in večje odpornosti na zunanje vplive dodatno obdela z cementnimi ali polimernimi obrizgi.

Ferocementi se uporabljajo za izdelavo lupinastih streh, bazenov, tunelskih oblog, silosov, rezervoarjev, predizdelanih stavbnih elementov ali celih montažnih hiš, plovil, kipov, tankih panelov (do 25 mm) in drugih podobnih izdelkov.

Vlaknasto armirani betoni

Običajnim betonom se v fazi suhega mešanja dodajajo vlakna omejenih dolžin (diskontinuirana vlakna). Vlakna so lahko v različnih oblikah izdelana iz jekla,

polimerov, stekla ali naravnih organskih ali keramičnih materialov (celuloza, kamenine). Vlakna so običajno dolga od 6 do 150 mm in debela od 0,005 do 0,75 mm. Pri izbiri vlaken je treba posebno pozornost posvetiti njihovi korozijski odpornosti, kar narekuje dodatno površinsko obdelavo vlaken ali omejitev njihove uporabnosti zaradi agresivnosti okolja. Poseben problem je alkalna odpornost vlaken v materialih s prisotnim apnom (malte za zidanje).

Steklena vlakna povečajo upogibno trdnost, odpornost na udarce, togost, odpornost na ponavljajoče se obremenitve (utrujanje) in zmanjšujejo nevarnost pojava razpok zaradi krčenja betona ali malte. Polimerna vlakna ovirajo nastanek razpok zaradi krčenja. Pri slabo kontroliranem dodajanju vlaken med mešanjem betona ali malte se le-ta lahko zapletejo v klobčiče, kar predstavlja oslabitev v betonu. Običajno se dodaja od 1 do 2% vlaken in ne več od 4%. Pri mokrih mešanicah vlakna lahko segregirajo, to pomeni, da izplavajo na površino (polimerna vlakna) ali pa potonejo na dno mešanice (jeklena vlakna).

Vlaknasto armirani betoni se uporabljajo za izdelavo elementov in konstrukcijskih delov, ki so izpostavljeni obrabi, za lokalna popravila betonskih površin, izpostavljenih delov hidrotehničnih objektov, pločnikov, tankih lupin (ferocementi) in različnih predizdelanih elementov.

Agresivni vplivi in vzroki poškodb betona

Alkalno - silikatna reakcija

Osnovna predpostavka pri pripravi betonske mešanice je, da je agregat povsem inerten glede portland cementa. Ta predpostavka ne velja v vseh primerih. Izjema so agregati, katerih mineralna sestava je taka, da reagirajo z minerali portland cementa (alkalije Na_2O in K_2O).

Najbolj znana in najbolj resna je alkalno-silikatna agregatna reakcija. Ob prisotnosti hidroksilnih in alkalno-kovinskih ionov se oblikuje alkalno silikatni gel različne kemijske sestave. Najprej pride do porušitve silikatne strukture agregata v betonu, ki jo povzročijo hidroksilni ioni, nato pa sledi absorpcija alkalno-kovinskih ionov na površino produktov reakcije. Alkalno-silikatni gel nabrekne, ko pride v stik z vodo, zato ker zaradi osmoze vsrka veliko količino vode. Nastane hidravlični pritisk, ki vodi do ekspanzije ter pokanja agregata in cementnega kamna. Razpoke so lahko zelo razsežne in vidne na površini betona, v ekstremnih primerih pa lahko povzročijo celo rušenje posameznih konstrukcijskih elementov.

Maksimalna ekspanzija nastopa pri 5% koncentraciji silikatnih mineralov v agregatu in pri delcih velikosti od 0,1 do 0,6 mm. Pojav ni povsem razjasnjen. Reakcija traja približno 10 let po vgradnji betona, v nekaterih primerih tudi dalj časa. Pojav se preprečuje z uporabo nizkoalkalnih cementov (pod 0,6% Na_2O ekvivalenta). Najučinkoviteje pa je izločanje neustreznih zrn agregata, ki vsebujejo reaktivni SiO_2. V nekaterih primerih so potrebne petrografske raziskave agregata, drugje pa zadoščajo izkušnje. V betonih pripravljenih z nizkim vodocementnim količnikom (vodotesni betoni) ni dovolj vode, ki bi omogočila reakcijo, zato so taki betoni manj ogroženi. Znižanju ekspanzije pa pripomorejo tudi pucolanski dodatki.

Alkalno - karbonatna reakcija

Alkalno-karbonatna agregatna reakcija nastaja v stiku med alkalijami iz cementnega kamna in dolomitnim agregatom ($MgCO_3$, $CaCO_3$). Lastnosti ekspanzivnih apnencev so:

- fino granulirani dolomiti,
- velika količina drobnih zrnc kalcita (CaCO3),
- bogata zapolnjenost vmesnih prostorov z glino in
- dolomitna ter apnena zrna razpršena v glineni matrici.

Reakcija ni povsem pojasnjena. Izogibamo se ji z nizkim Na_2O ekvivalentom (pod 0,4%).

Sulfatna odpornost

Velika koncentracija sulfatov v zemlji ali vodi lahko v nekaj letih resno poškoduje beton (zanj so primeri popolne destrukcije po 5-ih do 30-ih letih). Sulfati reagirajo s hidratiziranimi komponentami betona in kot produkt nastaja **etringit.**

Karbonatizacija

Pri procesu karbonatizacije se tvorijo karbonati znotraj cementnega kamna in ob njegovem stiku z agregatom. CO_2 iz zraka reagira s kalcijevim hidroksidom iz betona:

$$Ca(OH)_2 + 2\ CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (6\text{-}1)$$

S tem se znižuje alkalnost betona in zaradi tega tudi zaščita armature pred korozijo. Pojav spremlja nastanek razpok. Pojav je bolj prisoten pri betonih z visokim vodocementnim količnikom, nizko količino cementa, kratkotrajno nego betona, nizko trdnostjo, visoko poroznostjo in vodoprepustnostjo cementnega kamna. Pri kakovostnih betonih je globina karbonatizacije razmeroma majhna.

Razpokanost

Beton razpoka zaradi različnih vzrokov, med katerimi prevladujeta dva osnovna vzroka:

- razpokanost zaradi krčenja pri sušenju ali oviranih deformacij pri temperaturnih spremembah in
- razpokanost zaradi mehanskih obremenitev.

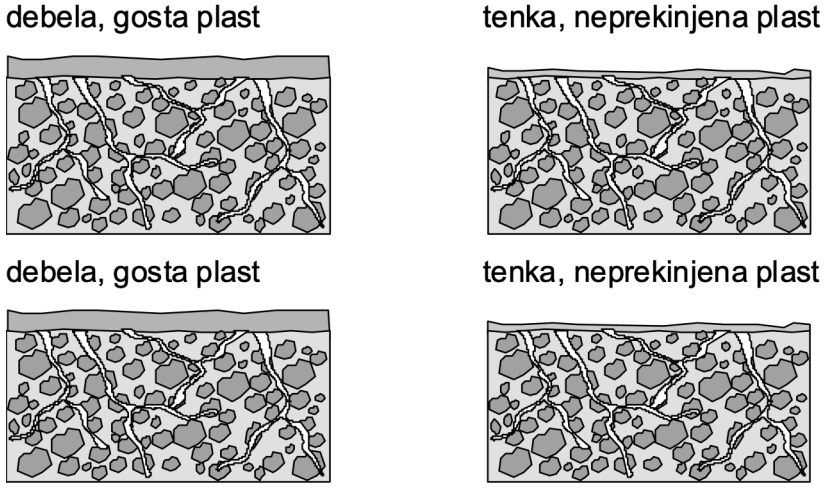
Krčenje pri sušenju je neizogiben betonu lasten pojav. Širina razpok se lahko zmanjša s klasičnim armiranjem ali dodajanjem mikroarmature (jeklena ali polimerna vlakna). Temperaturne spremembe lahko povzročajo razpoke v mladem betonu. Pri neoviranem krčenju beton ne poka, vendar so take razmere zgolj teoretične. V dejanskih razmerah so deformacije ovirane zaradi različnih vzrokov. Površinsko krčenje je večje, ker se vlažni notranji deli manj krčijo in s tem ovirajo površinsko krčenje. Krčenje ovira tudi armatura, spojni elementi med betonskimi masami, trenje med posameznimi deli konstrukcije oz. med podlago in betonom itd.

Preventivni in zaščitni ukrepi

Površinska zaščita betona

Osnovna namena površinske zaščite poroznega materiala sta utrjevanje površine in zapiranje odprtih por. Na ta način se zmanjša prepustnost materiala in poveča njegova odpornost na zunanje vplive. Globina penetracije zaščitnega premaza v večini primerov ni globoka, zato so površinsko učinkovite pri varovanju betona pred srednje agresivnimi vplivi.

V praksi se uporabljajo štirje osnovni načini zaščite betonske površine in različne kombinacije le-teh (slika 6-7).

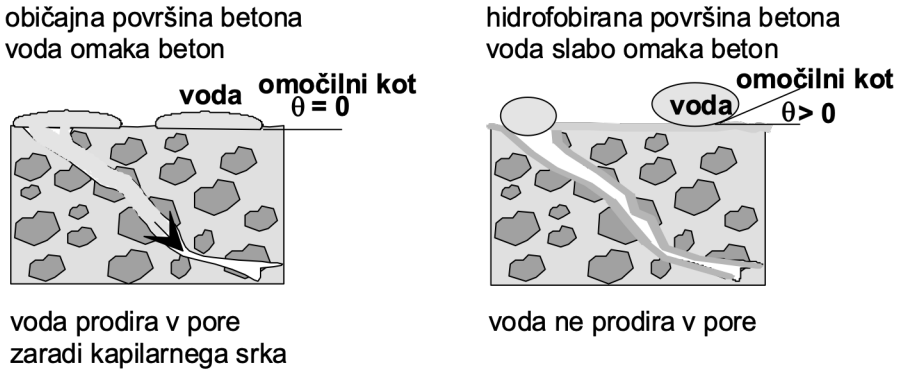


Slika 31: Osnovni načini zaščite porozne betonske površine pred zunanjimi vplivi

Debele, goste zaščitne so ometi iz cementne malte ali polimerno modificirane cementne malte.

Tanke, neprekinjene zaščitne plasti morajo biti odporne na vodo, vodno paro in druge pline ter na oksidacijo in karbonatizacijo. Tanke zaščitne plasti so v osnovi sestavljene iz olj in umetnih smol. Te plasti je potrebno občasno obnavljati.

Z zapiranjem por se poveča nepropustnost površine betona. Eden izmed postopkov temelji na kemični reakciji magnezijevega (ali cinkovega) fluorosilikata in kalcijevih komponent cementa. Produkti teh reakcij zapolnijo odprte pore. Druga možnost je polimerizacija metilmetakrilata na površini betona in zapolnitev razpok s polimetilmetakrilatom, ki je produkt tega procesa. Zapiranje razpok se lahko zelo učinkovito doseže tudi z bitumensko impregnacijo.



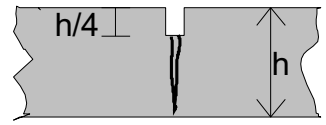
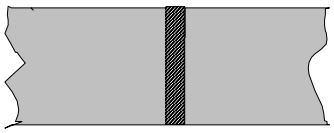
Slika 32: Prikaz učinka hidrofobiranja betonske površine

Betonske površine se pred vplivom vode ščitijo tudi s hidrofobiranjem. Pri tem postopku se uporabljajo silikonski materiali. Ti materiali so sestavljeni tako, da ob prisotnosti vode reagirajo. Pri tem nastanejo silikonske smole, ki se kemično vežejo na površino cementnega kamna. Hidrofobirane površine ovirajo pronicanje vode v betonske pore in tanjše razpoke, kot je to prikazano na sliki 6-8. Pri hidrofobiranju se uporabljata dve skupini materialov. V prvo sodijo silani, siloxani in silikonati, v drugo pa silikoni. Materiali iz prve skupine se zaradi svoje kemijske sestave kemično vežejo na cementni kamen, materiali druge skupine pa tvorijo tanko prevleko, ki se ne veže na cementni kamen.

Kontrola razpokanosti

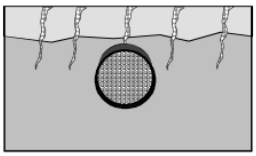
Krčenje se lahko kontrolira zelo učinkovito z ustrezno izvedbo stikov oz. prekinitev med deli betoniranimi v časovnih presledkih (dilatacije, delovne fuge). Beton poka nekontrolirano, če v večjem betonskem elementu ni ustrezne prekinitve.

V preglednici so prikazani osnovni ukrepi, s katerimi usmerjamo nastanek in obliko ter obseg razpokanosti betonskih elementov.

Skica detajla	Opis kontrole razpokanosti
	**Kontrolirana dilatacija** se izvede z vtiskanjem ali zarezo tako, da imajo razpoke nastale zaradi krčenja ali temperaturnih sprememb kontrolirano lokacijo in obliko. Dilatacija omogoča pomike v ravnini elementa. Zareza seže približno za eno četrtino debeline elementa globoko.
	**Izolacijske dilatacije** ločijo posamezne elemente od ostalih delov konstrukcije in dovoljujejo njegovo premikanje v dveh smereh (navpično in vzdolžno pri ploščah). Izvajajo jih na stikih plošč in zidov, stebrov, temeljev in povsod tam, kjer lahko pride do oviranja deformacij. Dilatacija poteka po celi debelini elementa in je zapolnjena z mehkim materialom (kiti, tkanine itd.)
	**Konstrukcijske dilatacije** (delovni stiki) se izvajajo na mestih prekinitve in nadaljevanja betoniranja po določenem času. Delovni stiki se včasih ujemajo s kontrolnimi ali z izolacijskimi dilatacijami.

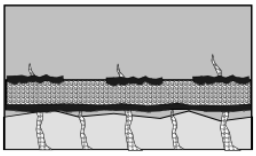
Zaščita armature

Armatura v betonu je izpostavljena koroziji zaradi neustrezne sestave betona, slabe izvedbe, nekaterih dodatkov betonu (CaCl v pospeševalcu strjevanja) in delovanja okolja. Ustrezno debela in gosta krovna plast ščiti armaturo v večini primerov. Z različnimi obdelavami površin betonov se prepreči prodiranje kloridov, v vodi raztopljenih kemikalij in razvoj karbonatizacije. Armatura pa se lahko tudi neposredno zaščiti pred korozijo. Eden izmed načinov je pocinkanje armature. V posebnih primerih se lahko uporabi tudi armatura iz nerjavnega jekla. Pri tem je treba paziti, da zaščitena ali nerjavna armatura ne prideta v stik z nezaščiteno armaturo, ker lahko to privede do korozije zaradi efekta galvanskega člena. Te nevarnosti ni, če se armatura zaščiti z neprekinjenimi epoksidnimi premazi.



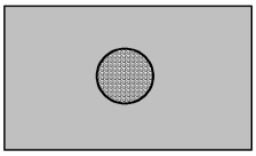
RAZPOKAN BETON
Armatura je dovolj globoko položena pod karbonirano plastjo, vendar SO_2 in CO_2 prodreta globlje skozi razpoke

Razpoke zaradi krčenja v tlačni ali natezni coni

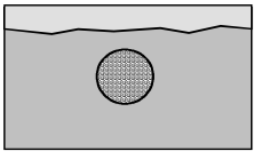


Razpoke zaradi obremenitev v natezni coni

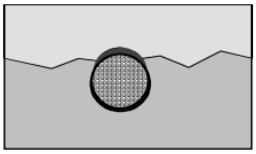
KARBONIRANA PLAST BETONA
Armatura ni dovolj globoko položena in s staranjem betona SO_2 in CO_2 prodreta do armature



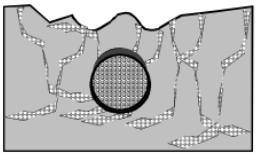
Mlad suh beton ali beton v vodi v katerem ni pojava karbonacije; armatura ne rjavi v alkalnem okolju.



Karbonizacija ni še dosegla armature in je ta še vedno v alkalnem okolju kjer ne rjavi

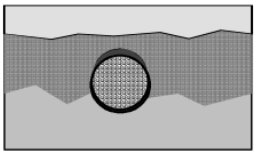


Karbonizacija je dosegla armaturo in ta rjavi v kislem okolju



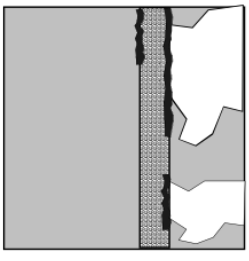
MOČNO POŠKODOVAN IN RAZPOKAN BETON

Armatura je izpostavljena atmosferskim vplivom in zato močno korodira.



KONTAMINIRAN BETON

Armatura rjavi ker je izpostavljena agresivnim spojinam (kloridi), ki so prodrle v sicer nekarboniziran beton.



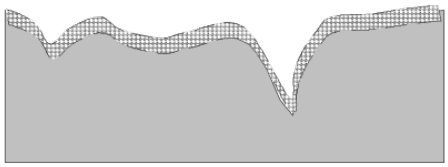
VOTLIKAV BETON

Armatura rjavi ker je izpostavljena atmosferskim vplivom na mestih kjer beton ni zalil armature (gnezda).

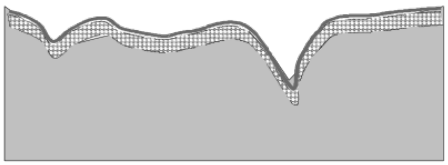
BETON IZ ALUMINATNEGA CEMENTA

Nezaščitena armatura pogosto rjavi v betonu, ki je narejen z aluminatnim cementom.

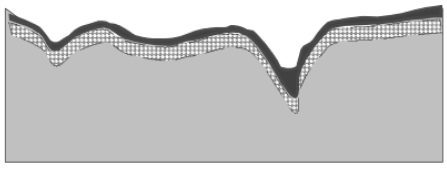
Slika 33: Primeri korozije armature zaradi poškodovanosti betona



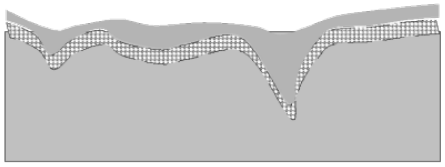
IMPREGNACIJA
Hidrofobiranje s silikoni, silani, lanenimi olji ipd. prepreči prodiranje vode in soli v beton, ne vpliva na difuzijo vodne pare in plinov, izgled površine se ne spremeni



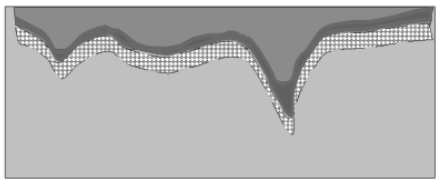
IMPREGNACIJA S TANKIM FILMOM < 0,05 mm
Primerna je tudi za navpične površine kot so fasade Vodoravne površine s epoksidi ali poliuretani, navpične površine s akrilati. Pore so delno zapolnjene, film ni kontinuiran, difuzija se zmanjša, močno oviran prodor CO_2 v beton.



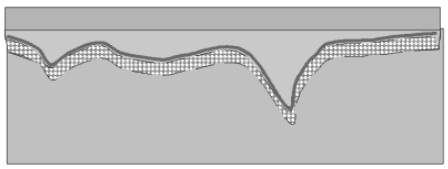
PREMAZ 0,1 - 0,3 mm
Premaz je lahko brezbarven ali pigmentiran. Primerni so epoksidi, poliuretani, akrilati. Premaz izpolni pore in po celi površini ustvari kontinuiran film.



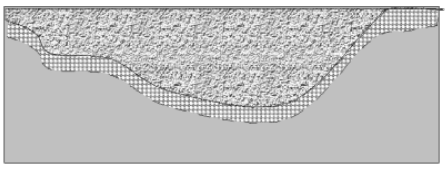
OBLOGA 0,3 - 1,0 mm
Sintetična obloga na predpremazu in neravni površini je lahko brezbarvna ali pigmentirana. Toga obloga je primerna za tlake in ostale izpostavljene površine (epoksidi brez topil), gibka elastična obloga za primere, ko se pričakuje naknadni pojav tanjših razpok (poliuretani)



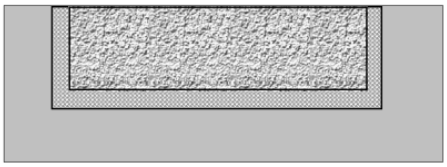
OBLOGA 1 - 5 mm
Sintetična obloga na predpremazu za izravnavo neravne površine. Lahko je samozalivna. Toga obloga je primerna za tlake in ostale izpostavljene površine (epoksidi s polnilom), gibka elastična obloga (poliuretani)



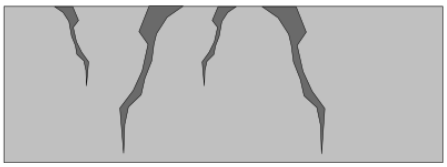
VEČPLASTNA OBLOGA > 5 mm
Zgornja plast iz epoksidne malte s peskom v razmerju 1:9 do 1:14. Spodnja plast iz epoksidne malte (v nujnih primerih) ali iz s polimeri modificiranega betona.



OBLOGA IZ BETONA VISOKE KAKOVOSTI
Krpanje lukenj v betonu predhodno premazanih z vezno epoksidno plastjo.



OBLOGA IZ BETONA VISOKE KAKOVOSTI
Krpanje do zdrave osnove izrezane ali izsekane luknje v betonu premazane z vezno epoksidno plastjo, polimerno disperzijo ali cementnim obrizgom. Globina izseka naj bo vsaj 5 cm.



TESNITEV POVRŠINSKIH RAZPOK
Ukrep proti prodiranju vode v beton. Razpoke se lahko zapolnijo s cementnim mlekom z dodano polimerno emulzijo, s poliuretani in v primeru razpoke ki se ne širi več z epoksidnim lepilom.

Slika 34: Prikaz različnih vrst površinske zaščite betona

BETON IN EUROCODE 2

Evropski predstandardi za projektiranje betonskih konstrukcij obravnavajo tudi lastnosti osnovnih materialov za armirani in prednapeti beton. To so beton normalne gostote, armatura in jeklo za prenapenjanje.

V poglavju, ki je posvečeno betonu se obravnavajo njegove mehanske lastnosti: tlačna trdnost, natezna trdnost in modul elastičnosti. Podane so vrednosti mehanskih lastnosti betona za posamezne marke betona, ki jih je treba upoštevati pri projektiranju konstrukcij. Pri obravnavanju deformabilnosti betona so poleg modula elastičnosti obravnavani tudi odvisnost deformacij od napetosti, Poissonov količnik, količnik toplotnega raztezka ter tečenje in krčenje betona.

Glede splošnih lastnosti betona, ki jih je treba upoštevati pri projektiranju in izvedbi konstrukcij se Eurocode 2 sklicuje na evropski standard EN 206-1:2000. Ta standard obravnava lastnosti, proizvodnjo, vgradnjo in kriterije za oceno spoštovanja predpisanih zahtev. Na osnovi tega standarda smo v Sloveniji izdali svoj standard SIST EN 206-1:2002 (sl), ki je po vsebini enak evropskemu.

V standardu SIST EN 206-1:2002(sl) so navedeni tudi drugi relevantni mednarodni standardi, na katere se sklicuje ali s katerimi se dopolnjuje. Standard v ločenih poglavjih obravnava:

- definicije pojmov, ki jih obravnava,
- lastnosti sestavnih materialov betona (agregat, cement, voda, dodatki),
- osnovne zahteve povezane s sestavo betona,
- zahteve v zvezi s trajnostjo betona,
- lastnosti betona in metode preskušanja betona,
- tehnične pogoje za beton (projektiranje betona),
- proizvodnjo betona,
- transport, vgradnjo in nego svežega betona in
- postopke kontrole kakovosti betona.

Standard SIST EN 206:2002 ima tudi namen, da poda podatke o betonu, na osnovi katerih se lahko uporabljajo določila Eurocode 2. Ti podatki pomagajo tudi pri zagotavljanju ustrezne kakovosti betona in pri njegovi smotrni rabi v konstrukcijske namene.

VPRAŠANJA

1. Pojasnite kaj so malte, naštejte vrste zračnih in hidravličnih malt ter navedite njihovo sestavo.
1. Kakšne agregate uporabljamo za izdelavo malt in katere značilnosti le-teh so pomembne za doseganje ustrezne sestave ter kakovosti malte?
2. Kakšna je vloga veziv in dodatkov k vezivom pri sestavi malte?
3. Opišite značilnosti malt za zidanje in pojasnite vlogo vsake izmed sestavin malt.
4. Opišite postopek priprave apnene, cementne in podaljšane cementne malte.
5. Pojasnite, zakaj uporabljamo omete in katere vrste malt uporabljamo za ometavanje.
6. Opišite najbolj pogoste poškodbe ometov oz. navedite vzroke za njihov nastanek.
7. Pojasnite, kako z dodajanjem polimerov vplivamo na lastnosti cementne malte.
8. Kako je sestavljen beton in kakšna je vloga posameznih sestavin, ki ga tvorijo?
9. Kako na lastnosti betona vpliva zmanjšanje količine vode oziroma nizek vodocementni količnik?
10. Pojasnite pojma: konsistenca betona in vgradljivost betona.
11. Kako dosežemo konsolidacijo betona po vgradnji in s katerimi ukrepi se izognemo segregaciji agregata ter izcejanju vode.
12. Pojasnite proces hidratacije betona in vpliv tega procesa na lastnosti otrdelega betona.
13. S pomočjo grafičnega prikaza pojasnite vpliv nege na trdnost otrdelega betona.
14. Pojasnite pojav sušenja betona in njegov vpliv na lastnosti otrdelega betona.
15. Pojasnite razliko med tlačno trdnostjo betona, karakteristično tlačno trdnostjo in marko betona.
16. Pojasnite razliko med upogibno in cepilno natezno trdnostjo.
17. Pojasnite pojem vodotesnost betona in vpliv le-te na njegovo trajnost s posebnim poudarkom na vplive agresivnega okolja in zmrzovanja.
18. Pojasnite, kako dosežemo izdelavo betona dobre in enakomerne kakovosti in s katerimi parametri ga ocenjujemo.
19. Kako dosežemo izdelavo ekonomičnega betona?
20. Kako dosežemo izdelavo trdnega betona?
21. Kako dosežemo izdelavo trajnega betona?
22. Pojasnite, katerim pogojem morajo zadostiti trajni betoni.
23. Naštejte vsaj pet vrst posebnih betonov in pojasnite njihove lastnosti.

24. Opišite značilnosti konstrukcijskih betonov nizke gostote in običajnih trdnosti ter področja njihove uporabe.
25. Opišite značilnosti in področja uporabe betonov visoke trdnosti.
26. Kako pri konstrukcijskih betonih dosežemo hitro pridobivanje trdnosti?
27. Kako znižamo škodljiv vpliv hidratacijske toplote pri masivnih betonih?
28. Pojasnite postopke izdelave prepaktiranih, valjanih in zemljo-cementnih betonov.
29. Pojasnite postopke brizganja betona in navedite področja njihove uporabe tudi v primerih ferocementa in ob dodajanju mikroarmature.
30. Navedite in na kratko pojasnite škodljive reakcije, ki v betonu nastanejo zaradi agresivnosti okolja.
31. Pojasnite primere korozije armature zaradi poškodovanosti betona.
32. Pojasnite, zakaj beton razpoka in kako ukrepamo v takih primerih.
33. Prikažite vsaj pet primerov površinske zaščite betona.
34. Kako Eurocode 2 obravnava betone?
35. Kaj obravnava standard SIST EN 206-1 :2002 (sl)?

KOVINE

HIERAHIČNA RAZPOREDITEV KOVIN



Kovine so prevladujoči kemijski elementi. Čisti kovinski elementi imajo izredno raznolike lastnosti. Ta raznolikost se zelo poveča z medsebojno kombinacijo kovinskih elementov, ki tako tvorijo kovinske zlitine. Še večja raznolikost pa se doseže s kombinacijo kovinskih in nekovinskih elementov. Obe vrsti kombinacij ustvarjata večji del tehnično uporabnih materialov, med katerimi so tudi gradiva.

Zgradba večine trdnih kovin je kristalasta. Kovine, ki se uporabljajo v gradbeništvu, odlikuje duktilnost in žilavost. Zaradi tega jih lahko obdelujejo in

oblikujejo v različne praktično uporabne oblike. Povsem čiste kovine so v osnovni sestavi večinoma zelo mehke in tehnično neuporabne. Vendar se lahko s kontrolo mikrostrukture proizvedejo kovine različnih lastnosti. S toplotno obdelavo se mnoge zlitine, med katerimi so tudi jekla in aluminijeve zlitine, enostavno oblikujejo pri višjih temperaturah in nato uporabljajo pri nižjih temperaturah kot zelo trdna in žilava gradiva.

Kovinska gradiva lahko obravnavamo v dveh skupinah. V prvo sodijo zlitine na osnovi železa, v drugo pa zlitine na osnovi vseh ostalih kovin, kot so aluminij, baker, cink, kositer itd. Železove zlitine vsebujejo od 98% (čista karbonska jekla) čistega železa do 50% (visoko legirana jekla) čistega železa. Neželezove zlitine razvrščamo v skupine kot so: lahke zlitine, težke zlitine, žaroodporne zlitine in plemenite kovine, kot je to razvidno iz sheme hierarhične razporeditve kovin.

Železove zlitine

Železove zlitine, večinoma so to jekla, tvorijo okoli 90% vseh uporabljanih kovin. Osnovna razloga sta dva: razmeroma nizka cena in velika raznolikost. Raznolikost je posledica alotropije, to je lastnosti železa, da lahko nastopa v različnih modifikacijah (oblikah). Osnovni obliki sta posledica sprememb, ki so različne pri hitrem in pri počasnem ohlajevanju.

Karbonska jekla

Karbonska jekla so najcenejša in najbolj pogosto uporabljana vrsta jekel. Poleg ogljika lahko vsebujejo tudi do 1,65% mangana in do 0,6% silicija. Trdnost teh jekel je predvsem odvisna od količine ogljika. Povečana količina ogljika pa vpliva tudi na zmanjšanje duktilnosti. Trdota karbonskih jekel je razmeroma nizka, njihova trdnost pa pada z višanjem temperature. So krhka pri nizkih temperaturah in občutljiva na korozijo v večini okolij. Karbonska jekla se lahko izboljšajo z različnimi dodatki.

Jekla, ki vsebujejo do 5% legirnih elementov se imenujejo *nizko legirana jekla*. Tako legiranje podraži ceno jekel za približno 20%. Različni legirni elementi lahko vplivajo na podoben način. Izbira legirnega elementa je torej odvisna tudi od njegove cene in dostopnosti na trgu. Na to vplivajo tudi politične razmere, ko gre za strateške surovine.

Nerjavna jekla

Osnovna značilnost nerjavnih jekel je njihova korozijska odpornost. To lastnost daje tanka površinska neporozna plast kromovega oksid, ki nastane iz kroma v jeklu in kisika iz atmosfere. Zaščitna plast se tvori, če jeklo vsebuje vsaj 12% kroma. Nerjavna jekla se glede na svojo sestavo razvrščajo med avstenitna, feritna in martenzitna jekla. Avstenitna jekla so izredno odporna pred lezenjem tudi pri temperaturah do 700°C in so duktilna tudi pri nizkih temperaturah do -200°C. Martenzitna nerjavna jekla so hkrati surovina za izdelavo zlitin, ki so odporne na visoke temperature in se uporabljajo za izdelavo delov plinskih turbin.

Orodna jekla

Orodna jekla sodijo med visokolegirana visokokarbonska jekla. Uporabljajo se za izdelavo rezalnih orodij s katerimi se obdelujejo druge vrste jekel. Orodna jekla morajo biti odporna na obrabo, trda tudi pri višjih temperaturah in žilava. Značilna predstavnika orodnih jekel sta jekla pri katerih je osnovni legirni element ali molibden ali volfram. Vsa visokolegirana jekla so zelo draga (od pet do osemkrat dražja od visoko karbonskih jekel).

Lita železa

Metalurška sestava litih jekel je dokaj kompleksna. V glavnem se sestojijo iz železa, ogljika in silicija. Ogljik se nahaja v različnih oblikah, zato se lita železa razvrščajo glede na pojavno obliko ogljika.

V ***sivi litini*** se nahaja dovolj silicija, da le-ta povzroči pojav ogljika v obliki grafitnih lističev. Zaradi njih se sive litine lažje obdelujejo in tudi dušijo udarce ter vibracije. Siva litina je okoli dvakrat cenejša od enostavnih karbonskih jekel, kar povečuje njeno uporabnost.

V ***beli litini*** se ogljik nahaja večinoma v obliki cementita (železov karbid, Fe_3C), zaradi katerega je litina zelo trda in krhka. S postopkom aneliranja se del cementita lahko pretvori v stabilnejši grafit. Taka litina se imenuje ***kovna litina***. Ima razmeroma visoko žilavost, duši udarce in vibracije in jo je lahko obdelovati.

Nodularna litina (duktilna litina) se izdeluje iz sive litine z dodajanjem enega ali več elementov izmed Mg, Ce, Ca, Li, Na in Ba med njenim taljenjem. Grafit se pri tem oblikuje v kroglice (noduli). Taka litina je po lastnostih podobna mehkim jeklom. Ima dobre obdelovalne lastnosti in je zelo primerna za vlivanje. Ob tem je tudi razmeroma žilava in duktilna. Z uvajanjem nodularnih litin se je ponovno povečala uporaba litega železa. Značilni primeri uporabe nodularne litine so pogonske osi v avtomobilskih motorjih.

Neželezove zlitine

Neželezove zlitine so bistveno dražje od železovih zlitin, kar omejuje njihovo masovno uporabo. Vendar so pogosto nepogrešljive v primerih, ko se zahteva korozijska odpornost, električna ali toplotna prevodnost, visoka specifična trdnost (trdnost na enoto gostote) in dobra obdelovalnost.

Lahke neželezove zlitine imajo visoko specifično trdnost in togost. To so zlitine nizke gostote, zato se mnogo uporabljajo pri izdelavi zračnih plovil.

Aluminijeve zlitine sodijo med najbolj ekonomične neželezove zlitine. So korozijsko odporne in visoko prevodne. Pri določenih vrstah aluminijevih zlitin se te lastnosti nekoliko zmanjšajo na račun zvišanja trdnosti. Aluminijeve zlitine se uporabljajo za izdelke in konstrukcijske elemente povsod tam, kjer se zahteva bodisi prevodnost, bodisi obdelovalnost ali specifična trdnost.

Magnezijeve zlitine so dražje in šibkejše od aluminijevih, vendar so zaradi izredno nizke gostote zelo primerne za različne namene. Značilna uporaba je pri zračnih plovilih, delih avtomobilskih motorjev, visokokakovostnih platišč itd.

Posebne lastnosti ***titanijevih zlitin*** omogoča alotropičnost titana. Tako se z dodajanjem legirnih elementov in termomehansko obdelavo tvorijo različne mikrostrukture titanijevih zlitin in s tem tudi različne lastnosti teh kovin. Tako lahko dosežejo najvišjo specifično trdnost med vsemi kovinskimi materiali celo pri temperaturah do 700°C.

Težke zlitine imajo nekoliko višjo gostoto kot jekla in dvakrat nižjo kot žaroodporne in plemenite kovine. Težje so od lahkih zlitin, razlikujejo pa se tudi po lastnostih, ki določajo njihovo uporabnost. Značilni predstavniki so loti (zlitine svinca in kositra), medenine (zlitine cinka in bakra) in bronze (zlitine bakra in kositra).

Žaroodporne kovine imajo tališče nad 1600°C. Najbolj pomembne kovine iz te skupine so volfram, molibden, tantal in niobij. Uporabljajo se tudi kot legirni elementi za izdelavo posebnih vrst jekel.

Žlahtne kovine so zlato, srebro in kovine iz platinske skupine. Srebro se v največjih količinah uporablja za fotografske emulzije. Dragocene kovine se v tehniki uporabljaj povsod tam, kjer se zahteva visoka prevodnost, korozijska in oksidacijska ter kemična inertnost. Zlato se veliko uporablja v elektronski industriji za izdelavo električnih kontaktov. Platinske kovine se veliko uporabljajo kot kemični katalizatorji v industriji.

7

ŽELEZOVE ZLITINE

UVOD

Železove zlitine, predvsem jeklo, so v razvitem svetu najbolj uporabljano konstrukcijsko gradivo. Okoli 90% (po teži) konstrukcijskega kovinskega materiala odpade na železove zlitine. Najbolj zastopana so jekla, ki vsebujejo od 0,05 do 2% ogljika in lita železa, ki vsebujejo nad 2% in do 4,5% ogljika.

V zemeljski skorji je okoli 4,7% železa, zato je bila njegova uporaba razširjena pri mnogih starih civilizacijah. Ker je čisto železo razmeroma mehka kovina, so njegovo uporabnost povečali z legiranjem z ogljikom in tako dobili jeklo ali lito železo. Jeklo se uporablja že približno 4000 let. Na začetku so ga proizvajali tako, da so železne palice povezali s kosi oglja in segrevali na 1000°C. Ta proces se imenuje cementacija. Ogljik iz oglja je difuzivno prodiral v železne palice in jih legiral. Tako dobljena jekla so bila zelo različnih kakovosti, saj je uravnava procesa bila dokaj primitivna in nezanesljiva. Kakovost so izboljšali, ko so dopolnili tehnologijo cementiranja. Palice z ogljikom legiranega železa so talili in talino vlivali v kalupe. Tako so dosegli bolj enakomerno razporeditev ogljika in boljšo kakovost jekla.

Sodobne postopke za proizvodnjo jekla so iznašli v sredini devetnajstega stoletja. Sir Henry Bessemer je leta 1856 vpeljal *konvertorski proces* v proizvodnjo jekel. Ta je poteka v veliki hruškasti peči z ognjeodpornimi oblogami, skozi katere se dovaja zrak pod pritiskom. Ker se peč po taljenju obrne in se tako izlije jeklo, je postopek dobil ime po obračanju (convert). Drugo ime postopka je tudi *pnevmatski,* ker se zrak dovaja pod pritiskom (prepihovanje). Wilhelm Siemens je nekaj let potem iznašel regeneracijski postopek, na osnovi katerega je Pierre Martin leta 1864 konstruiral peč. Ta je dobila ime Siemens-Martinova peč. Pri teh pečeh se uporablja postopek regeneracije toplote tako, da se v plamenih pečeh temperatura bistveno zviša s predogrevanjem zraka in generatorskega plina, ki služi kot gorivo. Tretji, elektroobločni postopek je patentiral Pichon leta 1853, prvo uspešno elektropeč pa je leta 1879 izdelal Wilhelm Siemens. Elektropeči omogočajo izdelavo visoko kakovostnih in posebnih vrst jekel. Vsi trije postopki, ki so jih iznašli v devetnajstem stoletju še danes predstavljajo osnovo vsem tehnologijam proizvodnje jekel.

Masovna uporaba jekel v konstrukcijske namene se je začela konec devetnajstega stoletja zaradi znižanja njegove cene, ki jo je povzročila sodobna tehnologija proizvodnje. Pred tem sta se bolj uporabljala lito železo in kovno železo. Kovno železo je skoraj čisto železo, kateremu je dodana žlindra z visoko vsebnostjo silicija. Uporabljal se je za izdelavo kovanih izdelkov (ograje, rešetke, pritrdila, okraski). Lito železo se je veliko uporabljalo tudi v

konstrukcijske namene, vendar se je zaradi krhkosti opustilo s pojavom dovolj poceni jekla.

V sodobni industriji se uporabljajo omejene količine čistega železa za izdelavo različnih odlitkov. Večinoma se železo uporablja za izdelavo jekel in drugih železovih zlitin z ogljikom, silicijem, nikljem, kromom in magnezijem. *Karbonska jekla* vsebujejo do 1% ogljika z nekaj silicija in mangana. *Nizko legirana jekla* vsebujejo ogljik, silicij in mangan z manjšimi količinami niklja, kroma, molibdena in ostalih kovin, ki jeklu dajejo posebne lastnosti. *Visoko legirana jekla* vsebujejo večjo količino, to je nad 5% dodanih kovin in ogljika.

Korozijsko odporna jekla so legirana s kromom, trda jekla (orodjarska) so legirana s volframom, superzlitine imajo visoko korozijsko odpornost in nosilnost pri visokih temperaturah. Lita železa imajo velik razpon lastnosti uravnanih s sestavo in načinom obdelave. Bele in sive zlitine so značilno krhke, vendar se lahko proizvedejo tudi duktilne zlitine.

PROIZVODNJA ŽELEZA IN JEKLA

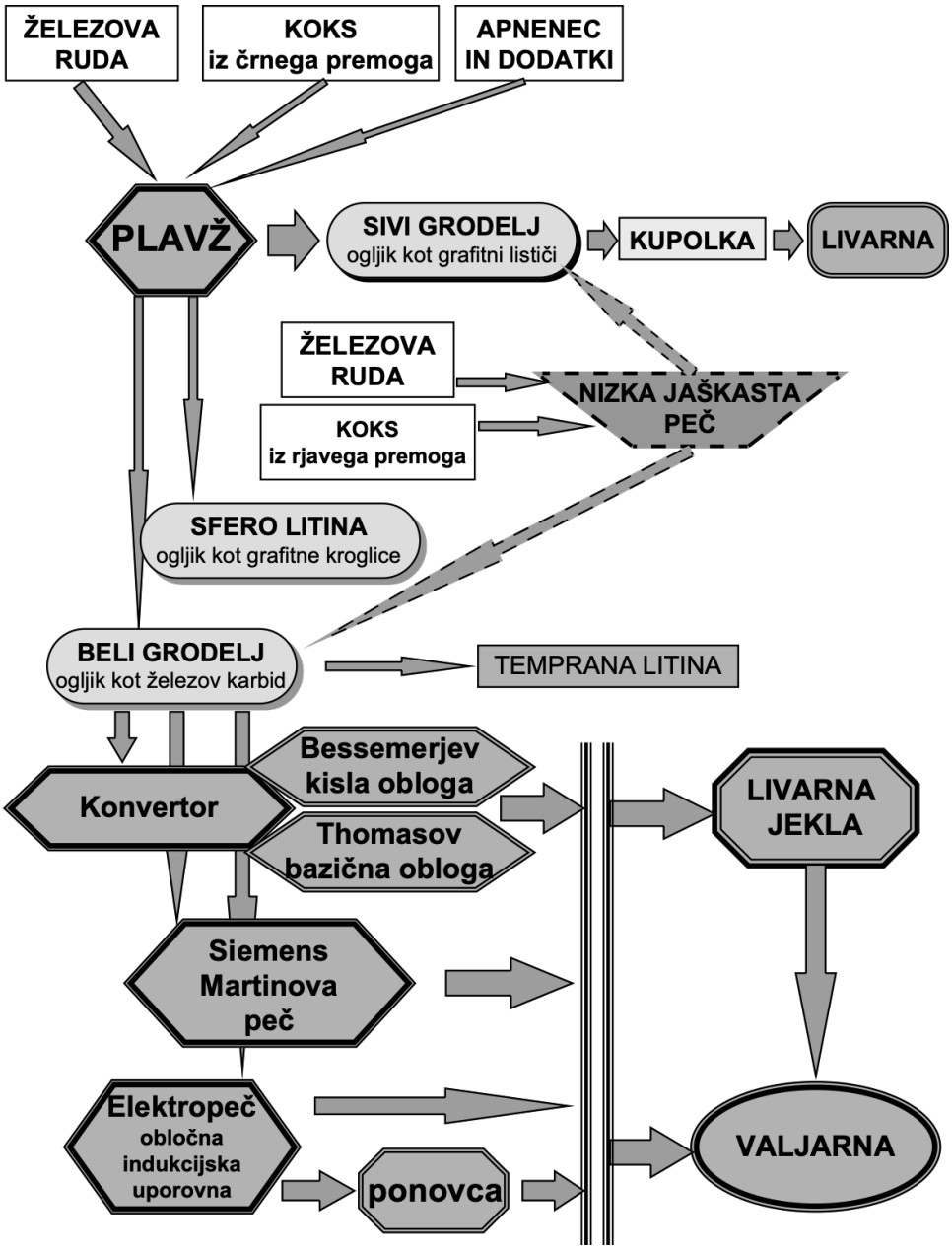
Železo se pridobiva s plavžnim procesom, ki je redukcija oksidnih železovih rud s koksom. Železove rude so magnetit, hematit, takonit, siderit, limonit in pirit. Ekonomične so, če vsebujejo vsaj 30% železa. *Magnetit* (Fe_3O_4) je črne barve, vsebuje do 65% železa in je močno namagneten. *Hematit* (Fe_2O_3) je krvavo rdeče barve in vsebuje do 50% železa. *Takonit* je zelene barve in vsebuje do 30% železa in pogosto veliko silicija. V plavžu se železovi rudi doda koks, ki se pridobiva kot trden preostanek suhe destilacije s plinom bogatega črnega premoga in v posebnih primerih tudi rjavega premoga. Poleg koksa, se doda tudi apnenec in drugi dodatki. Plavž se stalno polni, tako da proces proizvodnje železa poteka nepretrgoma. Nad železovo talino se izloča plast žlindre, ki vsebuje nečistoče nastale med taljenjem vhodnih surovin. Apnenec omogoča izločanje žvepla in silicija. Žlindra se sproti odstranjuje pred vsakim izlivanjem železove taline.

V plavž se vpihuje zrak skozi vodno hlajene šobe pri dnu plavža pri temperaturi 1100°C. Ogljik iz koksa reagira s kisikom in se tako iz rude izloča železo. Temperatura pri tem naraste na 3000°C, kjer se tali železo. Po petih do šestih urah se železo izliva iz plavža v ingote, ki imajo maso okoli ene tone. Tako dobljeno železo - grodelj - ni čisto, saj vsebuje silicij in žveplo ter okoli 4% ogljika. Glede na obliko v kateri je izločen ogljik, ločimo sivi grodelj, beli grodelj in sfero litino, kot je to shematsko prikazano na sliki 34. Za proizvodnjo 3000 ton grodlja se porabi približno 6000 ton rude, 3000 ton koksa, 1500 ton apnenca in 2550 m^3/min vročega zraka.

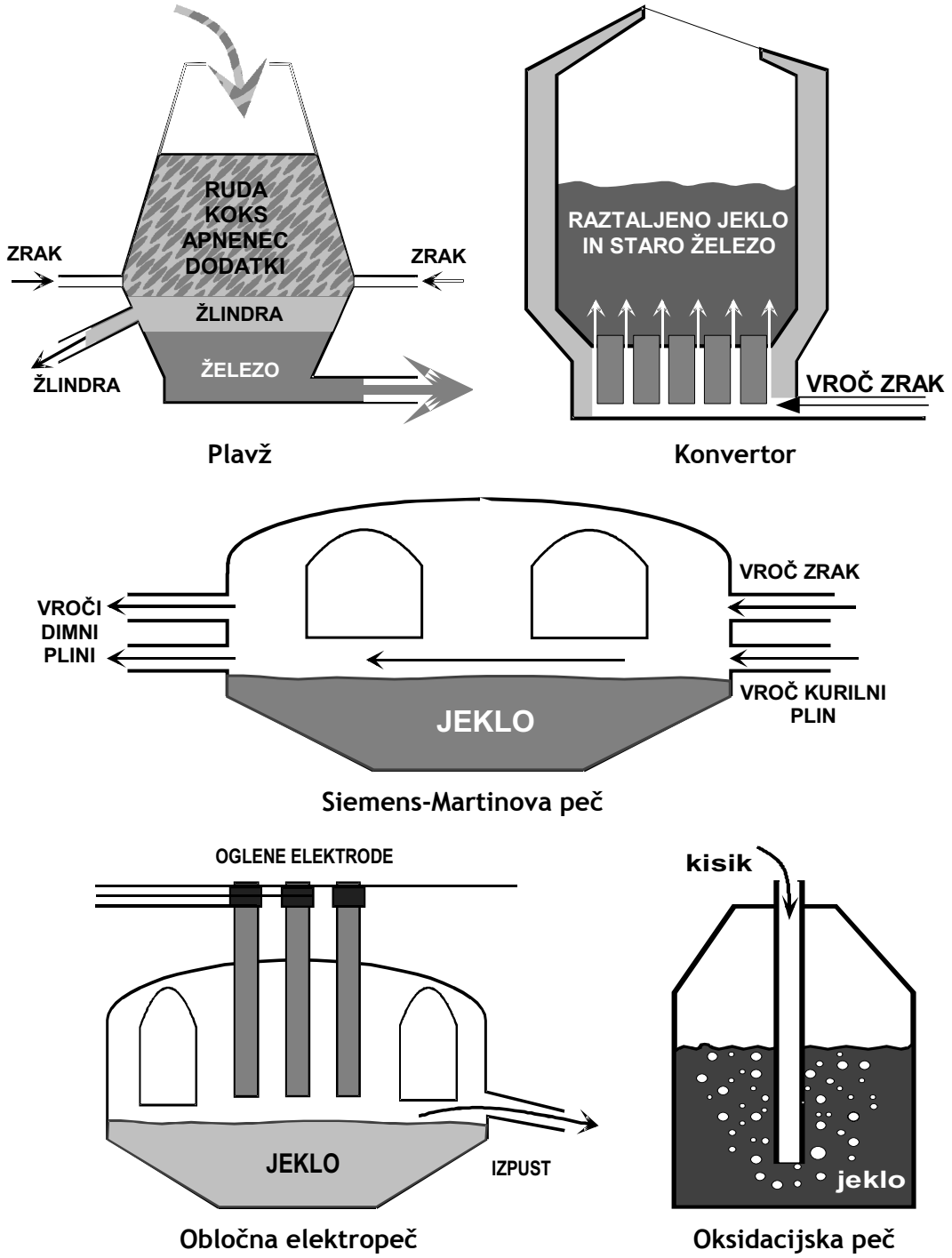
Beli grodelj je osnovna surovina za izdelavo jekel. S konvertorskim postopkom se proizvajajo kisla in bazična jekla glede na vrsto obloge v konvertorjih, kjer se poleg grodlja tali tudi staro železo. Vroči zrak, ki se vpihuje skozi odprtine v oblogi, povzroča izgorevanje ogljika, pri tem pa se dodajajo želene legirne kovine in ogljik. V 12-ih do 15-ih minutah se rafinira približno 25 ton staljenega jekla. Konverter se lahko obrne tako, da se skozi zgornjo odprtino staljeno jeklo vlije v ingote.

Siemens-Martinova peč je podobna veliki posodi obloženi z ognjestalno keramiko dolžine od 5 do 15 m in višine okoli 6 m. Mešanica grodlja in starega

železa se tali s pomočjo predogretega zraka in kurilnega plina, ki pihata čez površino taline. Pri tem izgorevajo nečistoče in del ogljika. V takih pečeh je od 150 do 250 ton taline, ki se prečisti po približno 12-ih urah. Pri koncu procesa čiščenja se dodajajo natančni odmerki ogljika in legirnih kovin. Jeklo se nato vliva v ingote.



Slika 35: Shema proizvodnje železa in jekel



Slika 36: Sheme plavža in različnih peči za izdelavo jekla

Jeklo, ki se proizvaja po obeh opisanih postopkih še vedno vsebuje občutno količino neželenih primesi, kot so kisik, dušik, žveplo, fosfor, ki predstavljajo oslabitev jekla. Kakovost jekel se lahko izboljša z dodatnim rafiniranjem v električnih pečeh. V teh pečeh se lahko tudi iz grodlja in starega železa neposredno proizvaja bolj čisto jeklo. Značilna predstavnica je obločna peč, ki je po konstrukcijski zasnovi podobna Siemens-Martinovi peči, le da je sistem taljenja drugačen. S pomočjo oglenih elektrod se tik nad surovinami ustvari električni oblok, ki jih tali ter zgoreva ogljik. Pri tem postopku ni potrebno dovajati zraka, zato se v talini ne ustvarjajo dodatni zračni mehurčki. Kapaciteta električnih peči je od 1 do 100 ton. Osnovna pomanjkljivost

električnih peči je visoka količina porabljene energije, saj poraba energije znaša okoli 400 kW/tono jekla. Tipična peč potrebuje trifazni tok z napetostjo 220 V in 30.000 kW instalirane moči.

Eden izmed novejših postopkov, ki so ga vpeljali pred približno štiridesetimi leti sodi v skupino ponovčne tehnologije. Razvili so ga kot modifikacijo Bessemerjevega postopka. V talino, dobljeno z enim izmed klasičnih postopkov, se pod pritiskom približno 10 barov skozi vodno hlajeno cev uvaja čisti kisik. Ogljik v talini hitro oksidira, tako da se proces izgorevanja ogljika konča v približno 45-ih minutah. Po tem se cev odstrani iz taline, dodajo se natančni odmerki ogljika in legirnih kovin. Tako dobljeno jeklo se izlije v ingote.

Področje jeklarstva doživlja v zadnjih desetletjih velik napredek, ki ga zahteva razvoj strojne in predelovalne industrije. Trg zahteva višjo kakovost jekel ob nižjih cenah. Razvili so se novi ali modificirali obstoječi tehnološki postopki, ki temeljijo na obdelavi jekla izven peči ob uporabi sodobnih dosežkov na področju kemijskih tehnologij in razvoja znanj na področju termodinamike in računalništva. Razvila se je tako imenovana *ponovčna tehnologija*. Tehnologija izdelave jekel v šestdesetih letih je še vedno temeljila na izdelavi jekla v Siemens-Martinovih pečeh in v manjši meri v elektroobločnih pečeh. Slednje omogočajo boljše izločanje ostankov žlindre, vendar vseh nečistoč, ki so eden osnovnih razlogov za anizotropnost jekla, se tudi s tem postopkom ne da povsem izločiti. Uvedba ponovčne tehnologije je omogočila pridobivanje jekel izboljšane izotropnosti. Pri novi tehnologiji elektroobločna peč predstavlja talilni agregat. Ostale faze izdelave - dezoksidacija, odžvepljanje, modifikacija vključkov, razplinjanje in dopolnitev kemične sestave - potekajo v ponovci z znižanim tlakom. Taka jekla imajo nizko vsebnost nečistoč, žvepla in plinov. Preostale nečistoče se z modifikatorji oblikujejo v kroglice, ki tudi po valjanju ne vplivajo bistveno na izotropičnost jekla.

Tekoče jeklo se vliva v posode - kokile, ki so stožčaste oblike. Odlitki se imenujejo ingoti. Idealen ingot bi moral imeti v vseh svojih delih enako strukturo in enako kemično sestavo. Dejansko v procesu hlajenja nastanejo razlike. Zgornja površina ingota je zračena. Na njej se izločajo plinski mehurji, del le-teh pa ostaja ujet znotraj ingota. Zgornja površina se poseda in od nje proti sredini se tvori stožčasta votlina imenovana *lunker*, ki je lahko tudi mestoma prekinjena z deli otrdelega jekla. Ta del ingota se pred obdelavo odstrani. Glede na obnašanje taline med vlivanjem se v osnovi ločita dve vrsti jekla - *pomirjeno* in *nepomirjeno*.

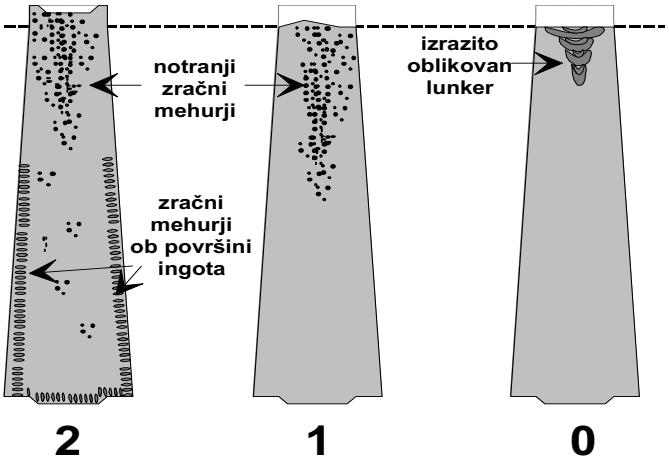
Nepomirjena jekla so tista, pri katerih je med proizvodnjo ostalo razmeroma veliko raztopljenega kisika, ki se pri ohlajevanju veže v ogljikov monoksid:

$$FeO + C \rightarrow CO + Fe$$

Tako jeklo med vlivanjem burno reagira (vre), na površini in v notranjosti pa se izloča plin ogljikov monoksid. Pri pomirjenih jeklih, kjer se je med proizvodnjo prosti kisik vezal z dezoksidacijskimi elementi (Si, AL, Ti), je zgoraj opisani pojav manj izrazit. V praksi so pogosti tudi vmesni primeri delno pomirjenega jekla. Stopnja pomirjenosti jekla vpliva na njegove lastnosti povezane s homogenostjo in večjo ali manjšo prisotnostjo votlin (zračnih mehurjev, delov neodstranjenega lunkerja) in ostalih vključkov (ostanki žlindre, manganovega sulfida MnS, ostale nečistoče).

Med izdelavo pločevin in ostalih polizdelkov z valjanjem se nečistoče razporedijo v obliki večjih in manjših lusk, ki predstavljajo oslabitev materiala. Delujejo kot notranje zareze, v smeri prečno na njihov potek pa je natezna trdnost materiala bistveno nižja. Zaradi uvaljanega lunkerja ali žlindrinih skupkov nastaja večplastnost materiala. Manjše nečistoče kot je MnS se razporedijo v obliki tanjših lističev in povzročajo mikrorazpoke in lamelarnost materiala. Napake se lahko odkrivajo z različnimi nedestruktivnimi metodami, med katerimi je najbolj razširjeno preskušanje z ultrazvokom.

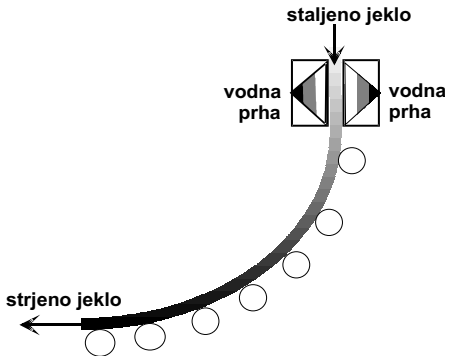
Na sliki 36 so prikazane tri stopnje pomirjenosti jekla v ingotu. Razmere, ki so blizu idealnim, so v specialno pomirjenem jeklu (0), kjer poleg izrazitega lunkerja ni nobenih nečistoč ali mehurjev znotraj ingota. Pri pomirjenem jeklu (1) so pri vrhu ingota zbrani mehurji, pri nepomirjenem jeklu (2) pa so mehurji razporejeni tudi po obodu in po celotnem ingotu. Številčne oznake 0-1-2 pomenijo stopnjo pomirjenosti jekla in so sestavni del standardiziranih oznak (JUS) konstrukcijskih jekel.



Slika 37: Shematični prikaz stopnje pomirjenosti ingotov (2-nepomirjen, 1-pomirjen, 0-specialno pomirjen)

Iz ingotov se v livarni in valjarni izdelujejo različni izdelki. Večjo možnost izdelave različnih izdelkov pa omogoča metoda zveznega litja jekla preko sistema valjev, kot je to shematično prikazano na sliki 37. Staljeno jeklo se hladi z vodno prho znotraj oblikovalnika in se gravitacijsko giblje po sistemu valjev do ohladitve in razreza na želene dolžine. Tako dobljeni izdelki se naknadno preoblikujejo v valjarnah. Podoben postopek se uporablja tudi za oblikovanje neželezovih kovin in zlitin.

Jeklo se z valjanjem oblikuje pri temperaturi okoli 2200°C (toplo valjanje) ali pri sobni temperaturi (hladno valjanje). Toplo valjanje se uporablja za izdelavo jeklenih profilov, hladno valjanje pa izdelavo tanjših pločevin. Ostale vrste izdelkov se izdelujejo z hladnim vlečenjem.



Slika 38: Shema oblikovanja kovinskega jekla z zveznim litjem

Na trgu se jeklo običajno dobi v sledečih oblikah:

Kotniki imajo lahko enake ali neenake stranice; enakostranični so izmer od 25 x 25 mm do 200 x 200 mm; neenakostranični pa so običajno do izmere 175 x 10 mm.

Palice krožnega ali pravokotnega polnega prereza, hladno ali toplo vlečene, izmere od 20 do 300 mm, posebna vrsta palic je betonsko železo okroglega prereza od 4,2 mm dalje.

Nosilci standardni **I, H** in **[** nosilci. **I** nosilci so izmer od 75 x 60 mm do 600 x 200 mm. **H** nosilci so širokopasovni profili od izmere 200 x 130 mm do 900 x 400 mm. **[** nosilci so izmer od 30 x 75 mm do 100 x 450 mm.

Plošče so debeline nad 6 mm.

Pločevine so debeline pod 6 mm in so dobljene s hladnim ali toplim valjanjem.

Cevi pravokotnega ali krožnega prereza, izdelane kot tenkostenske iz hladnovaljane pločevine ali kot debelostenske brez šivov. Tenkostenske cevi pravokotnega prereza (pohištvene cevi) so izmer od 20 x 20 mm do 400 x 400 mm, krožne pa so od 6 mm dalje.

Žice narejene s hladnim vlečenjem ali valjanjem palic. Hladno oblikovane žice iz visokovrednega jekla se pletejo v vrvi ali pa se uporabljajo v snopih kot kabli za prednapenjanje. Žica iz jekla običajne kakovosti se uporablja za izdelavo žebljev, kovic, vijakov, mrež in podobnih izdelkov.

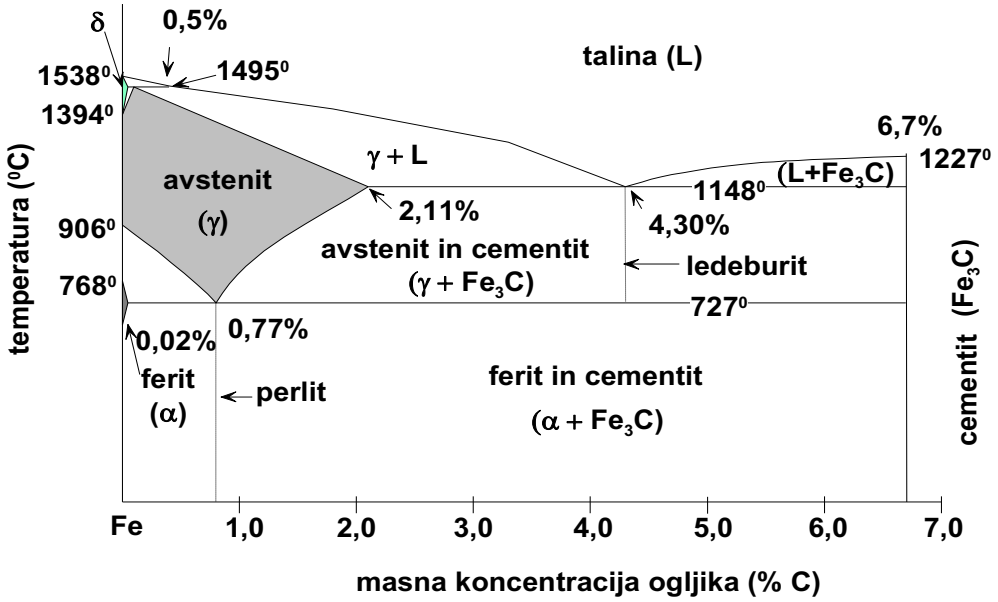
Po posebnem naročilu jeklarne izdelujejo tudi nestandardne izdelke, ki pa so zaradi praviloma manjših količin tudi bistveno dražji.

OSNOVNE VRSTE ŽELEZOVIH KOVIN

Fazni diagram železo-ogljik (Fe-C)

Razmerje med ogljikom in železom se lahko grafično ponazori s faznim diagramom železo-ogljik, ki je prikazan na sliki 38. V faznem diagramu je čisto železo prikazano vzdolž levega robu, odstotek ogljika (do 7%) pa vzdolž abscisne osi. Temperature so risane vzdolž ordinatne osi. Diagram prikazuje, kakšne transformacije doživlja material med počasnim ohlajevanjem.

Ogljik se raztaplja v železu brez razgraditve do koncentracij 0,02% pri temperaturah do 727°C. Tako železo se imenuje *ferit* ali *alfa železo (α železo)*. Ima kubično prostorsko centrirano kristalno mrežo in je feromagnetičen. Pri sobni temperaturi lahko raztopi le 0,008% ogljika. Enofazno območje pri povišanih temperaturah med 1394°C in 1538°C se imenuje *delta železo* (*δ železo)*. Ferit in delta železo se v vsakem primeru obravnavata kot čisto železo. Majhna količina ogljika je v kristalni zgradbi železa raztopljena v *intersticialni* obliki. *Intersticial* je delec, ki ni priključen v vozlišču kristala in zato predstavlja nepravilnost v kristalni zgradbi materiala.



Slika 39: Prikaz razmerja železa in ogljika v jeklih: fazni diagram železo-ogljik (Fe-C)

Karbonsko železo z 0,77% ogljika (eutektoid) postane trdna otopina med temperaturama 727°C in 1371°C. Ta enofazna trdna otopina železa se imenuje *avstenit* ali *gama železo (γ železo*). V avstenitu, ki ima ploskovno centrirano kubično kristalno mrežo, je ves ogljik raztopljen. Avstenit ni magnetičen. Med temperaturama 727°C in 906°C ter koncentraciji ogljika pod 0,8% je zmes avstenita in ferita. Ko se trdna otopina s 0,77% ogljika počasi hladi pod 727°C, se ločuje v dve razpoznavni fazi; v ferit in cementit. Zato se ta točka imenuje *transformacijska temperatura.* Z večanjem koncentracije ogljika do 0,8% in dodajanjem legirnih elementov se transformacijska temperatura niža proti avstenitnem območju.

Z večanjem odstotka ogljika se povečuje delež zmesi imenovane *železov karbid* (Fe_3C) ali *cementit*. Ker je cementit zmes in ne zlitina, je izredno trd in krhek.

Železo je *alotropično* - ima več kristalnih oblik. Tako je ferit *alotrop* s prostorsko kubično mrežo (α in δ železo), avstenit je alotrop s ploskovno centrirano kubično mrežo (γ železo). S segrevanjem α železa nad 906°C se to spremeni v γ železo. Pri tem se spremeni tudi oblika kristalne mreže. Z nadaljnjim segrevanjem nad 1394°C γ železo preide v δ železo, kar pa povzroči, da se oblika kristalne rešetke zopet spremeni. Ta je stabilna do temperature 1538°C, pri kateri se čisto železo tali.

Železo je feromagnetično do temperature 768°C, ki se *imenuje Curiejeva temperatura*. Ko se železo segreje nad to temperaturo izgubi magnetičnost in jo ponovno pridobi z ohlajevanjem pod njo. Nekoč so železo med 768°C in 906°C imenovali *beta železo (β železo*). Ta izraz se je nehal uporabljati, ko so ugotovili, da se kristalna zgradba ne spremeni pri Curiejevi temperaturi.

Ferit vsebuje zelo majhno količino raztopljenega ogljika. Mejne vrednosti so od 0,006% pri 200°C do 0,04% pri temperaturi 727°C. Avstenit vsebuje znatno več ogljika; 0,77% pri temperaturi 727°C do 2,11% pri temperaturi 1148°C. Ogljik je v feritu in avstenitu v intersticialni obliki.

Najnižja temperatura, pri kateri še obstaja enofazna trdna otopina pred prehodom v dvofazno trdno otopino se imenuje *evtektična točka*. Ta se nahaja pri temperaturi 727°C in 0,77% koncentraciji ogljika. Evtektična sestava jekla se imenuje *perlit*. Ta je mešanica ferita in cementita, ki se tvori pri razgradnji avstenita med ohlajanjem. Ima obliko izmenično razporejenih lamelic ferita in cementita, zato se tudi imenuje *lamelirani perlit*.

Izraza *hipoevtektoid* in *hiperevtektoid* se uporabljata za označevanje jekel, ki vsebujejo manj oziroma več ogljika kot evtektoidno jeklo. Meja je 0,77% ogljika. Hipoevtektoidna jekla sestojijo iz perlita z velikim deležem ferita. Nizko karbonska jekla vsebujejo bistveno več ferita kot perlita. Ferit se kaže v obliki svetlejših zrn, perlit pa pogosto v obliki temnejših zrn. Srednje karbonska jekla vsebujejo približno enako količino ferita in perlita, visoko karbonska jekla pa so v glavnem sestavljena iz perlita. Hiperevtektoidna jekla so tudi lita železa.

Poleg opisanih vrst jekel obstaja tudi martenzitno jeklo. To je zelo trdo in krhko in nastane pri zelo hitrem ohlajevanju iz avstenitne faze. Vsebuje ferit, ki je močno prepojen z raztopljenim ogljikom. Zaradi hitrega ohlajevanja, se avstenitna raztopina ne more razdvojiti v ferit in cementit. Ogljikovi atomi so intersticijsko ujeti med prostorsko centrirane tetragonalne mreže. Legirni elementi znižujejo temperaturno območje, v katerem nastaja martenzit. Nizko legirana jekla se lahko začnejo preoblikovati v matrtenzit pri 430°C, visoko legirana jekla pa že pri 318°C. Trdota martenzita je odvisna od količine ogljika. Na faznem diagramu martenzit ni prikazan zaradi hitre transformacije, saj na diagramu ni mogoče prikazati časovne komponente.

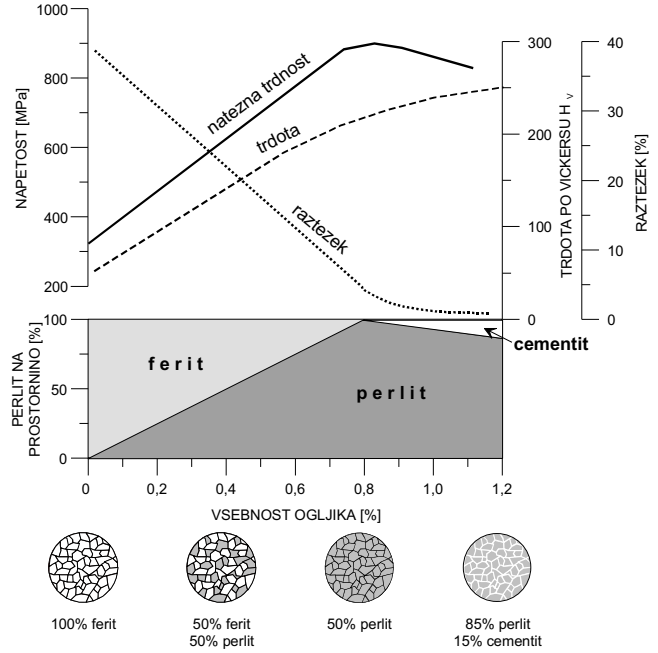
Jeklo

Jeklo je po uporabi najbolj razširjena železova kovina. Njegove lastnosti so odvisne od vrste in količine dodanih - legirnih - elementov. Ogljik je najbolj pomemben legirni element jekel.

Preglednica 16: Skupine jekel glede na vsebnost ogljika

Vrsta jekla	Vsebnost ogljika (%)	Uporaba
Nizko karbonsko (mehko)	0,10 - 0,25	pločevine, konstrukcije

Srednje karbonsko	0,20 - 0,50	stiskanje, osi, orodja, rezila
	0,50 - 0,65	tračnice, vzmeti, kladiva
Visoko karbonsko	0,65 - 0,95	strojna orodja, žage, svedri
Livarsko jeklo	nad 1,00	odlitki



Slika 40: Vpliv količine ogljika na mikrostrukturo in mehanske lastnosti karbonskega jekla

Jekla z nizko vsebnostjo ogljika ali ***nizko karbonska jekla***, so razmeroma poceni, mehka, duktilna in se dajo enostavno variti. Niso primerna za naknadno toplotno obdelavo. Uporabljajo se za pločevine iz katerih se izdelujejo avtomobilske karoserije, rezervoarji in cevi velikih premerov, elementi mostnih konstrukcij in armatura za betonske konstrukcije. Armatura za betonske konstrukcije se izdeluje tudi iz srednje karbonskih jekel. Ta jekla se uporabljajo tudi za izdelavo vseh vrst strojev in naprav, tudi v avtomobilski in letalski industriji. Trdnost karbonskih jekel je predvsem odvisna od količine ogljika, kot je to razvidno iz slike 39. Povečana količina ogljika pa vpliva tudi na zmanjšanje duktilnosti. Trdota karbonskih jekel je razmeroma nizka in pada z zvišanjem temperature. Taka jekla so krhka pri nizkih temperaturah in občutljiva na korozijo v večini okolij. Karbonska jekla se lahko izboljšajo z različnimi dodatki, kot je to razvidno iz preglednice 17.

Preglednica 17: Vpliv legirnih elementov na izboljšanje karbonskih jekel

Legirni element	Dodana količina v težnostnih %	Učinek legirnega elementa
Aluminij (Al)	mala	Dezoksidira talino, ovira rast zrn, poveča površinsko trdoto.
Bor (B)	0,001 - 0,003	Poveča utrditev.
Krom (Cr)	0,5 - 4 4 - 18	Poveča utrditev in zviša trdnost. Zviša odpornost na korozijo in oksidacijo.
Kobalt (Co)	1 - 12	Zviša trdoto, poveča življenjsko dobo orodij.

Mangan (Mn)	0,25 - 0,4 pod 1	Odstranjuje žveplo z ustvarjanjem MnS v obliki vključkov in s tem zmanjšuje krhkost jekla. Poveča utrditev, zviša trdnost in trdoto.
Molibden (Mo)	0,2 - 5	Poveča utrditev, zviša trdnost in trdoto.
Nikelj (Ni)	2 - 5 12 - 20	Zviša žilavost posebej še pri nizkih temperaturah. Zviša odpornost na korozijo in oksidacijo, ko se doda še Cr.
Silicij (Si)	0,2 - 0,7 več kot 2	Dezoksidira talino, zviša trdnost. Zniža izgube pri namagnetenju (jedra transformatorjev), zviša električno upornost.
Žveplo (S)	0,08 - 0,15	Nezaželeno, a če se tvori MnS, se jeklo lažje obdeluje.
Volfram (W)	do 20	Zviša trdoto tudi pri višjih temperaturah in poveča utrditev.
Vanadij (V)	do 5	Zviša trdnost, a pri tem ne zmanjša duktilnosti.

Visoko karbonska jekla so primerna za izdelavo rezil, orodij, nakoval in podobnih izdelkov, kjer je pomembna ustrezna trdota in trdnost materiala. Z višanjem količine ogljika se zvišuje njegova cena, povečuje krhkost oziroma znižuje duktilnost, zmanjšuje obdelovalnost, znižuje tališče, zmanjšuje možnost varjenja, povečujeta pa se trdota in trdnost. Nekatere lastnosti jekla se spreminjajo tudi s hladno obdelavo. Pri hladnem oblikovanju se pri sobni temperaturi jeklo plastično deformira. Značilni proizvodi, nastali s hladnim preoblikovanjem, so pločevine in brezšivne cevi. Pri hladnem preoblikovanju nastajajo notranje napetosti, ki se lahko sprostijo z dodatno toplotno obdelavo izdelkov. Poleg ogljika se kot dodatki najbolj pogosto uporabljajo aluminij, mangan, molibden, nikelj in silicij. V jeklu se zaradi nepopolnosti proizvodnega procesa nahajajo tudi nezaželeni elementi, ki se lahko odstranijo le z dodatnimi postopki, ki zelo zvišujejo njegovo ceno. Kisik povečuje krhkost jekla, kar se da nevtralizirati z dodajanjem silicija ali aluminija, ki sta bolj aktivna do kisika kot jeklo. Z aluminijem se dosega tudi drobnejša granulacija jekla in s tem večja žilavost. Mangan povečuje trdnost in trdoto ter povzroči utrjevanje jekla. Žveplo, ki se nahaja v apnencu in železni rudi, povzroča znižanje trdnosti jekla pri povišanih temperaturah. Bor povečuje utrditev jekla in se lahko uporablja le skupaj z aluminijem. Majhne količine bakra zvišujejo korozijsko odpornost jekla. Korozijska odpornost jekla se močno zviša z dodajanjem kroma. Niobij zvišuje trdnost jekla pri normalnih temperaturah, titan pa tudi pri visokih temperaturah. Volframov karbid se dodaja zaradi zvišanja trdote, vanadij pa zaradi zvišanja žilavosti in odpornosti na udarce.

Sodobna konstrukcijska jekla, ki se proizvajajo v Sloveniji

Razvoj konstruktorstva je zahteval izboljšane lastnosti jekel, ki so dosegljive z novimi ponovčnimi tehnologijami toplotne obdelave jekel. Nova generacija konstrukcijskih jekel so *drobnozrnata mikrolegirana jekla*. Ta jekla odlikuje višja meja plastičnosti in visoka trdnost ob razmeroma visoki žilavosti in sposobnosti vročega ter hladnega preoblikovanja. Zaradi svojih lastnosti ta jekla omogočajo snovanje lažjih in s tem bolj ekonomičnih konstrukcij. Železarna Jesenice uspešno sledi svetovnemu razvoju na tem področju, saj njen proizvodni program vsebuje nekaj vrst sodobnih jekel. Prvi mikrolegirani jekli, ki sta na trgu znani pod imeni NIOBAL 43 in NIOVAL 47, so za industrijsko uporabo izdelali že leta 1966. Od takrat so razvili več vrst jekel, ki jih dobavljajo v obliki srednje in debele pločevine. Meje plastičnosti teh jekel so

od 390 do 960 MPa, dobre žilavostne lastnosti pa zagotavljajo brezhibno delovanje konstrukcij do temperature -60°C izjemoma tudi do -100°C.

Drobnozrnata mikrolegirana jekla, ki jih proizvajajo v Železarni Jesenice, se lahko razvrstijo v tri skupine:

1. skupina: Jekla z mejo plastičnosti med 390 in 490 MPa dobavljajo v normaliziranem stanju. Priporočajo jih za izdelavo konstrukcij, ki so izpostavljene temperaturam do -20°C (NIOBAL 43, NIOVAL 47, NIOVAL 50, NIONICRAL 40, NIONICRAL 45).

2. skupina: Visokotrdnostna jekla z mejo plastičnosti med 590 in 960 MPa, dobavljajo v poboljšanem stanju in jih priporočajo za izdelavo konstrukcij, ki so izpostavljene temperaturam do -60°C (NIONICRAL 60, NIONICRAL 70, NIONICRAL 90, NIONICRAL 96). Pri teh jeklih so prihranki na teži konstrukcije največji.

3. skupina: Novejša drobnozrnata jekla z mejo plastičnosti med 390 in 490 MPa, dobavljajo v poboljšanem stanju in jih priporočajo za izdelavo konstrukcij, kjer se zahteva dobra žilavost pri temperaturah do -60°C in v posebnih primerih tudi do -100°C (NIOMOL 390, NIOMOL 490, NIOMOL 420K in NIOMOL 490K) Ta jekla poleg visoke žilavosti odlikuje tudi odlična sposobnost hladne deformacije in dobra varivost brez predgrevanja. Jekli z oznako K imata povišano odpornost proti napetostni koroziji.

4. skupina: Drobnozrnata jekla visoke trdote in trdnosti z mejo plastičnosti med 560 in 690 MPa in trdoto med 235 in 320 HB dobavljajo v normaliziranem in poboljšanem stanju (konstrukcijska jekla NICRODUR 265, NICRODUR 280, NICRODUR 350 in vzmetno jeklo NICRODUR 60 RC).

Zaradi primerne žilavosti in visoke meje plastičnosti se drobnozrnata mikrolegirana jekla uporabljajo za izdelavo varjenih jeklenih konstrukcij kot so: visokotlačni cevovodi, mostovi, posode pod pritiskom in različne varjene konstrukcije, kjer je pomembna majhna teža v primerjavi z njihovo nosilnostjo (vozila, cisterne, avtodvigala itd.) NICRODUR jekla se uporabljajo za konstrukcije, ki so med uporabo izpostavljene večji površinski obrabi (kontejnerji za koks, transporterji za prevoz trdnih razsutih tovorov, deli težkih gradbenih strojev, deli drobilcev in mlinov itd.)

Nerjavno jeklo

Običajna, površinsko nezaščitena jekla razmeroma hitro rjavijo. Visoke temperature dodatno pospešujejo oksidacijsko korozijo. Ta proces se da upočasniti z dodajanjem kroma ali niklja. Tako legirana jekla se imenujejo *nerjavna jekla*. Pri visokem odstotku dodanega kroma - nad 12% - postanejo jekla visoko korozijsko odporna, ker se na njihovi površini ustvari plast kromovega oksida.

Nerjavna jekla se delijo v tri skupine: feritna, avstenitna in martenzitna. ***Feritna nerjavna jekla*** vsebujejo od 12 do 25% kroma in od 0,1 do 0,35% ogljika. Imajo feritno strukturo vse do tališča, zato se ne more tvoriti avstenit. Taka jekla nimajo trde martenzitne strukture, lahko pa se utrdijo z mehansko obdelavo. Zaradi lahke obdelave se pogosto uporabljajo za izdelavo okrasnih izdelkov in orodij.

Avstenitna nerjavna jekla nastanejo z dodajanjem kroma ali niklja, pri čemer se tvorijo kubične ploskovno orientirane kristalne mreže. Ker so nemagnetna, se jih z lahkoto prepozna s pomočjo magneta, ki se na njih ne prime. Imajo nizko vsebnost ogljika - do 0,15%. Vsebujejo med 16 in 26% kroma in od 6 do 23% niklja. Posebno avstenitno jeklo je 18/8 nerjavno jeklo, ki vsebuje 18% kroma in 8% niklja. Uporablja se za izdelavo posod, ki jih uporabljajo v kemični industriji, za orodja v prehrambeni industriji, za arhitekturne elemente in za vse tiste izdelke, pri katerih ni pomembna posebno visoka trdnost jekla. Avstenitna jekla, ki se dajo variti, vsebujejo tudi majhno količino niobija ali titana.

Martenzitna nerjavna jekla vsebujejo od 6 do 18% kroma in od 0,1 do 1,5% ogljika. Lahko vsebujejo do 2% niklja, vendar so veliko krat tudi brez njega. Ta jekla se lahko utrdijo s hitrim ohlajevanjem iz avstenitnega območja. Zaradi svoje trdote je martenzitno nerjavno jeklo primerno za izdelavo rezil in jedilnega pribora. Zaradi trdote ga je težje obdelovati in variti, je pa tudi magnetno.

Ostale vrste nerjavnih jekel se lahko izdelajo z dodajanjem različnih legirnih materialov in z različnimi postopki utrjevanja. Tako se dobijo jekla visoke trdnosti in korozivne odpornosti, ki so znana kot visokolegirana jekla ali *superzlitine*. Vsebujejo od 18 do 25% niklja, 7% kobalta in majhno količino ostalih elemetov, kot so molibden, titan in cirkonij. Ta jekla se segrevajo do 822°C. Da bi se dosegla enakomerna struktura, je hitrost segrevanja odvisna od debeline jeklenega elemeta. Za vsakih 2,5 cm debeline je čas segrevanja 1 uro. Po segrevanju se na zraku hladijo do sobne temperature. Po ohladitvi se ponovno segrevajo na 486°C v približno treh urah. Po toplotni obdelavi se jekla mehansko hladno oblikujejo in s tem dobijo višje trdnosti. Prednost takih jekel je, da se razmeroma lahko strojno obdelujejo. Uporabljajo se za izdelavo velikih konstrukcij kot so mostovi, zgradbe in deli letal.

Lito železo

Poleg jekel se v gradbeništvu uporabljajo tudi druge železove kovine, kot so siva in bela litina, duktilno lito železo, kovno lito železo in kovno železo. Za te materiale je značilno, da poleg železa vsebujejo več kot 2% ogljika in določene količine drugih elementov.

Siva litina (gus) je najbolj pogosto uporabljano lito železo. Vsebuje od 3 do 3,5% ogljika in več kot 1% silicija ter je temno sive barve. Ogljik se v železu nahaja intersticijsko do koncentracije 0,8%, nad tem pa v obliki železnega karbida ali grafitnih lističev. Prekomerne količine ogljika tvorijo mikrorazpoke različnih velikosti in oblik, ki znižujejo trdnost kovine. Grafitni lističi dajejo kovini temno barvo, ki je izrazita na prelomnih površinah litega železa. Visoki odstotki silicija pomagajo pri nastanku grafita. *Siva litina* je praktično neduktilna in se lomi pri hitrem ohlajevanju ali segrevanju. Različni standardi ločijo sive litine glede na njihovo natezno trdnost. Siva litina se danes uporablja tam, kjer je potrebna visoka tlačna trdnost, lahka obdelava izdelkov in sposobnost dušenja tresljajev. Pred masovno uporabo jekel za konstrukcijske namene, so iz sive litine izdelovali tudi konstrukcijske elemente.

Bela litina vsebuje med 2,5 in 3,5% ogljika in od 0,5 do 1,5% silicija. Od sive litine se razlikuje po tem, da v njej ni grafitnih lističev, temveč se ogljik nahaja v železovem karbidu - cementitu. Zato je sveža prelomna površina bele litine svetla in srebrnkaste barve. Bela litina je trda in krhka, zato se uporablja za izdelavo drsnih delov ležišč strojnih osi, kjer se zahteva visoka obrabna odpornost materiala.

Nodularna ali duktilna litina nastane pri počasnem ohlajevanju litega železa, kateremu je dodana majhna količina (okoli 0,5%) kalcija, cerija, litija, magnezija ali natrija. Pri tem dodatki povzročijo nastanek ogljikovih kroglic - *nodulov ali sferulitov* namesto grafitnih lističev, ki so značilni za običajno sivo litino. Kroglice ne povzročajo mikrorazpok, zato je nodularna litina duktilna in ima višjo natezno trdnost od sive litine. Nodularna litina vsebuje okoli 4% ogljika in 2,5% silicija. Uporablja se za izdelavo blokov motorjev, batov, pogonskih ročic in ostalih strojnih delov.

Kovne litine nastajajo s toplotno obdelavo belih litin. Litine z vsebnostjo od 2 do 3% ogljika se segrevajo do približno 960°C, kjer se iz železovega karbida tvorijo kroglice (sferuliti). Tako se dobi kovina, ki je podobna nodularni litini. Uporabljata se dve vrsti kovnih litin: *perlitna* in *feritna*. *Feritna kovna litina* se segreva nekaj ur na 925°C in se nato hladi tik nad evtektično temperaturo. Ohlajevanje nato poteka počasi s hitrostjo od 6 do 14°C na uro. Po enodnevnem ohlajevanju se presežni ogljik oblikuje v kroglice. Po tem se odlitek lahko hitreje ohladi na sobno temperaturo. *Perlitna kovna litina* se segreva na 925°C, vendar se po tem hitro ohladi na sobno temperaturo z oljem ali zrakom. Litina se nato ponovno segreje na temperaturo od 458°C do 486°C v nekaj urah tako, da se perlit oblikuje v kroglice. S tem procesom se dobi kovna litina, ki ima razmeroma veliko duktilnost.

MEHANSKE LASTNOSTI JEKLA

Natezni diagram

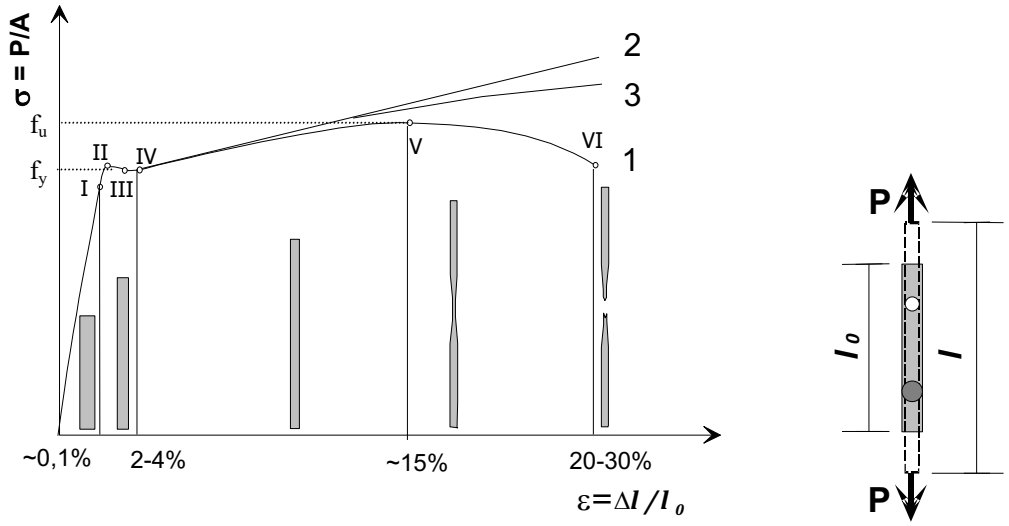
Najbolj značilne mehanske lastnosti kovin se lahko ugotovijo na osnovi nateznega preizkusa kovinske epruvete (nateznega preskušanca), ki je izdelana v odvisnosti od različnih pogojev (vrsta kovinskega elementa, vrsta preskuševalnega stroja, itd.). Na osnovi diagrama dobljenega z nateznim preskusom se lahko določijo: meja elastičnosti, meja plastičnosti, trdnost, porušna trdnost, elastičnost, žilavost in duktilnost kovine. Standardi določajo hitrost nateznega preskusa. Ta znaša izraženo s prirastki obremenitve 0,1 MPa/s ali s prirastki specifičnih deformacij približno 1%/s.

Na sliki 40 je prikazan značilni natezni diagram mehkega jekla in skice oblike preskušane palice pri različnih stopnjah obremenitve. V diagramu se jasno ločijo posamezni odseki, ki ponazarjajo stanje preskušanca pri različnih stopnjah obremenitve oziroma deformiranosti:

0 - I Elastično območje, reverzibilen odnos napetost - specifična deformacija, Hookova premica, modul elastičnosti $E=\sigma/\varepsilon$, ε_I = 0,1% do 0,2% (I je točka na meji elastičnosti).

I - IV Območje plastičnega tečenja, ε_{IV} = 2% do 4% pri konstrukcijskih jeklih, dislokacije se premikajo skozi kristale in povzročajo nove dislokacije. Ko jih je toliko, da ovirajo njihovo napredovanje, se material utrdi in potrebna je dodatna obremenitev za nadaljevanje plastifikacije (IV je točka na meji utrditve).

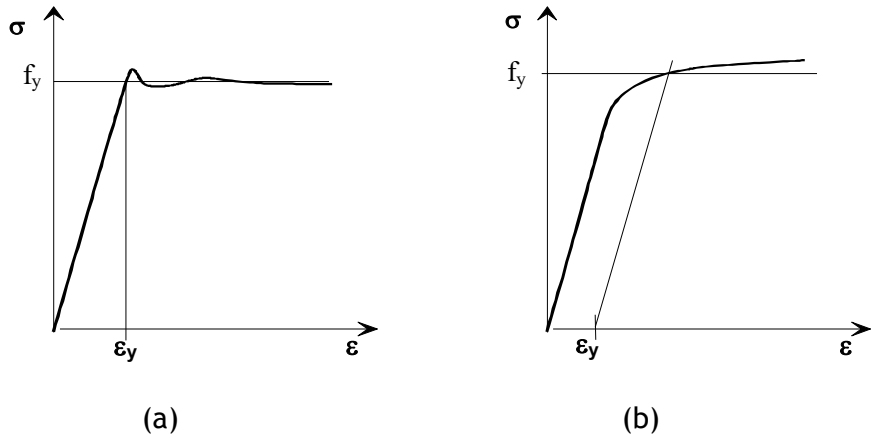
IV - V, VI Obremenitve (napetosti) se povečujejo in s tem tudi plastične deformacije, kristali se rušijo in material se končno poruši po celotnem prerezu.



Slika 41: Natezni diagram mehkega jekla

Na osnovi σ - ε diagrama se lahko določijo: meja elastičnosti (σ_v, $\sigma_{0,2}$), meja plastičnosti (σ_p), trdnost (σ_m), meja porušitve (σ_r), modul elastičnosti (E), žilavost in duktilnost materiala. V večini primerov sta meja elastičnosti in meja plastičnosti zelo blizu in se zato obravnava le meja plastičnosti, ki se označuje z (f_y). Trdnost jekla se običajno označuje z (f_u).

Pri jeklih in ostalih kovinah brez izrazite meje plastičnosti se le-ta definira kot napetost določljiva na osnovi 0,2% specifične deformacije ($\sigma_{0,2}$). Ta meja je na presečišču σ - ε diagrama in vzporednice elastičnemu delu diagrama potekajoče skozi točko 0,2% na abscisni osi.



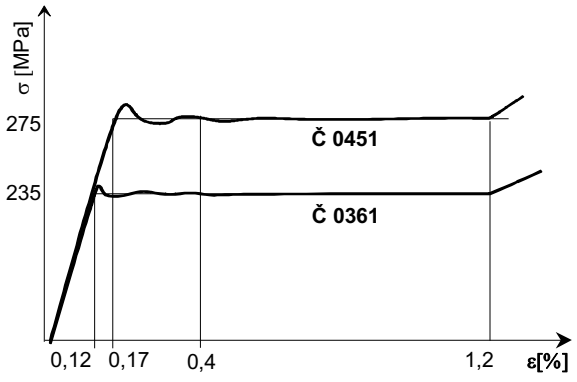
Slika 42: Določanje meje plastičnosti pri izraziti (a) in neizraziti plastičnosti (b)

Modul elastičnosti se določa na osnovi naklona Hookove premice, ki je značilna za elastični, proporcionalni del σ - ε diagrama ($E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$).

Žilavost ponazarja površina, ki jo omejujeta σ - ε diagram in abscisna os. Lomna žilavost se definira kot energija, ki se porabi za ločitev površine materiala pri širjenju razpoke. Določa se s pomočjo preskusa natezne zarezne žilavosti s postopkom, ki ga je predlagal Charpy ali s podobnimi postopki. Standardizirani preskušanec ima v naprej narejeno ostro zarezo. Preskušanec se obremeni z udarcem nihala z glavo, odklon nihala po porušitvi pa omogoča meritev porabljene energije za porušitev preskušanca. Standardi razvrščajo jekla tako po njihovi nosilnosti kot po njihovi žilavosti in duktilnosti. Žilavost se zmanjšuje v odvisnosti od padca temperature. Že razmeroma majhno znižanje temperature povzroča velik padec žilavosti.

Duktilnost je definirana ali kot razmerje deformacij na meji trdnosti in meji elastičnosti ali pa kot razmerje deformacij na meji porušitve in meji elastičnosti. Pri mehkih jeklih znaša dutilnost natezne palice glede na njeno nosilnost od 100 do 200, pri visokonosilnih in krhkih žicah za prednapenjanje pa le 5. Razmerje med mejo nosilnosti in mejo elastičnosti znaša od 1,1 (trda jekla) do 1,8 (mehka jekla). Duktilnost se pri armaturnih palicah določa tudi z upogibnim preskusom okoli trna standardiziranih izmer. Duktilna jekla se lahko upognejo za 180°, ne da bi nastale razpoke na zunanji krivini preskušanca.

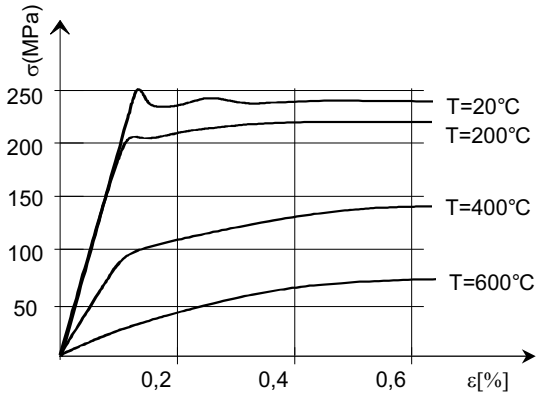
V praksi običajno uporabljamo "tehnično obliko σ - ε diagrama" (krivulja 1 na sliki 41). To je oblika, pri kateri upoštevamo pri izračunu napetosti osnovni nedeformirani prerez preskušanca. Ker se le-ta dejansko spreminja, bi ob upoštevanju te spremembe dobili dejanski diagram, ki je na sliki prikazan kot krivulja 2. Ob upoštevanju kontrakcije prereza, ki nastane pri plastčnih deformacijah, je dejanski diagram treba nekoliko korigirati, kot to ponazarja krivulja 3. Tlačni diagram jekla je podoben nateznemu diagramu s to razliko, da je pri dejanskemu diagramu treba upoštevati plastično razširitev prereza namesto zoženja. Obnašanje materiala do meje nosilnosti je pomembno za analizo globalne nosilnosti konstrukcije, nadaljnje obnašanje do porušitve pa je pomembno za lokalno obnašanje konstrukcije.



Slika 43: Začetna dela tehničnih diagramov mehkih konstrukcijskih jekel

Porušitev nastopi, ko se izčrpa kohezijska trdnost materiala. Ta je strukturna lastnost materiala in je skoraj neodvisna od temperature, hitrosti deformacij in napetostnega stanja. Vendar pa hitrost obremenjevanja, temperatura in napetostno stanje vplivajo na obnašanje materiala med obremenitvijo zaradi ostalih lastnosti kot so dislokacije v kristalnih rešetkah, vključki, notranje

razpoke, preostale napetosti itd. Osnovna načina porušitve sta krhki in duktlni lom. Krhki lom nastane brez plastičnih deformacij prereza pravokotno na smer obremenitve, prelomna površina pa ima kristalast izgled. Drsni ali duktilni lom nastane pod kotom 45° ob zoženju prereza, prelomna površina pa ima svilnat izgled. Spremembe temperature vplivajo na mehanske lastnosti kovin.



Slika 44: Vpliv temperature na mehanske lastnosti konstrukcijskega jekla

Z nižanjem temperature se povečuje krhkost in povečuje nosilnost, z višanjem pa znižuje nosilnost in povečuje duktilnost. Pri navadnem konstrukcijskem jeklu segretem na 600°C, se tečenje pojavi že pri obremenitvah, ki so približno štirikrat nižje od meje plastičnosti pri sobni temperaturi. Pri nizkih temperaturah je pogost pojav krhkega loma. Ta nastane tudi zaradi vpliva zaostalih napetosti sled varjenja in velike hitrosti deformacij.

S cikličnim ponavljanjem nateznih in tlačnih obremenitev intenzivno utrujamo material. Proporcionalni del diagrama (linearni del, Hookova premica) se postopoma spreminja v krivuljo, meja plastičnosti pa se močno niža. Ta pojav, ki se imenuje Bauschingerjev efekt, je pomemben pri analizi konstrukcij, ki so izpostavljene izmeničnim deformacijam. Te nastopijo pri delovanju potresnih sunkov in pri drugih dinamičnih obremenitvah konstrukcijskih elementov.

Pri dinamičnem obremenjevanju materiala se spreminjajo njegove trdnostne lastnosti zaradi pojava utrujanja. Woehler je 1840 dokazal, da se kovinska palica pretrga pri sili, ki je manjša od sile potrebne za pretrg pri konstantno naraščajočem obremenjevanju, če se zadostikrat obremeni z manjšo silo. Utrujanje je pojav ponavljanja plastičnih deformacij in s tem povezanim potovanjem dislokacij v kristalnih rešetkah. Pri tem se pojavi sistem mikrorazpok na mejah in znotraj kristalov. Te nastanejo tudi zaradi napetostnih konic ob notranjih napakah v materialu. S ponavljanjem deformacij se razpoke širijo do loma materiala, ki je bodisi krhek bodisi duktilen.

Na mehanske lastnosti poleg sestave kovine vplivajo tudi nekovinski vključki in zračni mehurji. Vključki in mehurji so posledica tehnoloških procesov izdelave jekel in stopnje njihove rafinacije. Najpogosteje so vključki nastali iz žlindre, raznih oksidov, sulfidov in silikatov. Ti se pri oblikovanju jekla sploščijo, razpotegnejo ali drugače razporedijo. S tem v homogenem jeklenem okolju povzročijo anizotropijo in s tem slabše lastnosti materiala v eni izmed smeri. Nastanejo razpoke, ki povzročijo "lameliranost" (pogosti vzrok je manganov sulfid MnS) ali "dvoplastnost" okoli večjih lunkerjev žlindre. Te napake se odkrivajo z ultrazvočnimi ali rentgenskimi napravami. Glede na tehnologijo

obdelave jekla ločimo več stopenj čistosti. Ena izmed klasifikacij čistosti, na katero so se sklicevali tudi standardi JUS, je ločevanje treh vrst jekla: nepomirjenega, pomirjenega in specialno pomirjenega. S kemičnim postopkom dezoksidacije se iz staljenega jekla lahko izločajo tako vključki kot zračni mehurji. Pri nepomirjenem jeklu so vključki razprostranjeni po celotni prostornini kovine. Pri pomirjenem jeklu so ti vključki drobnejši, manj jih je in so razporejeni bližje enemu koncu jeklenega ingota. Pri specialno pomirjenem jeklu so manjše količine nečistoč zbrane pri vrhu ingota, ostali del jeklene mase pa je praktično brez vključkov.

Lastnosti konstrukcijskih in betonskih jekel

Konstrukcijska jekla

V standardih so podane oznake konstrukcijskih jekel, iz katerih se lahko razberejo njihove tehnične lastnosti. Pri nas so bili dolgo časa v veljavi JUS standardi, sedaj pa prehajamo na nove oznake v skladu z evropsko standardizacijo. Zaradi primerjave in še vedno prisotne tehnične dokumentacije, ki izhaja iz JUS standardov, ter zaradi povezanosti z nemškimi standardi (DIN) in evropskimi standardi (EN) v nadaljevanju obravnavamo označevanje jekel po JUS, po DIN in po EN. Pri tem se sklicujemo tudi na evropski predpis za jeklene konstrukcije Eurocode 3.

Po standardu JUS C.B0.500 (1988) so jekla razvrščena v več trdnostnih stopenj, ozirajoč se na natezno trdnost jekla (f_u). Znotraj vsake trdnostne stopnje se jekla razvrščajo tudi v štiri skupine žilavosti, glede na zagotovljeno žilavost 3,5 J/cm^2 pri temperaturah +20°C (skupina B), pri 0°C (skupina C) in -20°C (skupina D). Pri skupini A se zagotovitev žilavosti ne zahteva.

Pri označevanju jekel po JUS-u so se uporabljali trije sistemi oznak: stari, novi in tehnični. Po novem sistemu so se združile posamezne kategorije jekel, pri katerih se natezne trdnosti niso veliko razlikovale. Tako na primer po novem sistemu v skupino Č.0360 sodijo jekla, ki so po starem sistemu bila v skupinah Č.0300, Č.0345 in Č.0360. Pri tem številčna oznaka predstavlja natezno trdnost izraženo v MPa. Pri oznaki jekel se kot zadnja cifra lahko pojavi št. 1, 2 ali 3. Te označujejo nevarnost krhkega loma konstrukcije. Po novem označevanju so jekla razvrščena od Č.0270 do Č.0745.

Tehnična oznaka jekel po JUS-u podaja informacijo tako o meji plastičnosti kot o stopnji žilavosti in stopnji pomirjenosti (čistosti) jekla. Tako na primer oznaka ČN 24-B_1 pove, da gre za navadno pomirjeno jeklo (stopnja 1) z mejo plastičnosti 24 kp/mm^2 (240 MPa) in z zagotovljeno žilavostjo 3,5 J/cm^2 pri sobni temperaturi. Nepomirjena jekla se označujejo z 2, specialno pomirjena pa nimajo oznake. Tako je specialno pomirjeno jeklo z mejo plastičnosti 360 MPa in zagotovljeno žilavostjo pri -20°C označeno kot ČN 36-D.

V nemškem predpisu DIN 17 100 označujejo jekla od St 33 do St 70. "St" je okrajšava besede "Stahl", številka pa označuje natezno trdnost izraženo v (kN/cm^2). Tako je jeklo St 37 podobno jeklu Č.0360. Njegova natezna trdnost znaša 370 MPa. Za bodočo projektantsko prakso pa so pomembne oznake, ki jih uvajata nova evropska standarda za običajna konstrukcijska jekla (EN 10025:1993) in za drobnozrnata konstrukcijska jekla (EN 10113:1993).

Mehka konstrukcijska jekla so označena s črko S (steel), številčno oznako, ki predstavlja mejo plastičnosti jekla, in oznako, ki označuje stopnjo žilavosti jekla (na pr. S 355 J0). Standard obravnava jekla S 235, S 275 in S 355. Vse tri vrste so v klasah JR, J0 in J2, najkakovostnejše jeklo pa tudi v klasi K2. Z oznako JR se označujejo mehka jekla, pri katerih je zagotovljena minimalna lomna energija po Charpy-V testu v iznosu 27 J pri sobni temperaturi (20°C). Boljša jekla so označena z J0 (žilavost 27 J pri 0°C), z J2 (žilavost 27 J pri -20°C) in s K2 (žilavost 27 J pri -30°C ali žilavost 40 J pri -20°C).

Drobnozrnata konstrukcijska jekla so označena na analogen način kot mehka jekla. Standard obravnava jekla S 275, S 355, S 420 in S 460. Vse štiri vrste jekel so razdeljene v štiri skupine glede na stopnjo obdelave in lomne žilavosti. Dodatna oznaka (N) označuje normalizirano jeklo z minimalno lomno žilavostjo pri -20°C, oznaka (M) pa termomehansko obdelano jeklo enake žilavosti. Oznaka (NL) označuje normalizirano jeklo z minimalno lomno žilavostjo pri -50°C, oznaka (ML) pa termomehansko obdelano jeklo enake žilavosti.

Sodobni evropski predpisi za projektiranje jeklenih konstrukcij Eurocode 3 se sklicujejo na starejši verziji navedenih evropskih standardov, vendar bodo v bodoče te oznake usklajene. V sedanji verziji Eurocoda 3 (ENV 1993-1-1:1992) so jekla označena z (Fe) po latinski besedi "ferum", z vrednostjo karakteristične natezne trdnosti (360, 430 in 510), ostali del oznake pa označuje stopnjo žilavosti in obdelave podobno kot pri zgoraj obravnavanih novih evropskih standardih za jekla. Tako so na primer jekla z oznako S 275 in Fe 360 istovetna, njihovi karakteristični meji pa sta f_y = 275 MPa in f_u = 360 MPa.

Eurocode 3 zahteva uporabo duktilnih jekel. Duktilnost je opredeljena z naslednjimi kriteriji:

- $f_u/f_y \geq 1{,}2$
- Porušni relativni raztezek ne sme biti manjši od 15%. Določa se na proporcionalnem preskušancu z merilno dolžino $\ell_0 = 5{,}65\sqrt{A_0}$, kjer je A_0 površina začetnega prereza preizkušanca.
- Relativni raztezek ε_u, ki pripada natezni trdnosti f_u, mora biti 20 krat večji od relativnega raztezka ε_y, ki pripada meji plastičnosti f_y.

Konstrukcijsko jeklo mora imeti dovolj veliko lomno žilavost, da pri najnižji obratovalni temperaturi v vsej življenjski dobi ne pride do krhkega loma. Kot minimalna lomna energija se upošteva dosežena lomna energija 27 J pri Charpy-V preizkusu. Pri projektiranju jeklenih konstrukcij se upoštevajo tudi sledeče konstantne lastnosti jekel:

- modul elastičnosti E = 210 000 MPa,
- strižni modul $G = E / 2(1+\nu) \approx 80\,770$ MPa,
- Poissonov količnik ν = 0,3 ,
- specifični toplotni raztezek $\alpha = 1{,}2\ 10^{-5}$ /°C in
- gostota ρ = 7850 kg/m^3.

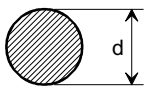
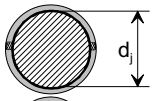
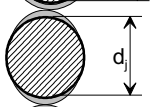
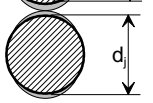
Betonska jekla

Stari predpisi za projektiranje betona in prednapetega betona (PBAB)

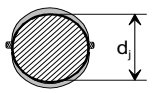
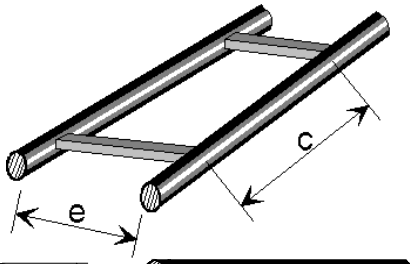
Velika količina jekla se v gradbeništvu porabi za armiranje betona. To jeklo se uporablja v obliki palic krožnega prereza. Palice se izdelujejo z vročim

valjanjem, nekatere vrste pa tudi z naknadnim hladnim preoblikovanjem. Jeklo za armiranje mora imeti ustrezno duktilnost in žilavost ob zahtevani trdnosti. Pogosto se zahteva, da mora biti jeklo za armiranje konstrukcij primerno tudi za varjenje. Z vročim valjanjem se proizvajajo gladke in rebraste palice, z naknadnim hladnim preoblikovanjem pa spiralno rebrasta TOR armatura, Bi-armatura, palice za varjene mreže in visokovredne žice za prednapenjanje. Na preglednicah, ki sledijo, so prikazane značilnosti posameznih vrst betonskega jekla, kot jih obravnavajo standardi JUS in pravilnik PBAB.

Preglednica 18: Vroče valjana jekla za armiranje betona

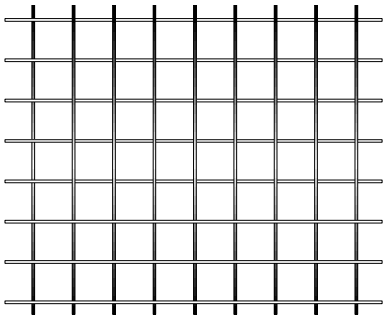
Gladko betonsko jeklo ϕ6-ϕ36 GA 220/340 (Č0 002), GA 240/360 (Č0 300)	
Rebrasto betonsko jeklo ϕ6-ϕ14 RA 1 400/500 (Č0 550), z vzdolžnim rebrom	
Rebrasto betonsko jeklo ϕ6-ϕ40 RA 2 400/500 (Č0 550), z vzdolžnim rebrom	
Rebrasto betonsko jeklo ϕ8 RA 3 400/500 (Č0 550), brez vzdolžnega rebra	
Rebrasto betonsko jeklo ϕ8 RA 4 400/500 (Č0 550 in Č0 551), brez vzdolžnega rebra	

Preglednica 19: Hladno preoblikovana jekla za armiranje betona

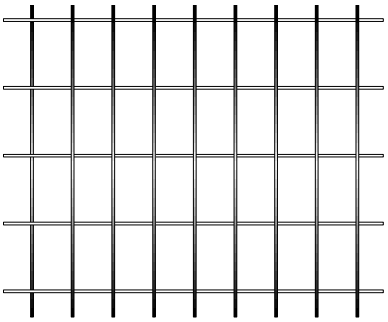
TOR jeklo, ϕ8-ϕ14 TOR 50, 500/550 (Č0 554) TOR 60, 500/550 (Č0 654)	
Bi jeklo ϕ3,1-ϕ11,3, e=20mm, c=95mm Bi 31 (2ϕ3,1, F_a = 0,15cm^2) do Bi 113 (2ϕ11,3, F_a = 2,0cm^2) BiA 600/800, vlečena jeklena žica	
Žica za kable za prednapenjanje 600/800, vlečena jeklena žica	

Preglednica 20: Armaturne mreže za armiranje betona

Varjene gradbene mreže (gladke ali rebraste), MAR 500/560



Q mreža, nosilna v obeh smereh,
(armatura plošč)
okenca 100 mm ali 150 mm,
Q 131 (F_a=1,31 cm^2/m) do
Q 1130 (F_a=11,30 cm^2/m)



R mreža, nosilna v eno smer
(armatura plošč)
okenca 100 mm ali 150 mm v nosilni smeri
in 250 mm v nenosilni smeri
R 131 do R 1130
Rx mreža, nosilna v eno smer
(armatura sten) Rx 283, Rx 335

EUROCODE 2

Evropski predpisi za projektiranje armiranobetonskih konstrukcij Eurocode 2 (EN 1992-1-1:1992) se glede lastnosti jekel za armiranje sklicujejo na evropska standarda EN 10 080 (armaturno jeklo) in EN 10 138 (jeklo za prednapenjanje). Predvidevajo uporabo treh vrst jekel: Fe 360, Fe 430 in Fe 510, iz katerih so izdelane palice, žice, mreže in vrvi. Armaturno jeklo je gladko ali rebrasto. Razdeljeno je v dva razreda duktilnosti. Visokoduktilno jeklo (razred A) ima specifično deformacijo na meji trdnosti ε_u>5% in razmerje med mejo trdnosti in mejo plastičnosti f_t/f_y>1,08. Jeklo normalne duktilnosti (razred B) ima ε_u>2,05% in f_t/f_y>1,05. Eurocode 2 upošteva sledeče lastnosti jekla: gostoto ρ=7850 kg/m^3, modul elastičnosti E=200 GPa in koeficient toplotnega raztezka α_T=1·10^5/°C. Meja plastičnosti se določa na osnovi specifične deformacije 0,2% pri vseh jeklih razen pri žicah za prednapenjanje, kjer je upoštevana specifična deformacija 0,1% (slika 7-8). Pri jeklu za prednapenjanje se ne obravnava duktilnost, saj je le-ta pri njih razmeroma majhna. Pomembna lastnost teh jekel pa je relaksacija, to je časovno zmanjšanje notranje obremenitve pri stalni deformaciji. Žice in vrvi lahko sodijo ali v razred z visoko ali z nizko relaksacijo. Pri dobavi armaturnega jekla in jekla za prednapenjanje morajo biti njihove lastnosti jasno označene. Pri armaturnem jeklu mora biti poleg naštetih lastnosti tudi označeno, ali se to jeklo sme variti. Pri armaturnem jeklu in pri jeklu za prednapenjanje morajo biti označene tudi njegove površinske značilnosti, ki opredeljujejo kakovost sprijenosti med jeklom in betonom.

KOROZIJA ŽELEZOVIH KOVIN

Železove kovine so občutljive na oksidacijo, saj se kisik iz okolja veže z železom v železov oksid - rjo. Ta proces se imenuje korozija. Korozijo poleg kisika pospešujejo tudi drugi elementi, zlasti ko se pojavijo kot otopine v vodi. Stik dveh različnih kovin in elektrolita - voda je tipični elektrolit - tvori galvanski člen. Ena izmed kovin deluje kot anoda, druga pa kot katoda. Zaradi elektrolize prihaja do prehoda kovinskih ionov iz ene kovine - anode na drugo - katodo. S tem se površina obeh spremeni - erodira, proces pa je znan kot

galvanska korozija. Železni oksid tvori večji kristal kot čisto železo. Zato je prostornina rje bistveno večja od prostornine železa, iz katere je nastala. Kristali rje so bolj krhki in razmeroma lahko odpadajo s površine železa ter tako ustvarjajo površinske poškodbe osnovnega materiala.

Kovine lahko postavimo v določeno zaporedje, ki se imenuje galvanski niz:

MAGNEZIJ - *ALUMINIJ* - CINK - *ŽELEZO* - JEKLO - *LITO ŽELEZO* - SVINEC - *MEDENINA* - BAKER - *BRON* - NIKELJ - *NERJAVEČE JEKLO* - SREBRO - *GRAFIT*

Bolj ko so kovine v nizu narazen, večji je njihov medsebojni galvanski potencial in zato medsebojno bolj korodirajo. Tako je na primer v členu, ki je sestavljen iz aluminija in jekla, aluminij bolj anoden (višji položaj glede na jeklo). Aluminij bo oddajal elektrone v elektrolit in zato korodiral.

V nekaterih primerih se opisani pojav s pridom izkorišča. Medenina in bron vsebujeta baker. Baker reagira s klorom, kisikom in žveplom ter pri tem nastaja zelena (bakreni klorid in bakreni oksid) ali črna (bakreni sulfat) plast. Te plasti so dobro sprijete s površino kovine in jo ščitijo pred nadaljnjim vdorom elementov, ki povzročajo korozijo.

Proces korozije pospešujejo mnogi dejavniki, kot so: povišana temperatura, določeni plini, vplivi okolja (kisel dež), ponavljajoče se obremenitve na meji utrujanja, hladno preoblikovanje kovine itd. Določeni legirni elementi v jeklu zmanjšujejo njegovo korozijsko občutljivost, ker zavirajo oksidacijo železa. Dodatna zaščita se doseže s premazovanjem površin in s tem izolacija materiala pred zunanjimi vplivi.

VPRAŠANJA

1. Prikažite shemo proizvodnje železa in jekla.
1. Opišite postopek pridobivanja železa in jekla ter pri tem pojasnite razliko med Bessemerjevim, Siemens-Martinovim, obločnim in oksidacijskim postopkom.
2. Pojasnite pojem "pomirjenost jekla" in prikažite ter pojasnite razliko med stopnjami pomirjenosti jekla.
3. Naštejte in na kratko opišite oblike jekla, ki se običajno dobijo na tržišču.
4. Prikažite fazni diagram železo - ogljik (Fe - C) in obrazložite razliko med feritom, avstenitom in cementitom.
5. S pomočjo diagrama pokažite in pojasnite vpliv količine ogljika v območju do 1,2% njegove vsebnosti na trdnost, trdoto in raztezek jekla. Shematično prikažite tudi mikrostrukturo karbonskega jekla glede na vsebnost ferita, perlita in cementita.
6. Pojasnite razliko med nizko in visoko karbonskimi jekli ter navedite, kako lahko spreminjamo njihove lastnosti.
7. Naštejte skupine in opišite osnovne značilnosti sodobnih konstrukcijskih jekel, ki se proizvajajo v Sloveniji.
8. Opišite značilnosti nerjavnih jekel in pojasnite razliko med feritnimi, avstenitnimi in martenzitnimi jekli.
9. Naštejte in opišite osnovne značilnosti ter razlike med vrstami litega železa. Posebej pojasnite, kako se iz sive litine dobi nodularna litina in kako se iz bele litine dobijo kovne litine.
10. Narišite in pojasnite posamezne odseke nateznega diagrama mehkega jekla. Pojasnite razliko med "tehničnim" in dejanskim nateznim diagramom.
11. Pojasnite, kako se določa meja elastičnosti pri mehkih jeklih in pri jeklih, kjer ta meja ni izrazita. Pojasnite tudi naslednje pojme: modul elastičnosti, žilavost in duktilnost ter odvisnost mehanskih lastnosti jekla od temperature.
12. Pojasnite, kako se označujejo konstrukcijska jekla po novih evropskih standardih EN 10025:1993 in EN 10113:1993 ter kako se te oznake razlikujejo od oznak po standardu JUS C.B0.500.
13. Opišite in skicirajte oblike jekla, ki se uporabljajo za armiranje betona.
14. Kaj je to korozija železovih kovin in kaj je galvanski niz? Pojasnite, katera izmed štirih kombinacij kovin je najbolj in katera najmanj ugodna glede na nevarnost korozije: (cink-železo, aluminij-jeklo, železo-jeklo, jeklo-baker).

8

NEŽELEZOVE ZLITINE

UVOD

Neželezove kovine so vse tiste kovine in zlitine, ki ne vsebujejo železa. Praktično so večinoma uporabne kot zlitine, redkeje v čisti sestavi. Težke, radioaktivne kovine radij, uran, torij in plutonij se uporabljajo kot nuklearno gorivo. Lahke kovine aluminij, berilij, kalcij, litij, magnezij, natrij in titan se uporabljajo v mnogih zlitinah z izredno široko uporabnostjo. Za konstrukcijske namene so uporabni aluminij, berilij in titan, ostale lahke kovine pa so zaradi mehkosti in kemične aktivnosti manj uporabne, zato se uporabljajo v procesih izločanja drugih kovin iz rud. Natrij in kalcij se uporabljata za hlajenje v nuklearnih reaktorjih, nikelj in svinec imata zelo široko področje uporabnosti, baker pa se zaradi izredne prevodnosti največ uporablja za prevajanje toplote in elektrike. Kadmij, kositer in cink so uporabni v elektroindustriji in za izdelavo ležišč osi strojev. Kobalt in magnezij sta kovini z izrednimi legirnimi lastnostmi in se zato nahajajo v mnogih železovih in neželezovih zlitinah. Srebro se uporablja za izdelavo okrasnih izdelkov in kot sestavina zlitin z ostalimi plemenitimi kovinami. Te zlitine so namenjene izdelavi nakita in električnih kontaktov. Posebno skupino tvorijo žaroodporne kovine s tališčem nad 2000°C. To so kolumbij, titan, volfram, vanadij in cirkonij. Uporabljajo se povsod tam, kjer se ob visoki trdnosti in trdoti zahteva tudi odpornost na visoke temperature.

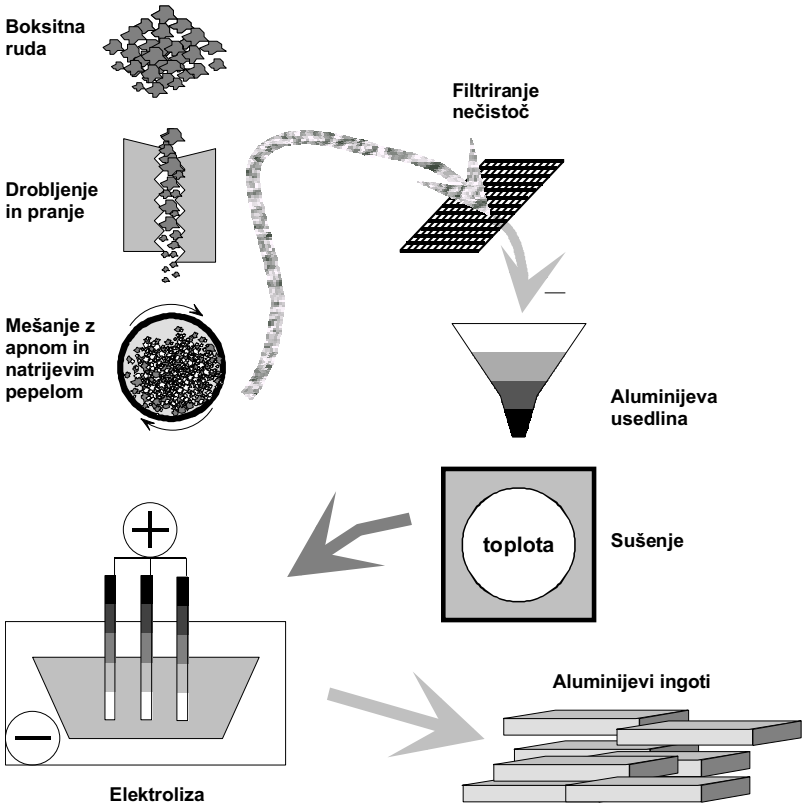
ALUMINIJ

Proizvodnja

Aluminij je najbolj zastopani kovinski element v litosferi in po kisiku in siliciju tretji po zastopanosti izmed vseh elementov. Okoli 8% vsake gline tvori čisti aluminijev oksid Al_2O_3, kar je za nekovinske rude visoka koncentracija. Lažje in ceneje pa ga je izločati iz hidrata aluminijevega oksida ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$), ki se imenuje boksitna ruda.

Aluminij je odkril Hans Oersted leta 1825, izoliral pa ga je kasneje Friederich Wöhler. Ta je leta 1854 v sodelovanju s Henrijem Devillom začel izdelovati aluminij s pomočjo reakcije z natrijem. Postopek je bil tako drag, da so jedilni pribor iz aluminija uporabljali na evropskih dvorih namesto zlatega. Charles Hall je leta 1886 razvil postopek, na osnovi katerega je proizvodna cena aluminija padla za 30.000 krat. Hallova metoda temelji na izločanju aluminija z elektrolizo iz otopine aluminija in kriolita (Na_3AlF_6 - natrijev aluminijev fluorid) na 950°C.

Najbolj ekonomična surovina za proizvodnjo aluminija je boksitna ruda, ki so jo prvič odkrili pri francoskem mestu Baux. Boksit vsebuje tudi železove okside in druge minerale, kar povzroča določene ovire pri izločanju aluminija. Na splošno velja, da je težje izločati tiste kovine, ki lažje oksidirajo. Aluminij je zelo aktivna kovina, ki pa ne reagira z ogljikom. Zato se ga ne da proizvajati kot jeklo in baker, pri katerih se kisik reducira pri reakciji z ogljikom.



Slika 45: Shematski prikaz proizvodnje aluminija

Boksit se mora očistiti pred elektrolizo s pomočjo Bayerjevega postopka. Pridobiva se v odprtih rudokopih. Ruda se drobi in izpira ter nato suši. Osušen prah se meša z natrijevim pepelom (Na_2CO_3), apnom (CaO) in vodo. Tako se tvori natrijev aluminat ($Na_2Al_2O_4$). Po filtriranju se izloči aluminijev hidrat (AlO(OH)), ki se segreva do 1100°C, ko nastaja aluminijev oksid (Al_2O_3). Ta je približno 99,6% čist. Po Hallovem postopku se nato z elektrolizo izloča čisti aluminij iz otopine s kriolitom pri temperaturi 990°C in pri jakosti električnega toka okoli 100.000 A. Ogljikove elektrode so nabite pozitivno, ohišje kadi pa predstavlja negativno elektrodo. Na njej se nabira do 99,8% čist aluminij, ki se izliva v ingote. Pri elektrolizi ogljikove anode izgorevajo (reagirajo) s kisikom iz aluminijevega oksida. Porabljeni del anod se sproti nadomešča. Poraba anod je od 500-600 kg/tono aluminija, katodni bloki pa trajajo od 5 do 7 let. Primesi, ki so prisotne v aluminiju so ponavadi železo, mangan in silicij.

Postopki, s pomočjo katerih se iz aluminijevih zlitin izdelujejo različni polizdelki in izdelki, so:

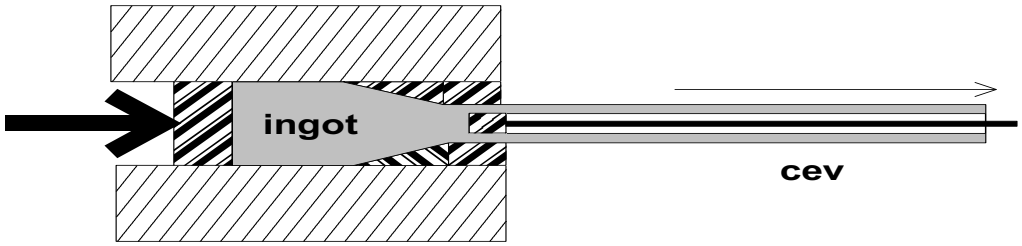
a) **vlivanje v pesek** za izdelavo velikih in zapletenih odlitkov v majhnih serijah (do 50 kosov) pri temperaturi vlivanja od 680 do 750°C,

b) **vlivanje v kokile (kalupe) iz perlitnega litega železa** za izdelavo kosov mase do 100 kg, ki imajo drobnozrnato strukturo, višjo trdnost, gladko površino zaradi majhne poroznosti kalupa, kar zahteva manjšo stopnjo naknadne obdelave v primerjavi z odlitki v peščenih kalupih.

c) **brizganje oz. vlivanje pod pritiskom** aluminijevih zlitin z nizkim tališčem; v jeklenih kalupih ostane odlitek do strjevanja in ima gladko površino, gosto drobnozrnato strukturo zaradi hitrega ohlajevanja, v večjih serijah se hitro izdelujejo manjši odlitki mase od 10 do 20 kg.

d) **mehanska obdelava ingotov** iz zlitin, ki se zaradi prostorsko centrirane kristalne rešetke lahko obdelujejo. Najbolj pogosti postopki so:

- ***gnetenje:*** Ogreti ingoti se gnetejo, pri tem pa se veliki kristali, ki so prisotni v vliti strukturi, deformirajo in rekristalizirajo, zlitina se ne utrjuje in ne postaja krhka. Po gnetenju se lahko nadaljuje obdelava s hladno deformacijo.
- ***vroče valjanje:*** Na temperaturah od 450 do 500°C pri čistem aluminiju in od 330 do 520°C pri njegovih zlitinah se izdelujejo pločevine debeline od 6 do 8 mm.
- ***hladno valjanje:*** Material se tako utrdi, da se doseže tudi dvakrat višjo trdnost ob zmanjšanju duktilnosti; iz čistega aluminija se izdelujejo folije debeline do 1μm.
- ***stiskanje:*** Ogreti ingoti (podobno kot pri vročem valjanju) se potiskajo skozi ustnik (matrico) s hidravličnimi bati, izdelki pa so različni profili.



Slika 46: Shema oblikovanja polizdelka s stiskanjem aluminija

- ***vlečenje stiskanih polizdelkov:*** S tem postopkom se zmanjšujejo dimenzije izdelkov, ki so dobljeni s stiskanjem.
- ***kovanje:*** Aluminijeve zlitine se kujejo ročno ali strojno v kalupih; kladivo in kovanec se segrevata, izdelujejo se manjši kosi v velikih serijah.
- ***vlečenje žic in pletenje vrvi:*** Aluminijaste vrvi imajo nosilno jedro iz pocinkane jeklene žice.

Uporaba aluminija

Lastnosti aluminija ga uvrščajo med izredno uporabne inženirske materiale. Je korozijsko odporen, lahek in visokoprevoden. Ima za okoli 40% manjšo prevodnost kot baker, njegova specifična prevodnost pa je dvakrat višja kot pri bakru. Zato je zelo uporaben za izdelavo pletenih vrvi ali kablov za prevajanje električnega toka pri velikih razponih med daljnovodnimi stebri.

Čisti aluminij ima nizko trdnost, zato ga legirajo. Ima prostorsko centrirano kristalno rešetko, zato je duktilen in se ga da preoblikovati s stiskanjem ter drugimi enostavnimi postopki.

Aluminij je zelo kemično aktiven in reagira s kisikom. Zato njegova sveža površina hitro oksidira, kar ji daje temnosivo barvo. Oksid je trdno prilepljen na površino in jo ščiti pred nadaljnjo oksidacijo (korozijo) za razliko od železovega oksida (rja) pri železovih kovinah. Lastnosti aluminijevega oksida se s pridom koristijo tudi pri umetni protikorozijski zaščiti aluminija, ki se izvaja z elektrolizo. Postopek se imenuje "anodni" postopek. Anodo predstavlja aluminijev izdelek, ki ga je potrebno zaščititi. Potopljena je v elektrolit iz oksalne, žveplaste ali kromove kisline. Aluminijeva površina se pri delovanju toka prevleče z zelo trdno in trdo oksidno prevleko. Anodna zaščita prispeva tudi k lepšemu izgledu aluminijskega izdelka, zlasti če se elektrolitu dodajo kovinski oksidi, ki dajejo površini različne barvne odtenke.

Standardizirane oznake aluminija vsebujejo informacije o stopnji duktilnosti in kovnosti, vrstah legirnih elementov, stopnji čistosti in posebnosti posamezne aluminijeve zlitine. Aluminij se legira s silicijem (vlivanje), z bakrom (višja trdnost, strojna obdelava), z magnezijem (varjenje), magnezijem in silicijem (ekstruzija), čisti aluminij pa se uporablja za posebno oblikovanje.

Značilne aluminijeve zlitine so:

- Al s 5 do 6% Cu - zlitina, ki je primerna za strojno obdelavo,
- Al s 3,8 do 4,9% Cu in 1,5% Mg - toplotno obdelavna zlitina za potrebe letalske industrije,
- Al z 1 do 1,5% Mn - zlitina visoke trdnosti,
- Al s 4,5 do 6% Si - zlitina za izdelavo žic (elektrod) za varjenje,
- Al s 3,1 do 3,9% Mg - zlitina, ki se lahko vari in se dobavlja v obliki plošč, pločevine in različnih profilov,
- Al z 0,5% Mg in Si - zlitina za izdelavo stavbnega pohištva in orodja.

Uporabnost aluminija v gradbeništvu je pogojena z zelo ugodnim razmerjem med trdnostjo njegovih zlitin in njihovo specifično maso. Zato se te zlitine uporabljajo tam, kjer je razmerje med nosilnostjo in maso pomembnejše (specifična trdnost) od nekoliko višje cene konstrukcije. Iz aluminija se vlivajo tudi glave motorjev in batov ter izdelujejo karoserije vozil (Audi A8, letala, vagoni). Aluminij tudi močno odbija infrardečo in vidno svetlobo ter se zato uporablja za izdelavo žarometnih ogledal in svetlobnih zaslonov. V obliki lističev mikronskih dimenzij se uporablja kot polnilo (pigment) v kompozitnih barvah. Take barve imajo višjo trdnost in obstojnost ter bolje ščitijo pred povišanimi temperaturami. Aluminijev prah se uporablja tudi za impregnacijo tkanin, za izdelavo celičastega betona, penaste gume, v pirotehniki in za zdravljenje opeklin.

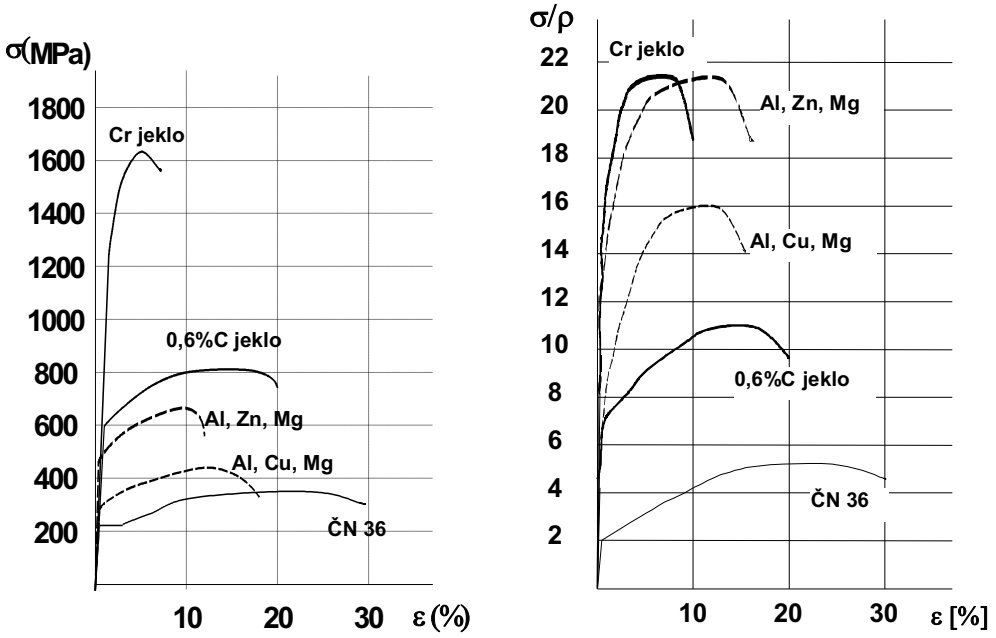
Poseben problem je izvedba spojev med aluminijevimi elementi. Tipični spoji, ki se uporabljajo za povezovanje aluminijevih elementov so:

- zatikanje ali členkasti spoji, primerni za stavbno pohištvo in embalažo,
- previjanje primerno za folije in strehe,
- vtiskanje pri okenskih okvirjih,
- kovičenje (hladno) pri letalih v izvrtane luknje,
- šivanje z jekleno žico,

- varjenje po posebnih postopkih,
- lotanje,
- lepljenje z umetnimi smolami in dvokomponentnimi lepili (araldit, redux-letala) in
- vijačenje z uporabo fiksnih vložkov iz tršega materiala v primerih, kjer se vijaki večkrat odvijajo in privijajo.

Pri uporabi veznih elementov je posebno pozornost treba posvetiti pojavu galvanskega člena, ki lahko s korozijo uniči spoj. Zato je treba uporabljati spojna sredstva iz primernih kovin ali zaščitena s primernimi premazi ali kovinskimi prevlekami (cink, kadmij, krom). Samorezni vijaki so lahko iz aluminijevih zlitin ali nerjavnega jekla.

V gradbeništvu se izkorišča ugodno razmerje med trdnostjo in maso aluminija. Projektiranje konstrukcij iz aluminijskih zlitin obravnava Eurocode 9.



Slika 47: Primerjava $\sigma-\varepsilon$ diagramov jekel in aluminijevih zlitin v običajni in normalizirani obliki (specifična trdnost)

Na sliki 47 je prikazana primerjava $\sigma-\varepsilon$ diagramov jekel in aluminijevih zlitin v običajni obliki in obliki, kjer so napetosti normalizirane z gostoto jekla oz. aluminija. Upoštevano je razmerje gostot jekla proti aluminiju 1:2,9. Cena aluminija v konstrukciji je okoli petkrat višja od jekla, pri polizdelkih pa je ta razlika nekoliko manjša. Razlika v ceni se zmanjšuje s povečanjem proizvodnje aluminija. Aluminijeve zlitine se v gradbeništvu uporabljajo za dele oziroma posamezne elemente ali celotne mostne konstrukcije, stolpe, cisterne, stavbe, obloge (strehe, fasade), stavbno pohištvo in različne folije.

Prednosti aluminijevih zlitin pred jekli pridejo do izraza pri:

- lupinastih konstrukcijah, kjer se s tenkostenskimi profili lahko dosegajo ustrezne nosilnosti in togosti ob bistveno nižji masi konstrukcije,
- sestavljenih "sandwich" konstrukcijah, ki so lahke in čvrste ter imajo lahko še druge lastnosti kot so npr. dobre izolacijske sposobnosti

- in povsod tam, kjer je znižanje mase odločujoče: pri sanacij premostitvenih konstrukcij in pri konstrukcijah z izjemno velikimi razponi (tudi do 250 m).

Modul elastičnosti aluminijevih zlitin je od 3 do 4 krat nižji kot pri jeklih. Zaradi večje deformabilnosti ima aluminij tudi večjo sposobnost absorbiranja energije pri udarcih, kar se s pridom izkorišča pri njegovi uporabi za izdelavo karoserij in velikih posod. Meja plastičnosti ni jasno izražena, zato se določa na osnovi specifične deformacije 0,2% ($\varepsilon_{0,2}$). Pri počasnem obremenjevanju je naraščanje deformacij hitrejše kot pri hitrem obremenjevanju zaradi lezenja materiala, ki je bolj izrazito pri aluminijevih zlitinah kot pri jeklu. Značilnost aluminijevih zlitin je tudi izotopnost, vendar le v deformacijsko omejenem območju, in nesimetričnost nateznega in tlačnega dela $\sigma-\varepsilon$ diagrama.

V praksi je manj izkušenj in na voljo manj podatkov o obnašanju aluminijevih konstrukcij, meja plastičnosti pa je težje določljiva kot pri jeklu. Pri snovanju letal in konstrukcij v visokogradnji se kot kriterij pri dimenzioniranju običajno uporablja meja plastičnosti $\sigma_{0,2}$, pri strojegradnji pa meja nosilnosti σ_m. Pri statično obremenjenih konstrukcijah visokogradnje se običajno upoštevajo varnostni količniki v iznosu 2,4, pri zmerno dinamično obremenjenih konstrukcijah (cestni mostovi) 2,6 in pri pogosteje dinamično obremenjenih konstrukcijah (železniški mostovi) pa 2,8.

Eurocode 9

Razširjenost in perspektivnost aluminijevih zlitin kot konstrukcijskega materiala v Evropi je privedla do osnutka predloga standardov za konstruiranje aluminijevih konstrukcij (ENV 1999-1-1). Na osnovi tega dokumenta bodo nastali tudi slovenski standardi. Osnutek, ki je še v zgodnji fazi priprave, obravnava projektiranje konstrukcij iz aluminijevih zlitin, katere so v tem dokumentu tudi navedene. Dokument loči dve vrsti aluminijevih konstrukcijskih zliti: kovne in livne zlitine. Zlitine iz prve skupine se dobavljajo v obliki pločevin, trakov, plošč, cevi, profilov, palic, žic in različnih kovanih predmetov. To so zlitine aluminija z manganom, magnezijem, silicijem, cinkom in bakrom, večinoma s po eno do treh izmed teh kovin. Zlitine za vlivanje so v glavnem zlitine aluminija in silicija ter magnezija.

Pri kovnih zlitinah so navedene minimalne zagotovljene mehanske lastnosti in sicer meja elastičnosti definirana s specifičnim raztezkom 0,2% ($f_{0,2}$) in natezna trdnost (f_u). Vrednosti teh lastnosti se razlikujejo glede na vrsto polizdelka in vrsto zlitine. Vrednosti $f_{0,2}$ se gibljejo od 80 do 280 MPa, vrednosti f_u pa od 140 do 350 MPa. Pri livnih zlitinah se te vrednosti gibljejo v razponih od 70 do 240 MPa za $f_{0,2}$ in od 160 do 320 MPa za f_u.

Predstandard navaja tudi podatke o ostalih mehanskih lastnostih, ki jih je potrebno upoštevati pri projektiranju konstrukcij iz aluminijevih zlitin in sicer: modul elastičnosti E=70 GPa, strižni modul G=27 GPa, Poissonov količnik ν=0,3, količnik toplotnega raztezka α=2,3 10^{-7}/°C in gostoto ρ=2700 kg/m^3.

Dokument obravnava tudi spojne elemente (kovice, vijake, matice), materiale za varjenje in lepila. Posebej se obravnava tudi trajnost in protikorozijska zaščita aluminijevih zlitin. Pri tem je obravnavan tudi medsebojni vpliv stikov med aluminijevimi zlitinami in drugimi kovinami ter nekovinami (beton, les, malte, opeka, zemljine, voda).

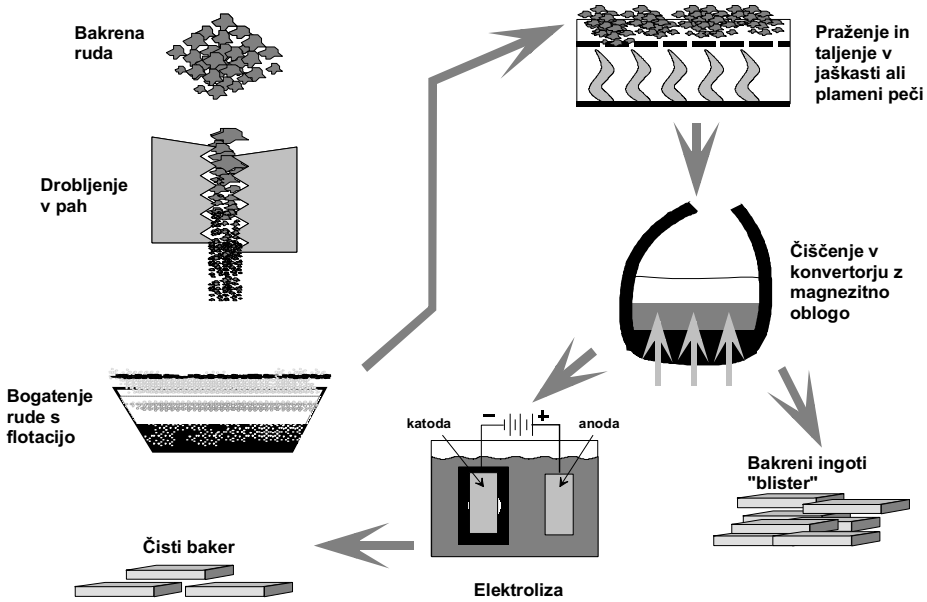
BAKER, MEDENINA, BRON

Baker

Baker je kovina, ki jo človeštvo uporablja od zgodnjih začetkov civilizacij. Odkritje se pogosto pripisuje Egipčanom (3500 let pr.n.š.). Prvotno so ga obdelovali s kovanjem in vlivanjem. V naravi se nahaja v številnih rudah kot oksid (kuprit), sulfid (kalkopirit, bornit, kalkonit, kovelit), karbonatih (malahit, azurit) in silikatih (krisokol). Mnoge od teh rud se nahajajo na površini in jih zato pridobivajo v odprtih rudokopih.

V bakrenih rudah se običajno nahajajo mnoge primesi. Večinoma vsebujejo silicij (kremenčev pesek) in aluminijev oksid (gline), pogosto pa tudi druge elemente, ki se iz rude odstranijo s flotacijskim postopkom. V prah zdrobljena ruda se usipa v vodo, kateri so dodana penila (mila). Pena med nastajanjem dviguje zrnca čiste bakrene rude na površino, od koder jih posnemajo. Tako koncentrirana ruda vsebuje tudi železove sulfide, ki jih je treba pretvoriti v okside s pomočjo segrevanja v pečeh. Po segrevanju ruda vsebuje bakrove in železove okside, bakrove in železove sulfate ter še vedno nekaj železovih sulfidov, silikatov in ostalih nečistoč. V talilnih pečeh se ruda nato tali pri 1440°C v bakreni “matte”, ki vsebuje okoli 30% bakra.

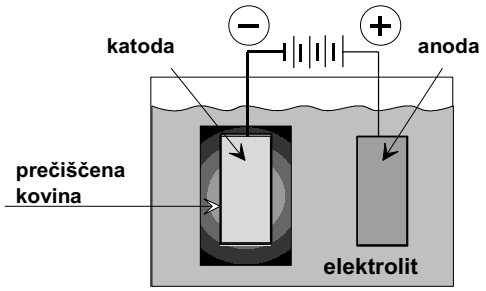
Talilne in žarilne peči so pogosto povezane v enoto, tako da se poveča izkoristek energije. Raztaljeni bakrov kamen se nato v konvertorju prepihava z zrakom. Kisik reagira z žveplom iz taline podobno kot pri pridobivanju jekla. Tako se dobi razmeroma čist (od 98 do 99%) surovi baker, ki se vliva v ingote. Žvepleni dioksid se v obliki mehurčkov izloča na površini ingotov, zato se tak baker imenuje “blister”. Iz žlindre, ki se je izločila v konvertorju, se z nadaljnjim rafiniranjem pridobivajo plemenite kovine (zlato, srebro), ki se pogosto v manjših koncentracijah nahajajo v bakrenih rudah. Čisti baker, ki se uporablja v elektroindustriji, se pridobiva z elektrolitsko rafinacijo iz blisterja. Blister se pretali in vliva v obliki anodnih plošč. Katodne plošče pa se izdelajo iz že rafiniranega bakra. Plošče se potopijo v elektrolit - otopino bakrenega sulfata. Elektrolitsko čiščenje bakra poteka s prehodom bakrenih ionov s nečiste anode na čisto katodo, nečistoče pa se odlagajo v elektrolitu. Na katodi se izloča 99,9% čist baker. Baker za izdelavo električnih žic se ponovno tali z oksidirajočim plamenom, da se prepreči ponovno vezanje žvepla in omeji vsebnost kisika v bakru pod 0,04%. Tako se dobi žilav baker posebno velike čistosti.



Slika 48: Shematski prikaz proizvodnje bakra

Baker odlikuje visoka termalna in električna prevodnost. Toploto prevaja desetkrat bolj kot jeklo in je zato primeren za izdelavo različni livarskih kalupov, hladilnikov in izdelkov, pri katerih je pomembno hitro odvajanje toplote. Elektriko boljše prevaja le še srebro.

Tališče čistega bakra je pri temperaturi 1092°C. Na površini čistega bakra se tvorijo oksidi, ko je ta dalj časa izpostavljena povišani temperaturi ali ostalim vplivom okolja. Zelena prevleka, karbonat znan kot patina, ščiti svežo površino bakra pred nadaljnjo korozijo. Površinska obdelava bakra pomaga pri ohranitvi izgleda bakrenih izdelkov. Baker se da lotati in variti, ne pa tudi avtogeno rezati, ker hitro odvaja toploto.



Slika 49: Shema elektrolitske rafinacije bakra

Baker, ki ga uporabljajo v elektroindustriji mora biti razmeroma čist, ker že male količine drugih kovin bistveno vplivajo na znižanje prevodnosti električnega toka. Izjeme so srebro, zlato in kadmij, ki zvišujejo trdnost bakra brez znižanja njegove prevodnosti.

Baker in njegove zlitine se uporabljajo za izdelavo različnih cevi in sanitarnih armatur ter odvajalcev toplote. Čisti baker se veže v mnoge spojine, ki so strupene, zato je njegova uporaba za izdelke, ki so v stiku s hrano, vprašljiva.

Bakrene zlitine sodijo med najstarejše kovine, ki jih uporablja človek. Z legiranjem bakra se zvišuje njegova trdnost, trdota, obdelovalnost, izgled in cena kovine. Tališče zlitin je večinoma nižje od tališča bakra.

Z razmeroma majhno količino legirnih kovin (od 0,1 do 2%) kot so srebro, kadmij, krom, telur, berilij, kositer, nikel in mangan ter nekovin kot je silicij, se lahko dobijo bakrene zlitine, ki jih odlikujejo:

- visoka toplotna in električna prevodnost,
- visoka trdnost tudi pri povišanih temperaturah,
- visoka trdota in trdnost, ki se povečujeta z hladnim preoblikovanjem.

Zlitine na osnovi bakra tvorijo dve veliki skupini znani pod imeni **medenine** in **broni**. Medenine so zlitine bakra in cinka z manjšim deležem ostalih kovin, broni pa zlitine bakra in različnih kovin. Vloga cinka v medeninah je zvišanje trdnosti, povečanje duktilnosti in obdelovalnosti, ki pa se še poveča z dodajanjem svinca. Kositer pri bronih zvišuje trdnost, trdoto in duktilnost ter znižuje ceno kovine.

Medenine

Medenine so tako kot broni večkomponentne zlitine. Fazni diagrami teh zlitin najboljše opisujejo njihove lastnostih pri različnih sestavah in v različnih temperaturnih območjih. Obstajajo α medenine, pri katerih je lahko do 36% cinka otopljenega v bakru v enofaznem stanju. Te medenine imajo ploskovno centrirano kubično kristalno mrežo. β medenine imajo prostorsko centrirano kubično kristalno mrežo. Obe vrsti medenin lahko vsebujeta do 46% cinka. Običajni vrsti sta rdeča in rumena medenina. Rdeče medenine vsebujejo manj legirnih elementov in so korozijsko bolj odporne. Znane so po visoki duktilnosti in kovnosti. Medenine so lahko sestavljene le iz bakra in cinka ("čiste medenine") ali pa z obema kovinama, katerima so v manjših količinah dodane še druge kovine in nekovine ("medenine z dodatki"). Če je v čisti medenini presežen delež cinka nad 50%, struktura zlitine postane izredno krhka in je kot taka tehnično neuporabna. Dodajanje svinca prispeva k obdelovalnosti medenine, dodajanje kositra, aluminija, železa in mangana pa prispeva k zvišanju trdnosti medenine.

Preglednica 21: Pregled sestave in uporabe bakra, medenin ter bronov

Naziv	Sestava(%)								Uporaba
	Cu	Zn	Sn	Ni	Al	Pb	Si	Fe	
Baker									
Elektrolitski z 0,04% O	94,4								kritine, žeblji, kovice,kotliči
Fosforno dezoksidiran	94,4								cevi, toplotni prenosniki
Elektrolitski brez kisika	99,9								elektroprevodniki, okraski

Medenine									
Tombak (rdeča)	80	20							strojni deli, okraski
Patronska	70	30							municija, radiatorji, reflektorji
Rumena	65	35							odlitki, cevi,
Kovina za kovance	60	40							kovanci, pločevine, paneli
Bela	20	80							bronsa
Ladijska	60	39,3	0,75						matice, vijaki, ležišča osi
Srednje svinčena	64	34,8				1			gravure, matice, sklopke
Arhitekturna	57	40				3			okrasi, tečaji, avtodeli
Broni									
Fosforjev	91		8						kovanci, strojni deli
Silicijev	98						1		drsni vodi in kontakti
Zvonovina	75		25						zvonovi
Kiparski	75	10	10			2			kipi, plakete, vijaki
Aluminijev	95				5				pločevine, žice, cevi
Zlitine bakra in niklja									
Konstantan	60			40					električni vodniki
Kupro nikel	88,5			10				1,5	kondezorji, avtodeli, ventili
Alpaka (novo srebro)	55	25		20					pribori, medic. instrumeti
Monel	35			65					orodja, kem. industrija

Broni

Broni poleg bakra in kositra vsebujejo tudi druge elemente. V bronih se kositer nahaja v 4 do 25%-nem deležu. Kositer povečuje trdnost in trdoto že v majhnih količinah ter korozijsko odpornost bakra še posebej ob dodatku cinka in svinca. Zato je na splošno primeren za dele v strojegradnji, vzmeti, ventile, ležišča osi (ladijskih vijakov). Fosfor se dodaja v manjših količinah zaradi zvišanja duktilnosti, služi pa tudi kot dezoksidno sredstvo. Broni, ki vsebujejo nad 90% bakra, so rdečkasti.

Aluminijevi broni (do 9% aluminija) so primerni za toplotno obdelavo in sodijo med najbolj nosilne bakrene zlitine. Primerni so za izdelavo različnih konstrukcij, nakita, cevi in elementov v kemični industriji. Odlikuje jih tudi korozijska odpornost. Za izboljšanje določenih lastnosti se dodaja tudi manjša količina železa, niklja in kroma.

Silicijevi broni (okoli 3% silicija in dodano železo, cink in mangan) so visoko nosilni. Odlično se varijo, vlivajo in obdelujejo, zato jih uporabljajo v ladjedelništvu in kemični industriji.

Nikljevi broni se delijo na binarne (baker in nikelj od 2,5 do 30%) in ternarne (baker, nikelj in cink). Pri binarnih zlitinah nikelj povečuje trdnost in trdoto ter odpornost na korozijo in obrabo. Iz teh zlitin se izdelujejo lopatice turbin, hladilniki v morski vodi, cisterne za kemikalije. Najbolj znan predstavnik ternarnih zlitin je znan pod imenom novo srebro oz. alpaka (baker, cink, nikelj). Alpaka je elastična, odporna na korozijo, obrabo in se da lepo polirati. Uporablja se tako za kovance kot za medicinski pribor in instrumente. Iz nje se

izdelujejo vzmeti v elektroindustriji, ključi, vodovodne armature ter nakit, saj se jo da kakovostno pozlatiti.

Cirkonijevi in kromovi broni so primerni za toplotno obdelavo in se iz njih izdelujejo instrumenti in elektro komponente. Berilijevi broni vsebujejo do 2% berilija. Primerni so za toplotno obdelavo in so najtrši med vsemi bakrenimi zlitinami. Te kovine so neiskreče in zato primerne za izdelavo orodij, ki se uporabljajo v okoljih z nevarnostjo eksplozije hlapov, goriv in eksplozivov. Manganovi broni (10 do 25% mangana in manjše količine aluminija in niklja) so svetli, trdni in zelo trdi (4500 HV).

CINK, KOSITER IN SVINEC

Cink

Cink so odkrili v Perziji v šestem stoletju. V naravi se nahaja vezan kot sulfid cinkova cvetlica (Zn), karbonat kalamina ($ZnCO_3$) ali silikat. Večja nahajališča so v ZDA ter v nekaterih deželah Evrope in v Avstraliji.

Sulfidna ruda se praži, pri čemer se spremeni v oksid, in nato reducira s koksom na temperaturi od 1100 do 1300 °C. Tako se dobi od 97 do 98% čist surovi cink. Njegovo tališče je pri 432°C, vre pa pri 914°C. Pri 1214°C se cink upari, kar je osnova postopka frakcionarne destilacije cinka, s katero se dobi 99,99% čist cink. Razen redukcijskega postopka se uporablja tudi postopek raztapljanja oksida v žvepleni kislini in elektrolitskega pridobivanja 99,99% čistega cinka prek cinkovega amalgama.

Cink se najpogosteje uporablja za galvanizacijo jeklenih izdelkov in pločevin, kar daje značilno modrikasto belo prevleko. Uporablja se tudi za proizvodnjo medenine in drugih cinkovih zlitin, za baterije, kot prah v antikorozijskih premazih ter za laboratorijsko pridobivanje vodika.

V zadnjih desetletjih se uveljavlja uspešna zaščita jeklenih konstrukcij z vročim pocinkanjem. Leta 1966 so to metodo prvič uporabili v ZDA pri jeklenem cestnem mostu. Po dvajsetih letih so s pregledom ugotovili, da debelina cinkove plasti zadošča še za nadaljnjih 80 do 100 let. Okoljevarstveni ukrepi v razvitem svetu vplivajo na znižanje koncentracije žveplovega dioksida v zraku, kar še dodatno vpliva na uspešnost zaščite s cinkom.

Vroče pocinkanje jeklenih konstrukcij je proces, pri katerem predhodno očiščene elemente potapljamo v raztaljeni cinkovi kopeli temperature od 430 do 470°C, ki vsebuje različne dodatke. Prednosti vročega pocinkanja pred drugimi vrstami protikorozijske zaščite so:

- dolgotrajna protikorozijska zaščita, ki v večini primerov zadostuje za celotno življenjsko dobo konstrukcije,
- sposobnost prekrivanja težko dostopnih površin v notranjosti konstrukcije, za robovi in v območju zvarov ter ostalih spojnih sredstev,
- odpornost proti mehanskim poškodbam, ker je pocinkana plast zlitinsko povezana z jekleno površino,
- zelo dobra korozijska odpornost v različnih okoljih, celo v morski vodi,
- ekonomičen postopek zaščite, ker je možna hkratna zaščita večjih količin elementov ne glede na njihovo obliko,

- duktilnost cinkove prevleke omogoča naknadno preoblikovanje elementov brez poškodbe protikorozijske zaščite,
- možnost dodatne zaščite s premazi zaradi doseganja estetskih učinkov.

Z regulacijo parametrov v posameznih fazah pocinkanja se lahko vpliva na debelino protikorozijske plasti in na njegove fizikalne in kemijske lastnosti.

Primerjave stroškov protikorozijske zaščite z vročim pocinkanjem in z drugimi vrstami zaščit, ki naj bi imele enak ali podoben učinek, so pokazale, da je začetni strošek zaščite z vročim cinkanjem približno za eno tretjino nižji od zaščite s premazi. Poleg tega je trajnost cinkove zaščite večja in je zato ta razlika v ceni še večja, če se upoštevajo tudi naknadni vzdrževalni stroški, ki so nujni pri zaščitah s premazi.

V Sloveniji je metoda vročega pocinkanja uspešno vpeljana v prakso. V Celju deluje pocinkovalnica, v kateri lahko z enkratnim potapljanjem vroče cinkajo konstrukcijske elemente velikosti do 11,7 x 0,95 x 2,5 m. Večje elemente cinkajo v več fazah.

Kositer

Kositer se pridobiva iz predhodno flotacijsko obogatene rude kasiterita (SnO_2), ki jo kopljejo v Boliviji, Indoneziji, na Malaji in Tajskem ter Nigeriji, z redukcijo s koksom v jaškastih pečeh. Nekaj se ga pridela tudi iz odpadne pločevine z razkositrenjem. Čisti kositer je pod temperaturo 13°C v α modifikaciji s kubično kristalno rešetko, nad 13°C preide v β modifikacijo s tetragonalno rešetko in nad 161°C v γ modifikaciji z rombično rešetko. α kositer je praškast, siv in nekovinskega značaja, β je normalnega kovinskega značaja, γ pa je krhek material. Do prehoda v α modifikacijo lahko pride zaradi trajnejšega mraza. Na takem mestu nastanejo siva kristalizacijska jedra imenovana kositerna kuga.

Kositer se uporablja kot eden od osnovnih legirnih kovin v bronih. Uporablja se tudi za prevleke jeklenih pločevin in za izdelavo tankih folij (staniol), ki so iz zlitine 92% kositra in 8% cinka. Kositerna posoda in jedilni pribor, ki se je uporabljala v srednjem veku, je bila zlitina kositra in svinca. Sodobna dekorativna kovina za izdelavo posode se sestoji iz 91% kositra, 7% antimona in 2% bakra.

Svinec

Svinec so odkrili v starem Egiptu okoli 3400 let pr.n.š., na veliko pa se uporablja že od rimskih časov dalje. Stari Rimljani so uporabljali svinčene cevi za vodo in svinčeno glazuro na keramičnih posodah. Strupenost svinca je po mnenju nekaterih zgodovinarjev tudi prispevala k zatonu rimske civilizacije zaradi genetskih sprememb, ki jih je povzročil svinec.

Svinec se pridobiva iz različnih rud, med katerimi je najbolj pomemben galenit (PbS). Z enostavnim postopkom praženja se sulfid pretvori v oksid, ta pa se reducira z ogljikom, pri čemer poleg čistega svinca nastaja še ogljikov dioksid.

Čisti svinec se tali pri temperaturi 330°C. Uporaben je zaradi svoje velike specifične mase, velike duktilnosti, nizkega tališča, korozijske in kemične

odpornosti in sposobnosti, da se obnaša kot mazilo ter duši vibracije. Svinec je slab prevodnik ter strupen za živali in človeka. Najbolj razširjena uporaba je za izdelavo akumulatorskih baterij. Plošče akumulatorjev poleg svinca vsebujejo tudi okoli 10% antimona, nekaj arzena bakra in kositra. Svinec se je v preteklosti uporabljal tudi v barvah kot bel, rumen in rdeč pigment ter kot dodatek bencinu proti klenkanju, ki pa škodljivo deluje na okolje in človekovo zdravje. Zaradi velike gostote se uporablja v zaslonih, ki ščitijo pred radiacijo.

Svinec se pogosto uporablja kot legirna kovina z ostalimi kovinami. Nahaja se v jeklih in bronih primernih za strojno obdelavo. Trdnost svinca v zlitinah povečata telur in antimon. Zlitina svinca (80%), antimona (15%) in kositra (5%) se uporablja za ležišča pogonskih ročic motorjev in plašče kablov. Zlitine svinca in kositra se uporabljajo za lotanje. Loti poleg svinca vsebujejo še od 5 do 50% kositra. Kositer omogoča omakanje in dobro oprijemanje lota na kovino, ki se lota. Loti, ki vsebujejo 20% kositra, se uporabljajo tudi za izdelavo prevlek notranjih površin bencinskih rezervoarjev v vozilih. Zlitine svinca in kositra so zelo odporne na korozijo.

KROM

Krom je odkril Victor Vanguelin leta 1897 v Franciji. Ime je dobil po svoji "barviti" naravi: kromov oksid (Cr_2O_3) je temno zelen, kalijev kromat ($KCrO_4$) je svetlo rumen, kalijev dikromat ($K_2Cr_2O_7$) je oranžen, kromov trioksid (CrO_3) je rdeč in svinčev kromat ($PbCrO_4$) je rumen. Krom je tretji najtrši element za borom in diamantom. Krom je izredno odporen na korozijo in se pogosto uporablja ali za sestavljanje korozijsko odpornih zlitin ali za izdelavo plasti za zaščito pred korozijo.

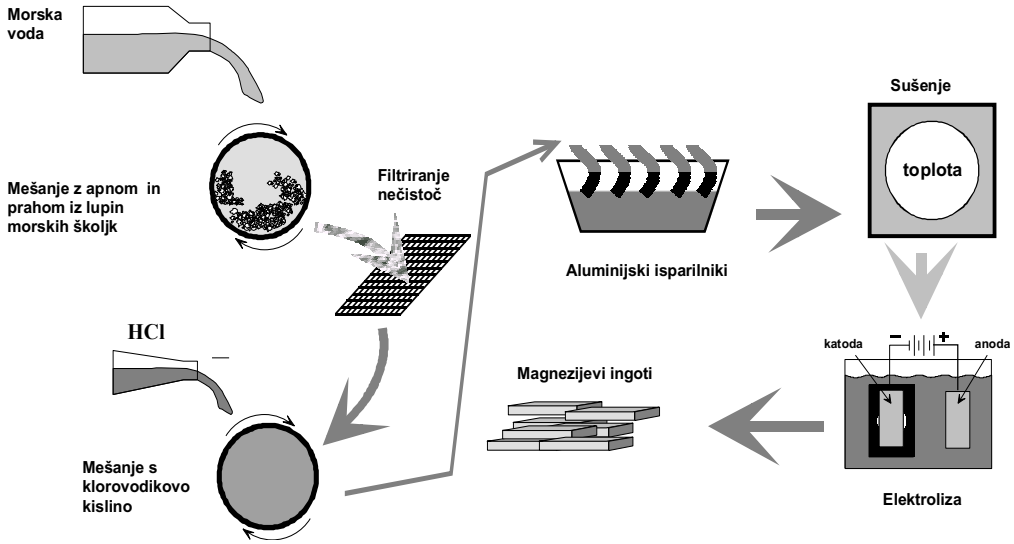
Osnovna ruda je kromit ($FeOCr_2O_3$), katerega nahajališča so v Albaniji, Rodeziji, Rusiji, Turčiji in Iranu. Postopek izdelave se začne z drobljenjem rude v prah in ločevanja od železa s pomočjo aluminija. Krom se lahko rafinira z elektrolizo, vendar se pogosto krom v čisti obliki niti ne potrebuje. Najpogosteje se skupaj z nikljem legira z železom pri proizvodnji visokotrdnih in korozijsko odpornih jekel. Krom se uporablja tudi za izdelavo žaroodpornih jekel in bronov.

S površinskimi nanosi kroma se ustvarjajo trde, korozijsko odporne prevleke. Stik med kromom in železom je slabši od stika med jeklom in bakrom ter nikljem. Zato se kakovostne in trajne zaščitne obloge izdelujejo v več plasteh. Na dobro očiščeno, razmaščeno in z dušikovo kislino jedkano površino jekla se najprej nanese tanka bakrena prevleka, na njo pa tanka plast niklja. Krom se nanese kot tretja, končna plast. Prevleka, ki je debela okoli 5μm, je svetleča in dekorativna, pri debelini 10μm pa tudi zelo odporna na površinsko obrabo. Pri elektrolitskem nanašanju kroma se kot elektrolit uporablja kromova kislina.

MAGNEZIJ

Magnezij, ki je najlažja izmed konstrukcijsko uporabnih kovin, je leta 1808 odkril Sir Humphrey Davy. Čisti magnezij ima specifično maso enako približno 2/3 specifične mase aluminija. Pridobiva se predvsem iz morske vode približno v količini 1,2 g iz enega litra. Morska voda se filtrira skozi apno ($Ca(OH)_2$) in v prah zdrobljenih lupin školjk. Tako se dobi magnezijev hidroksid, ki se izloča iz vode. Ta se z dodajanjem klorovodikove kisline pretvori v magnezijev klorid. Po

sušenju se z elektrolitskim postopkom iz magnezijevega klorida izloči čisti magnezij. Pri tem nastaja tudi klor (plin), ki se reciklira v klorovodikovo kislino, ki je ponovno uporabna v procesu proizvodnje magnezija.



Slika 50: Shematski prikaz pridobivanja magnezija

Magnezij je kemično zelo aktivna kovina. Sprva so jo uporabljali za izdelavo zažigalnih bomb, ker izgoreva z zelo svetlim in vročim plamenom. Magnezijevi lističi so zelo vnetljivi, zato je avtogeno varjenje magnezija izredno nevarno.

Kemična aktivnost magnezija se s pridom izkorišča pri anodni zaščiti rezervoarjev za vodo, cevi in ostalih izdelkov, ki jih ogroža galvanska korozija. Uporablja se za legiranje železovih kovin, ki s tem postanejo bolj duktilne (lita železa). Magnezij se nahaja v zlitinah, ki jih odlikuje visoka trdnost in majhna teža, zato se uporabljajo za konstrukcije, kot so visoke raztegljive lestve, vesoljska plovila, letala, nakladalne ploščadi, močna orodja itd. Magnezij se večinoma legira z železom (visokovredna jekla), aluminijem, cinkom, cirkonijem in z redkimi posebnimi litinami.

NIKELJ

Nikelj je konstrukcijska kovina izrednih lastnosti in v mnogih lastnostih prekaša in lahko nadomešča jekla najvišje kakovosti. Večina znanih zalog rude se nahaja v Rusiji, Kanadi in Avstraliji, nekaj pa tudi v Makedoniji v obliki pentlandita ($(FeNi)_9S_8$) in pirhorita, ki je železov sulfid z nikljem. V pentlantidu je le okoli 1% niklja, zato je njegovo pridobivanje dokaj drago. Uporabljata se dva postopka za pridobivanje niklja: postopek "mond" in postopek podoben tistemu, s katerim se pridobiva baker.

Postopek "mond" je omejen le na določene vrste rud. Preko površine segrete rude se pretaka ogljikov monoksid (CO), ki povzroča vezavo niklja v nikljev karbonil ($Ni(CO_4)$). To je zelo hlapljiva spojina, ki v plinasto stanje prehaja neposredno iz trdnega stanja pri temperaturi okoli 970°C. Iz te spojine se tekom proizvodnega procesa izloča nikljev prah in ogljikov monoksid.

Pri drugemu postopku se ruda drobi in obogati s flotacijo ter peče in tali v električnih pečeh. S prepihovanjem taline v konverterjih se dobi blister nikelj.

Nikljeve rude vsebujejo tudi kovine kot so kobalt, zlato, selen, srebro in telur. Te kovine se izločajo iz žlindre dobljene pri konvertrskem pridobivanju niklja. Blister nikelj se ponovno tali in vliva v anode, ki se rafinirajo z elektrolizo.

Okoli 80% rafiniranega niklja se uporablja za legiranje drugih kovin, večinoma pri proizvodnji jekel. Okoli 10% niklja se porabi za nikljeve prevleke in preostalih 10% ali kot čisti nikelj ali kot zlitine v katerih prevladuje.

Nikelj je trda in srednje korozijsko odporna kovina, ki se da dobro polirati. Ima ploskovno centrirano kristalno rešetko. Odporen je na pojav krhkosti pri nizkih temperaturah, zato se uporablja tam, kjer ta pojav ogroža konstrukcijske elemente. Uporabljajo ga za izdelavo delov plinskih turbin in raketnih motorjev. Izmed vseh kovin ima najširše temperaturno območje uporabnosti.

Najpogosteje se uporablja kot legirni element. Zlitine so znane pod različnimi komercialnimi imeni (Alnico, Alumel, Incomel, Chromel, Hastelloy, Nicrome), ki pa so nastala tudi glede na imena ostalih vsebovanih legirnih elementov. Alnico (Fe, Ni, Al, Co) se uporablja v zelo močnih trajnih magnetih. Alumel in Chromel se uporabljata za izdelavo termočlenov v napravah s toplotno regulacijo. Hastelloy ima visoko trdnost in korozijsko odpornost. Nicrome se nahaja v žicah za toplotno ogrevanje. Električne baterije vsebujejo nikelj-kadmijevo zlitino. "Nikljevo srebro" ("nemško srebro"), zlitina kobalta, bakra, niklja in cinka se uporablja za izdelavo nakita in kovancev. Mnoge "superzlitine" vsebujejo nikelj. Berilij-nikljeva zlitina, ki vsebuje 98% niklja, 1,5% berilija in 0,5% mangana, je le ena izmed takih zlitin, ki se uporabljajo za posebne namene.

TITAN

Značilnost titana je njegova majhna specifična masa, visoka trdnost tudi pri povišanih temperaturah ter srebrno modra barva. Odkril ga je angleški duhovnik William Gregor leta 1791. Nahaja se v mineralih kot so rutil (TiO_2) in ilmenit ($FeTiO_3$) v Avstraliji, Kanadi, Afriki in Rusiji.

Pomemben je postal v petdesetih letih tega stoletja, ko so se razvijala nadzvočna letala in se je iskala kovina, ki je odporna na visoke obremenitve pri povišanih temperaturah. Danes se v komercialne namene proizvaja okoli 70 tisoč ton titana letno. Iz rude zdrobljene v prah se izločijo titanovi kristali. Titanov oksid se izpostavi klorovim hlapom, s katerimi reagira v titanov tetraklorid. Ko se ta pomeša z vodo razvije gost bel dim, zato se uporablja v vojaške namene za ustvarjanje dimnih sledi pri označevanju ciljev. Ko se oksid pretvori v tetraklorid se spusti v posodo iz nerjavnega jekla napolnjeno z magnezijem ali natrijem, ki je tesno zaprta z zavarjenim pokrovom. Proces se odvija 24 ur na temperaturi 430°C. Titan se med procesom nabere na jeklenih stenah posode, s katerega se postrga po končanem procesu in pretali ter izlije v ingote.

Titan ima gosto heksagonalno strukturo v svoji α fazi pod temperaturo 880°C. Nad to temperaturo prehaja v β fazo, za katero je značilna prostorsko centrirana kubična rešetka. Lažji je od nerjavnega jekla in poleg že omenjenega izredno primeren za aplikacije v medicini. Medicinski inštrumenti in protetični implatanti sta najbolj značilna področja uporabe. Titan je med vsemi kovinami najbolj biokompatibilen in ima togost, ki je najbližje togosti

človeških kosti. Pogosto se uporablja v sklopih skupaj s polietilenom in zelo čistimi keramikami.

Titan tvori tanko plast oksida, ki ga ščiti pred nadaljnjo korozijo, podobno kot aluminij in nikelj. Titan se lahko obarva s pomočjo elektrolize, kjer se kot elektrolit uporablja amonijev sulfat. Tako obarvani titan se uporablja za izdelavo ur, pisal, kamer in ostalih podobnih izdelkov. Titanov oksid se uporablja tudi kot pigment v barvah.

ŽAROODPORNE KOVINE

Med žaroodporne kovine sodijo tiste, katerih tališče je nad temperaturo 2000°C. Nekatere izmed njih se talijo šele pri 3420°C. Med te kovine sodijo nekatere kovine iz platinske skupine (iridij, osmij in rutenij) ter še krom, kolumbij, hafnij, molibden, niobij, renij, tantalij, volfram in vanadij. Te kovine hitro oksidirajo pri nižjih temperaturah. Uporabljajo se v primerih, ko se v okoljih z visoko temperaturo zahteva visoka trdnost materiala. Nobij in tantalij sta v sedanjosti najbolj iskani žaroodporni kovini zaradi svoje duktilnosti, visokega tališča oksida in razmeroma ugodne cene. Hafnij ima enako dobre lastnosti, vendar je dražji, ker se nahaja le v cirkonijevih rudah. Uporablja se v usmernikih električnega toka in nekaterih elektronskih komponentah. Renij je kovina visoke trdnosti, ki se uporablja v vakuumski tehniki. Vanadij se nahaja v mnogih rudah in se dodaja jeklom v količini do 1% zaradi izboljšanja granulacijske strukture. Tantal se uporablja v reaktorski tehniki in za izdelavo instrumentov, kot nadomestek za platino in v raznih zlitinah. Kolumbij se uporablja v termalno izpostavljenih konicah vesoljskih plovil in ostalih toplotno obremenjenih komponentah.

ŽLAHTNE KOVINE: ZLATO, SREBRO, PLATINA

Žlahtne kovine se tradicionalno uporabljajo za izdelavo nakita in kovancev, hkrati pa tudi kot legirni materiali v zlitinah širše uporabnosti in v protikorozijskih prevlekah.

Zlato

Zlato se v naravi nahaja v razmeroma čisti obliki (naplavine, kremenčeve skale), je pa tudi vezano v rudah drugih kovin. Večino ga pridobijo v Južnoafriški republiki in Rusiji. Iz kremenovih rud se zlato izloča z redukcijo z živim srebrom ali cianidom. Zlato ima visoko električno prevodnost, je korozijsko odporno, gnetljivo in kovno ter sodi med najbolj dragocene kovine. Zlate prevleke se izdelujejo z elektrolizo, kjer je elektrolit zlati klorid. Zlato se da izredno stanjšati do 0,1μm (“zlata pena”) in uporabiti kot zaščitna prevleka (pozlačene kupole starih cerkva).

Zlato je mehko, zato se ne uporablja kot čista kovina. Večinoma se legira z bakrom, srebrom in platino. Ima ploskovno centrirano kristalno rešetko. Uporablja se za barvanje stekla, izdelavo kakovostnih elektrokontaktov, predilne šobe. Veliko se uporablja v zobni protetiki, kjer tipične zlitine lahko vsebujejo do 70% zlata, 5% platine, 5% paladija, 25% srebra, 0,85 bakra, 3% niklja in 1% cinka. Čistost zlata se izraža s karatno lestvico, kjer je 24 karatno čisto zlato, 18 karatno vsebuje 75% čistega zlata in 14 karatno 50% čistega

zlata. Svetovne zaloge zlata so skupaj vredne okoli 65 milijard ameriških dolarjev.

Srebro

Srebro se v naravi nahaja v rudah, kot so srebrov sijajnik ali argentit (Ag_2S), srebro-bakrova medlica, svinčen sijajnik, bakrov kršec in srebrov klorid (AgCl). Ima ploskovno centrirano kristalno rešetko in je zato duktilno in kovno. Uporablja se za zaščitne prevleke na drugih kovinah, za električne prevodnike, za nakit, zaradi svoje svetlobne občutljivosti pa je tudi nezamenljivo v fotografskih procesih, zato se okoli 30% srebra uporablja v fotografske namene. Uporablja se tudi pri izdelavi ogledal in svetlobno občutljivih stekel, ki potemnijo na svetlobi in v temi ponovno posvetlijo. Srebro se uporablja tudi kot legirni element, sestavni del litij-kadmijevih baterij in kot osnova eksploziva (srebrni fulminat). Srebrni jodid se uporablja za umetno vzpodbujanje naravnega dežja.

Platina

Platinsko skupino tvori šest kovin, ki jih vsebujejo nikljeve rude. Te so poleg platine še iridij, osmij, paladij, rodij in ruterij. Osmij in ruterij imata prostorsko centrirano kubično rešetko, ostali pa ploskovno centrirano. Vsi imajo visoko tališče nad 1660°C. Tehnično je najbolj uporabna platina, ostali pa se v manjših količinah uporabljajo kot legirni elementi.

V naravi se platina nahaja v sulfidih, samorodna pa na Uralu. Uporablja se za korozijske zaščitne prevleke kovin in kot katalizator mnogih kemičnih procesov. Iz nje se izdelujejo žice, ki so odporne na visoke temperature (žarilne žice, termoelementi, anode). V katalizatorjih avtomobilov pretvarjajo nezgorele hidrokarbonate in ogljikov monoksid v ogljikov dioksid in vodo. Platina se uporablja tudi pri izdelavi laboratorijske opreme zaradi visoke odpornosti na mnoge vrste kemikalij, medicinske inštrumente in nakit. Ena izmed pomenljivosti je, da je draga, dražja celo od zlata.

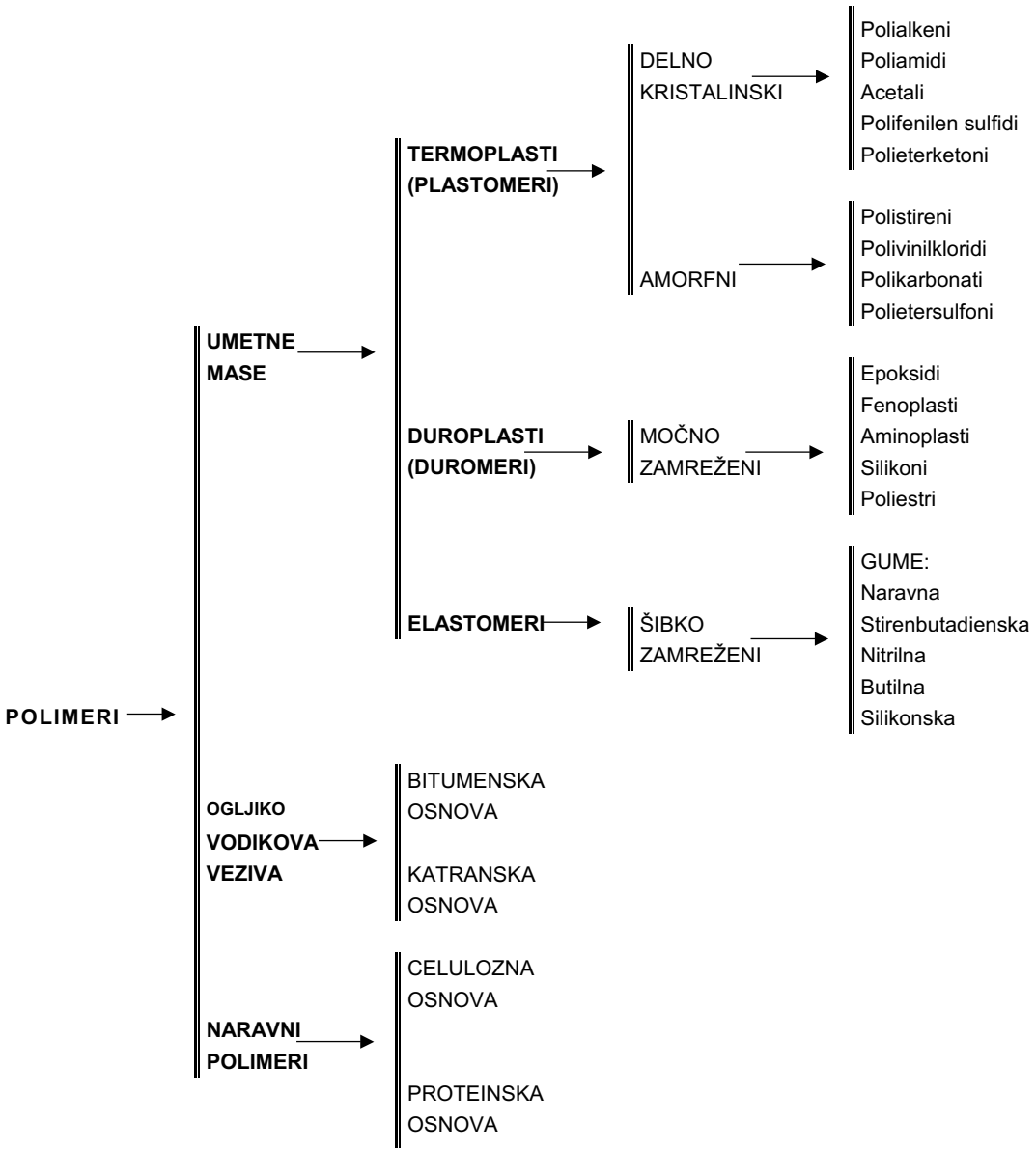
VPRAŠANJA

1. Shematsko prikažite in opišite proizvodnjo aluminija.
1. Naštejte in na kratko opišite postopke, s katerimi se iz aluminijevih zlitin izdelujejo polizdelki.
2. Zakaj so aluminijeve zlitine zelo uporabne v gradbeništvu? Pri tem pojasnite, kaj je to specifična trdnost materiala ter grafično prikažite primerjavo med to lastnostjo pri različnih jeklih in pri aluminijevih zlitinah.
3. Kako povezujemo aluminijeve elemente v konstrukcijsko celoto in katere so prednosti aluminijevih zlitin pred jekli?
4. Kaj obravnava Eurocode 9?
5. Pojasnite razliko med medeninami in broni ter opišite osnovne značilnosti obeh zvrsti zlitin.

6. Kaj je to vroče pocinkanje in katere so prednosti zaščite jeklenih konstrukcij s tem postopkom?
7. Pojasnite, za kaj se uporabljajo kositer, svinec in krom.
8. Katere lastnosti magnezija, niklja in kroma določajo njihovo uporabnost in za kaj se te kovine največ uporabljajo?

POLIMERI

HIERAHIČNA RAZPOREDITEV POLIMEROV



Med najbolj uporabnimi polimeri so tisti, ki so sestavljeni iz ogljikovih atomov. Polimere se lahko razdeli v dve veliki skupini, na termoplaste in duroplaste. Splošna lastnost polimerov je, da jih tvorijo nitaste molekule, v katerih so atomi povezani z močnimi kovalentnimi vezmi. Pri ***termoplastih*** so nitaste molekule šibko povezane z Van der Vaalsovimi vezmi ali pa sploh niso povezane. Zato je potrebno razmeroma majhno zvišanje toplotne energije za mehčanje termoplastov, ki se po ohladitvi ponovno strdijo. Ta proces se lahko ponavlja velikokrat brez bistvenega vpliva na ostale lastnosti termoplasta. Nekatere vrste termoplastov lahko tudi kristalizirajo. Pri ***duroplastih*** so nitaste

molekule navzkrižno povezane z močnimi kovalentnimi vezmi. Zaradi tega se že oblikovani duroplasti ne morejo toplotno preoblikovati, ne da bi se s tem spremenile ostale njihove lastnosti. Duroplasti se medsebojno razlikujejo po gostoti zamreženosti. V naravi se tvorijo mnogi ***naravni polimeri***, ki nastajajo bodisi v živih organizmih bodisi v neživi naravi.

Termoplasti (Plastomeri)

Termoplasti so tako po različnosti kot po številu in količini večja skupina od duroplastov. Večinoma se uporabljajo v obliki, ki je neposredno primerna za strojno oblikovanje. Med temi so ***polialkeni*** najbolj uporabljana skupina, med njimi pa sta najbolj znana polietilen (PE) in polipropilen (PP). Posebnost procesa polimerizacije polietilena je, da se nitaste molekule (verige) lahko razvejajo in s tem omogočajo kristalizacijo v trdnem polimeru. Razvejanost verig je odvisna od vrste polimerizacijskega postopka. Stopnja kristalizacije se odraža tudi v gostoti polimera. Tako poznamo polietilene nizke (LDPE), srednje (MDPE) in visoke (HDPE) gostote.

Poliamidi (najloni) lahko tvorijo vodikove vezi med molekulami, kar ustvarja visoko stopnjo kristalizacije. Pomanjkljivost vodikovih vezi je velika afinost do vode, zato najloni vsrkavajo vlago. Pri tem se jim poveča prostornina, zmanjšuje pa se togost ter povečuje žilavost.

Acetali so visokokristalinski polimeri velike trdnosti in togosti ter gladkosti (nizek koeficient trenja). Pogosto se uporabljajo za izdelavo različnih posod.

Polistireni so po razširjenosti uporabe takoj za polietileni. So značilno amorfni, razmeroma velike natezne trdnosti in podajni. Veliko se uporabljajo v obliki penastih kompozitov. Polistirenski kompoziti z vključki gume so dobri izolatorji zvoka in absorberji tresljajev. Znani so kot na udarce visokoodporni polistireni (HIPS).

Polivinilkloridi (PVC) se odlikujejo z raznolikostjo lastnosti. V nemodificirani obliki imajo nizek odstotek kristalizacije (do 10%) in se obnašajo kot amorfni polimeri. PVC lahko absorbira velike količine lahkih organskih komponent, ki delujejo kot plastifikatorji, ker znižujejo temperaturo steklastega prehoda T_g pod sobno temperaturo. Zato se lahko uporabljajo za impregnacijo tkanin in usnjenih izdelkov, za izdelavo obutve in podobnih izdelkov za široko uporabo.

V novejšem času so razvili tudi termoplaste, ki so odporni na nekoliko višje temperature (nad 200°C) Med te sodijo polisulfoni, polistirensulfidi (PPS) in polieterketoni (PEEK). Tovrstni polimeri lahko v določenih primerih nadomestijo kovine, vendar so še vedno dokaj dragi, hkrati pa jih je razmeroma težko obdelovati.

Duroplasti (Duromeri)

Močno zamreženi duroplasti

Zaradi močne kovalentne povezanosti polimernih verig so duroplasti bolj trdi in krhki kot termoplasti, vendar tudi bolj odporni na povišane temperature in deformacije pod stalno delujočo obtežbo (lezenje).

Epoksidi sodijo med najbolj znane in uporabne duroplaste v gradbeništvu. Uporabljajo se kot lepila (araldit) in matrični material v kompozitih, a so razmeroma dragi. V kompozitnih materialih jih zamenjujejo cenejši ***poliestri***.

Fenoplasti ali formaldehidni polimeri sodijo med najstarejše polimere, ki se uporabljajo v vsakdanji rabi. Ostale vrste formaldehidnih polimerov so urea-formaldehidi, iz katerih se izdelujejo elektroinstalacije in melamin-formaldehidi, ki se uporabljajo za izdelavo obložnih laminatov ("ultrapas").

Silikoni so delno organski polimeri. Osnovno verigo tvorijo kremenove molekule, stranske veje pa organske spojine. Navzkrižno zamreženost ustvarjajo vključki iz reaktivnih stranskih skupin. Gostota zamreženosti je odvisna od pogostosti teh vključkov. Silikoni so zato lahko tekočine, elastomeri in trdni termoplasti. Trdni silikoni so odporni na toploto, vodo in mnoge kemikalije.

Šibko zamreženi duroplasti

Večina šibko zamreženih polimerov ima elastomerne lastnosti pri sobni temperaturi, ker je temperatura steklastega prehoda T_g nižja od sobne temperature (20°C). Ko se elastomer raztegne, se polimerne verige poravnajo, kar pri nekaterih vrstah polimerov omogoča kristalizacijo. Tako tovrstni polimeri pridobijo na trdnosti in togosti. Ta pojav "samoutrditve" se imenuje napetostna kristalizacija.

Naravne gume so osnova za izdelavo tehnično zelo uporabnega materiala. Z vulkanizacijo (vključitev žvepla v polimerne verige) ali z vključevanjem ogljika kot polnila se poveča njihova tehnična uporabnost. ***Umetne gume*** imajo podobno sestavo kot naravne gume. Pri stirenbutadienskih gumah se njihove lastnosti lahko prilagajajo potrebam uporabnikov ali z vključitvijo klora (polikloropen oz. neopren) ali z vključitvijo dušika. ***Silikonske gume*** sodijo med najbolj stabilne elastomere in so odporne na kemikalije, olja in temperaturne spremembe. So kemično inertne, zato so uporabne tudi v medicini (implatanti), ker ne povzročajo imunske reakcije tkiva.

Naravni polimeri

Večina naravnih polimerov ima vlaknasto strukturo in so sestavni del naravnih kompozitnih materialov, kot je to les. Pri predelavi naravnih polimerov se pogosto spremeni njihova naravna oblika in struktura, s preoblikovanjem pa se dobi nov material. Tak primer je izdelava papirja, kjer se naravni vlaknasti polimeri razporedijo v bolj ali manj anizotropen material.

9

UMETNE MASE

UVOD

Polimere, ki se zadnjih nekaj deset let vse bolj uveljavljajo v tehniki in s tem tudi v gradbeništvu pogosto označujemo s preprostim imenom ***umetne mase***. Sodobna proizvodnja umetnih mas se je začela leta 1868, ko je John Wesley Hyatt iznašel nadomestilo za dragoceno slonovo kost pri izdelavi krogel za biljard. Razvil je *celuloid* kot proizvod iz kolodijske volne (nitrat celuloze z 11% dušika) in alkoholne raztopine kafre. Prvo povsem umetno maso, *bakelit,* je leta 1909 razvil Leo Bakeland na osnovi prve uspešno kontrolirane reakcije (polikondenzacije) formaldehida s fenolom.

Velika raznolikost lastnosti materiala, nizki moduli elastičnosti in dokaj visoke trdnosti omogočajo široko področje uporabe. Okoli 20% vseh proizvedenih umetnih mas v ZDA in v Evropi se porabi v graditeljstvu, vendar pa je njihova zastopanost v nosilnih konstrukcijah dokaj redka. Najpogosteje se uporabljajo za izdelavo cevi, površinskih oblog, membran, lepil, kitov, krovnih materialov in toplotnih izolatorjev. Izdelki iz umetnih mas se lahko oblikujejo na različne načine z vlivanjem v kalupe, vbrizgavanjem v kalupe skozi šobe, iztiskanjem, stiskanjem, kaširanjem tekstilnega traku z umetno smolo, predenjem umetnih niti in tkanjem tkanin iz teh niti itd. Postopki so odvisni od njihove. Pogosto se kombinirajo s sestavinami, ki delujejo kot stabilizatorji ali polnila in tako tvorijo kompozitne materiale, ki so bolj ekonomični in tehnično primernejši od osnovnih polimernih matric.

Posebna uporaba polimerov v obliki dodatkov keramičnim materialom, kot so betoni in malte, vpliva na bistveno modificiranje njihovih lastnosti. Z vlakni armirane umetne mase – umetni kompoziti se uporabljajo tudi za nosilne konstrukcije. Polimerni trakovi pa se vse bolj uporabljajo tudi za ojačitev temeljnih zemljin in stabilizacijo brežin v velikih vkopih.

Polimeri so makromolekularne organske spojine, ki so zgrajene iz sto do več tisoč monomer. Monomere so lahko sestavljene iz dveh pa do približno 30 ogljikovih atomov. Monomere se preko valenčnih vezi povežejo v polimere. Molekule polimerov so tako zgrajene iz zelo dolgih verig ogljikovih atomov, ki so lahko prekinjene z drugimi elementi (dušik, kisik, žveplo itd). Molekula je lahko linearna, razvejena ali mrežasto prepletena. Primarna povezava v verigi je močna, sekundarna med verigami pa šibka. Povezave med verigami so lahko kemijske s šibkimi Van der Waalsovimi vezmi ali fizikalne s prepletanjem verig.

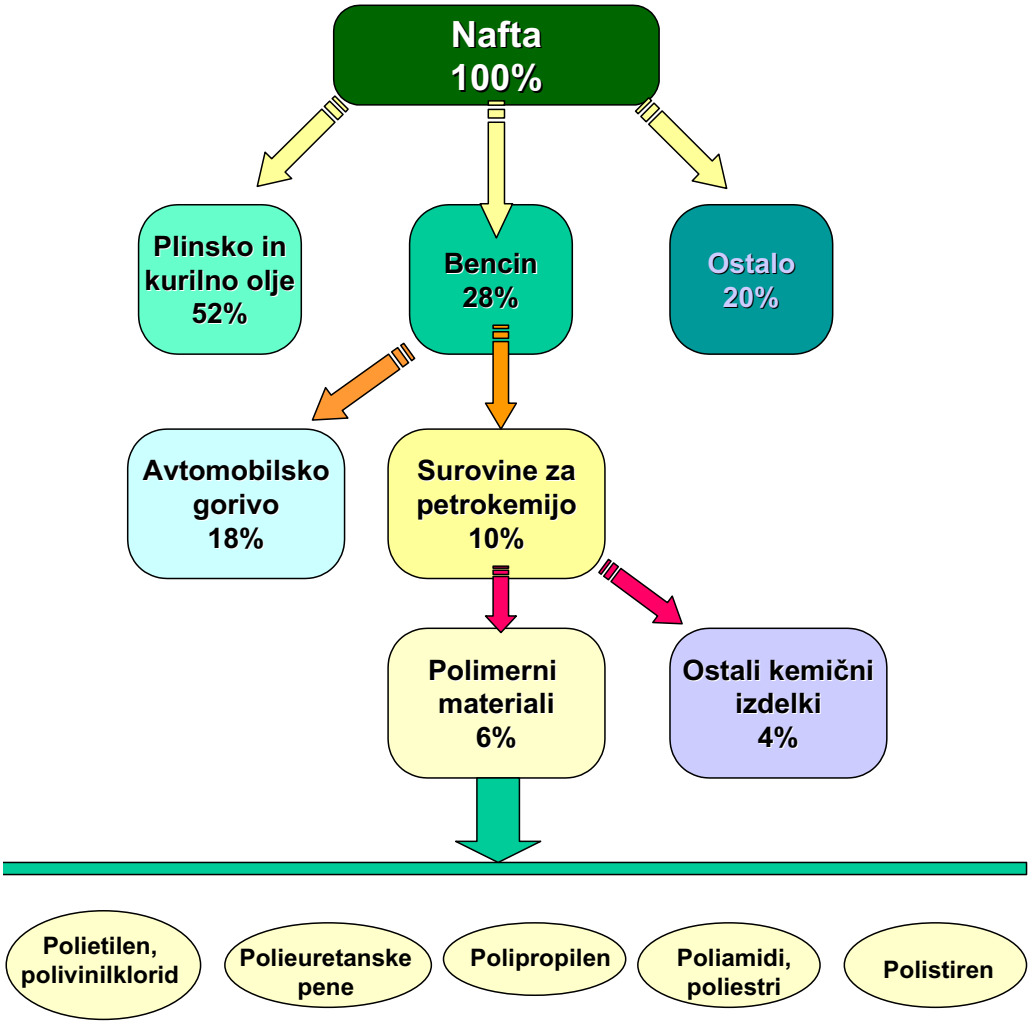
Polimere oz. umetne mase po nastanku lahko razvrstimo v tri skupine:

- naravne makromolekulske snovi (celuloza, škrob, hitin, proteini, kavčuk),

- polsintetične makromolekulske snovi, ki jih dobimo iz naravnih s kemično predelavo (viskoza, bakrov rejon) in
- popolnoma sintetične makromolekulske snovi (umetne snovi) dobljene iz nižjemolekulskih osnovnih molekul s polimerizacijo, polikondenzacijo ali poliadicijo.

Umetne mase se lahko pripravijo s kemično predelavo naravnih polimernih snovi ali s kemično sintezo - polimerizacijo iz enostavnih gradnikov, kot so acetilen ali etilen. Za pripravo makromolekulskih snovi so potrebne molekule s prostimi reaktivnimi mesti (na pr. s funkcionalnimi skupinami kot so amino, karboksilna in hidroksilna skupina z dvojnimi ali trojnimi vezmi).

Ena izmed osnovnih naravnih surovin za pridobivanje vrste različnih polimerov je nafta. Na sliki 9-1 je shematično prikazan delež polimerov, ki jih lahko pridobimo s predelavo nafte.



Slika 51: Shematični prikaz pridobivanja polimerov iz nafte

OSNOVNE SKUPINE POLIMEROV

Umetne mase sestavlja omejena količina različnih polimerov, najbolj pogosto pa le ena izmed vrst polimerov katerih sestavo se da natančno zapisati s kemično formulo. Ogljikovodikova veziva, ki jih obravnavamo v naslednjem poglavju, so za razliko od umetnih mas sestavljena iz več sto ali celo tisoč različnih polimerov in se zato njihovo sestavo praktično ne da prikazati s kemijskimi formulami.

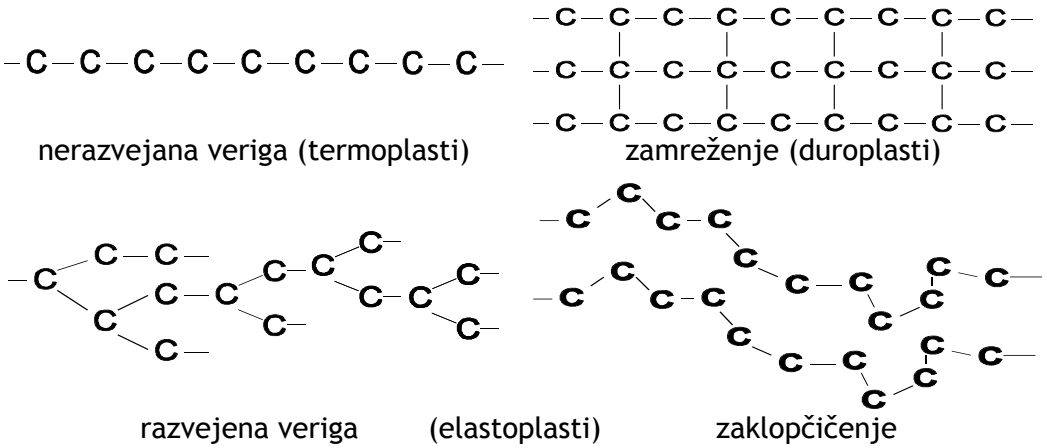
Polimerizacija je proces, s katerim se posamezni gradniki - monomere s kemično reakcijo povežejo v polimer, ki obstaja v stanju z nižjo prosto energijo (nižjo valenco) kot posamezen monomer. Včasih se monomere prosto oblikujejo v polimere, vendar pa je pogosto potrebna dodatna zunanja energija, ki sproži ta proces. Običajno energija izvira iz neposrednega toplotnega vira, ultravilične svetlobe, eksotermne reakcije, ki izvira iz neke druge lokalne kemične reakcije, ali iz visokoenergijskega bombardiranja z elektroni ali gama žarki. Včasih do polimerizacije prihaja v čisto običajnem domačem okolju, ko na primer iz terpenov v eteričnih oljih pod vplivom ultravilične svetlobe nastane smolasta polimerna masa politerpen.

Kot primer polimerizacije si lahko ogledamo nastanek polimera polietilena iz monomera etilena, ki je njegov osnovni gradnik. Eten (etilen) $H_2C=H_2C$ je nenasičen ogljikovodik, brezbarven plin, ki ima dvojno ogljikovo vez in se zaradi reaktivnosti zlahka polimerizira v polietilen $-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-$, ki je povezan z močnimi kovalentnimi vezmi. Komercialni polietileni so sestavljeni iz 1.000 do 10.000 osnovnih molekul $-CH_2-$. Verige so medsebojno povezane s šibkimi Van der Waalsovimi vezmi, ki določajo njihovo odzivanje na temperaturne spremembe okolja, kar je značilno za termoplaste. Proces polimerizacije etilena se da pospešiti s katalizatorji, kot je kromov oksid ali kak nestabilen organski peroksid. S kemikalijami se da vplivati na dolžino polimer in s tem tudi na lastnosti polimernih materialov, kot so mehanske in kemične lastnosti ter njihova trajnost. To je zlasti pomembno pri izdelavi umetnih gum, kjer velike dolžine verig lahko naredijo material zelo viskozen in pretog ter zahteven za nadaljnjo predelavo. Zaradi dolgih verig je material lahko pregrob, kar velikokrat ni zaželena lastnost.

Polimeri se glede na svojo sestavo in od tod izvirajoče lastnosti:

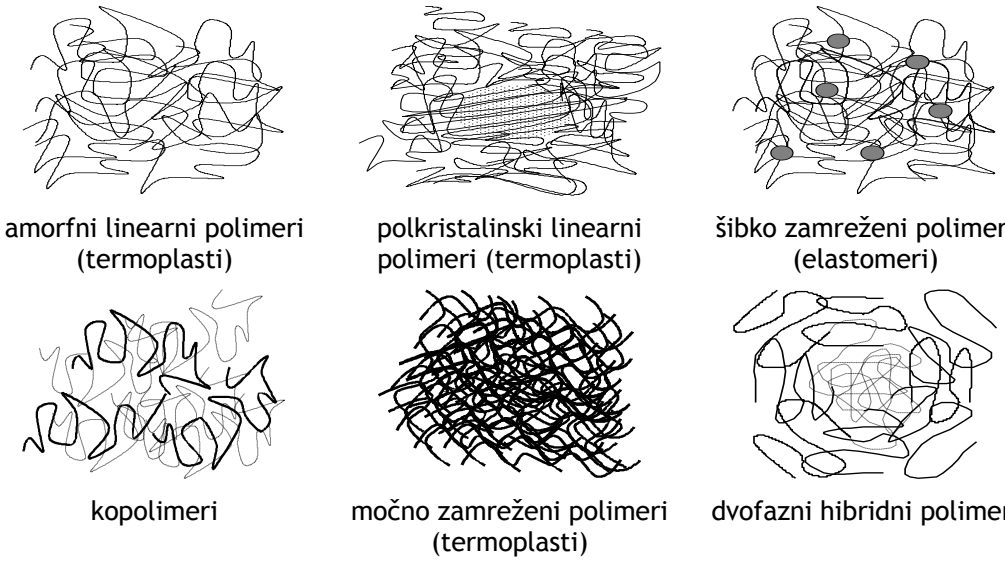
- ***termoplaste (plastomere),*** ki so snovi iz nitastih molekul, ki so znotraj povezane z močnimi kovalentnimi vezmi. Niti so med seboj lahko povezane s šibkimi Van der Waalsovimi vezmi ali šibko elektrostatično povezavo med vodikovimi atomi in drugimi elementi. Zaradi šibkih vezi med nitastimi molekulami termoplasti po segrevanju nad temperaturo zmehčišča (večina med 100 in 250°C) ali pod obremenitvijo postanejo plastični in se zato dajo oblikovati. Po ohladitvi obdržijo obliko in so gibki.
- ***duroplaste (Duromeri),*** ki so snovi z mrežasto strukturo povezano z močnimi kovalentnimi vezmi. Zato so trdi, togi, krhki in netaljivi oz. odporni na organska topila. Po oblikovanju ohranijo svojo obliko tudi pri višjih temperaturah in se termično ne dajo več preoblikovati. Posebna podskupina duroplastov so ***elastoplasti (elastomere)***. To so snovi iz prožnih polimernih verig, ki se po razbremenitvi povrnejo v prvotno obliko. Verige so pogosto prepletene v klobčiče, kar omogoča velike elastične deformacije materiala. Ko je elastoplast segret nad *temperaturo steklastega prehoda* (T_g) ima sposobnost "plastičnega spomina". To pomeni, da se verige lahko po

razbremenitvi povrnejo v prvotno obliko. Togost elastoplastov se lahko poveča s prečnimi povezavami med verigami elastomerov z nekim drugim elementom, kot je to slučaj s kavčukovimi molekulami, ki se z vulkanizacijo povezujejo z žveplenimi atomi.



Slika 52: Vrste molekul nastalih s polimerizacijo (polimerne verige)

Osnovne surovine za izdelavo polimerov so surova nafta, plini in premog. Iz primarnih virov se pridobiva nekaj osnovnih monomerov, ki predstavljajo izhodiščno surovino za izdelavo večine polimerov. Osnovni monomeri so: etilen, propilen, stiren, vinilklorid, butadien, cikloheksan in acetilen.



Slika 53: Polimerne verige v različnih vrstah polimernih materialov

Polimere se da razvrstiti v posamezne skupine glede na razporeditev in medsebojno razmerje polimernih verig v zamreženi strukturi. Ena izmed razvrstitev je shematično prikazana na sliki 9-3.

Polimerna mreža nastane:

- iz predhodno formiranih linearnih verig v dvostopenjski polimerizaciji (polietilenske verige se lahko medsebojno zamrežijo s kemičnim postopkom ali z žarčenjem; pri epoksidih in nezasičenih poliestrih se v drugi stopnji polimerizacije medsebojno zamrežijo razmeroma kratke polimerne verige).

- z nastajanjem razvejanih verig in mrež že pri osnovni polimerizaciji (fenol formaldehidne smole so tipične predstavnice kakor tudi naravni polimeri v ligninu, zato se za lepljenje lesa uporabljajo fenolformadehidne smole)

Lastnosti polimerov se lahko uspešno spreminjajo in prilagajajo potrebam z vključevanjem sekundarnih mrežnih sklopov. Tako nastajajo *kopolimeri*. Etilen se lahko kopolimerizira s propilenom ali vinil acetatom in na ta način tvori kopolimere z veliko raznolikostjo lastnosti. Druga skupina *hibridnih* polimerov so tisti, ki vsebujejo dodane materiale, s katerimi se legirajo in tako *nastajajo polimerne zlitine*. Hibridizacija polimerov predstavlja pomembno področje ustvarjanja novih materialov uporabnih za različne tehnične aplikacije. Polimerne zlitine nastajajo s kombinacijo dveh sorodnih ali kompatibilnih polimerov in dodajanjem tretjega polimera v obliki ločene, razpršene faze.

Polimeri, ki imajo enostavno in pravilno molekularno zgradbo (polietilen PE, polipropilen PP itd.) lahko tvorijo kristalite v trdnem stanju. To so območja, v katerih so verige urejeno izravnane. V takih območjih so polimeri gostejši, medsebojne vezi pa okrepljene. Delež takih območjih pri posameznih polimerih lahko znaša od 50% (polietileni majhne gostote, LDPE) do 90% (polietileni velike gostote, HDPE). Kristalinska območja rastejo med prehodom iz zmehčanega v trdno stanje v približno kroglasto obliko od središča navzven. Lastnost teh območij je odvisna od poteka ohlajevanja. Nekateri izmed polkristalinskih polimerov (PE, PP, PA, PS) imajo precejšen pomen za gradbeništvo, saj se uporabljajo kot vlakna uporabna za različne namene. Polimeri se vlečejo v vlakna, v katerih se kroglasta kristalinska območja oblikujejo v orientirane izravnane odseke vlaken. Prvotne kemične vezi ležijo vzdolž osi vlaken, kar povečuje njihovo trdnost in modul elastičnosti v vzdolžni smeri.

Lastnosti termoplastov so zelo odvisne od temperature. Trden, amorfen termoplast je sestavljen iz ogromnega števila naključno prepletenih verig, ki so pri sobni temperaturi (20°C) medsebojno povezane v vozliščih. Te povezave niso kemične temveč le fizikalne. Pri sobni temperaturi je termoplast tog in krhek, podobno kot duroplast. Z višanjem temperature pride do termalnega gibanja molekul. Zaradi tega se verige medsebojno sprostijo ter premikajo, ko se material obremeni. Modul elastičnosti se zmanjšuje in material pod stalno obremenitvijo teče. Za posamezno vrsto polimera je značilna določena *temperatura steklastega prehoda* (T_g), pri kateri lahko nastopi večje premikanje molekul in pri kateri se mehanske in ostale lastnosti materiala bistveno spremenijo. Pri akrilu (PMMA) je ta temperatura okoli 105°C, pri polistirenu pa okoli 95°C. Če temperatura raste dalje, material postaja vse bolj podajen in zvezno prehaja v viskozno talino.

Pri delno kristalinskih polimerih posamezne verige prehajajo iz amorfnega v kristalinsko območje in ponovno v amorfnega. Kristaliti delujejo kot povezave v amorfni matrici in povečujejo togost in žilavost materiala. Vendar sile med verigami v kristalitih niso zelo močne, zato in so tudi temperature zmehčanja razmeroma nizke.

Duroplaste sestavljajo naključno razporejene mreže, material je po naravi amorfen in po nekaterih lastnostih blizu anorganskim steklom. Elastoplasti so prav tako amorfni, ko niso obremenjeni. Pri nekaterih vrstah elastomerov se pri velikih obremenitvah polimerne verige toliko izravnajo, da nastopi začasna kristalizacija, kar spremeni mehanske lastnosti materiala.

Preglednica 22: Pregled osnovnih polimerov

Skupina	Naziv	Okrajšava
Termoplasti	Polistiren	PS
	Akril	PMMA
	Polietilen nizke gostote	LDPE
	Polietilen visoke gostote	HDPE
	Poliester (polietilentereftalat)	PETP
	Polipropilen	PP
	Poliamid (najlon)	PA
	Polikarbonat	PC
	Polivinilklorid	PVC
	Poliacetal	POM
	Politetrafluoroetilen	PTFE
Duroplasti	Epoksi	EP
	Melamin formaldehid	MF
	Urea formaldehid	UF
	Nenasičeni poliester	UP
	Fenoplast	PF
	Alkid	-
	Poliuretan	PUR
Elastoplasti	Naravni kavčuk	NR
	Stiren-butadienska guma	SBR
	Polibutadien	BR
	Butilna guma	BUTYL
	Polikloropren	CR
	Umetni polisopren	IR
	Nitril	NBR
	Silikonska guma	-

TEHNIČNE LASTNOSTI UMETNIH MAS

Pri uporabi umetnih mas v gradbeništvu je pomembno poznati njihove mehanske in druge tehnične lastnosti, na osnovi katerih se odločamo o njihovi uporabi. Med pomembnejše lastnosti sodijo trdnost, odpornost na obrabo, udarna žilavost, koeficient trenja kakor tudi fizikalno-kemične lastnosti, od katerih je odvisna trajnost in obnašanje umetnih mas med njihovo uporabo. Poleg teh lastnosti so pomembne tudi termalne in propustnostne lastnosti, do določene mere pa tudi optične in električne lastnosti.

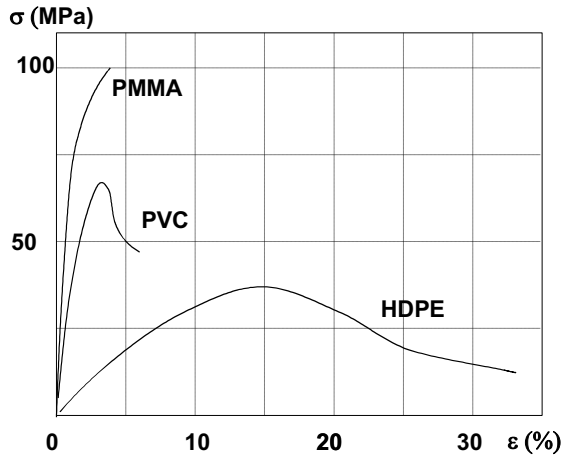
Gostota

Umetne mase so zgrajene iz lahkih elementov in je zato njihova specifična gostota majhna. Najlažja komercialna polimera sta polimetilpenten (830 kg/m^3) in polipropilen (PP) (905 kg/m^3). Najtežji je politetrafluoretilen (PTFE) (2150 kg/m^3), ker vsebuje visok delež fluorovih atomov.

Mehanske lastnosti umetnih mas

Mehanske lastnosti umetnih mas so zelo različne in pogojene z njihovo sestavo. Pri posameznem polimeru se spreminjajo z razmeroma majhno spremembo temperature. Nekateri polimeri, kot so *amorfni termoplasti* pod temperaturo

steklastega prehoda T_g in *nearmirani mrežasti duroplasti,* so togi materiali in se krhko lomijo pri razmeroma nizkih specifičnih deformacijah (od 2 do 5%). Imajo izrazito elastičnost, vendar se ta s segrevanjem hitro zmanjšuje. Pri višjih temperaturah polimeri lezejo oz. se močno deformirajo pri stalno delujoči obtežbi. Pri amorfnih termoplastih prehod meje zmehčanja ni izrazit, vendar pa pri višjih temperaturah postanejo viskozni.



Slika 54: $\sigma - \varepsilon$ diagram treh značilnih polimerov, ki so bili kratkotrajno obremenjeni do porušitve

Značilnost *kristalinskih polimerov* je večja žilavost, manjši modul elastičnosti, višja trdnost, tečenje in relaksacija obremenitve ter velika občutljivost na pogostost dinamične obremenitve. Porušitev nastopi po prehodu čez mejo plastičnosti, ki velikokrat ni jasno vidna na $\sigma - \varepsilon$ diagramu. Z zvišanjem temperature se modul elastičnosti manjša, meja zmehčanja pa je bolj izrazita kot pri amorfnih termoplastih. Pri nizkih temperaturah so kristalinski polimeri krhki in dokaj togi.

Elastoplasti imajo nizke module elastičnosti in strižne module ter prenesejo zelo velike specifične deformacije (do 500%) s sposobnostjo popolnega vračanja v prvotno stanje po razbremenitvi. Zamrežena struktura elastoplastov preprečuje viskozno tečenje. Pri nizkih temperaturah je elastični odziv pogosto bolj počasen in notranje oviran. Pri dinamičnih obremenitvah so deformacije zelo odvisne od frekvence obremenjevanja.

Izmerjene mehanske lastnosti polimerov so odvisne od hitrosti obremenjevanja in temperature. Polimeri sodijo bolj med viskozno-elastične kot med elastične materiale, saj se lahko deformirajo le pri počasnem delovanju obtežbe, deformacije pa so pogosto nepovratne. Porušitve polimerov so lahko krhke ali duktilne z ali brez lokalnega zoženja prereza. Način porušitve je zelo odvisen od temperature in velikosti deformacij.

Ena izmed značilnost polimerov je velik vpliv tečenja in relaksacije. Pri delovanju dolgotrajne, stalne obtežbe se polimeri trajno plastično deformirajo. Deformacije hitreje naraščajo pri višjih temperaturah. Druga reološka lastnost je razmeroma hitra relaksacija obremenitev. To pomeni, da se pri stalni deformaciji polimera prvotno delujoča notranja obremenitev s časom razmeroma hitro zmanjšuje.

Koeficient trenja pri polimerih variira od izredno nizkih vrednosti (teflon-PTFE 0,03 do 0,10, najmanj od vseh materialov v gradbeništvu) do zelo visokih (gume, 1 do 3, kar je največ izmed vseh materialov v gradbeništvu). Koeficient trenja se spreminja v odvisnosti od hitrosti drsenja. Odpornost polimerov na obrabo je odvisna od koeficienta trenja in od trdnosti polimera. Nekateri žilavi polimeri z visoko molekularno težo (polietileni visoke gostote, HDPE) imajo izredno nizek koeficient trenja in petkrat večjo obrabno trdnost kot lito železo, zato se uporabljajo za izdelavo cevi, skozi katere se transportirajo ostri mineralni materiali.

Toplotne lastnosti

Toplotna prevodnost in specifična toplotna kapacitivnost sta pri vseh polimerih znotraj ozkega razpona vrednosti. Pri večini polimerov v kompaktni obliki toplotna prevodnost znaša od 0,15 do 0,45 W/m/K. V penastih polimerih se lahko dosežejo tudi izredno nizke vrednosti (do 0,024W/m/K), kar se izkorišča v izolativne namene. Toplotni raztezek polimerov je za okoli desetkrat večji kot pri kovinah in keramikah in znaša od 5 do 20 10^{-5} /K.

Prepustnost polimerov

Polimeri v trdni obliki praviloma niso porozni in ne prepuščajo plinov in tekočin. Izjeme so zelo tanke plasti in prevleke, ki lahko prepuščajo merljive količine plinov, hlapov in tekočin z neposrednim pretokom skozi trdno snov. Propustnost tankih plasti je različna pri različnih vrstah polimerov. Debeline sten cevi in izolacijskih membran so že zaradi doseganja ustrezne nosilnosti dovolj debele, da ne prepuščajo plinov in tekočin. Posebne propustne membrane za drenažo in stabilizacijo zemljin so narejene iz polimernih tkanin na tak način, da imajo zaradi kontrolitrane poroznosti natančno določeno propustnost.

Trajnost

Spremembe polimerov, izpostavljenih delovanju okolja, so posledica različnih vplivov. Od kombinacije in trajanja teh vplivov je odvisna trajnost polimerov. Na polimere delujejo agensi, kot so ultravijolično sevanje (sončna svetloba), toplota, kisik, ozon in voda, kot je to prikazano v preglednici 23.

Preglednica 23: Pomembnejši povzročitelji in načini propadanja polimerov

Povzročitelji propadanja umetnih mas	***Način propadanja***
kisik pri srednje visokih temperaturah	*termalna oksidacija*
kisik pri visokih temperaturah	*zgorevanje*
kisik + ultravijolično sevanje	*fotooksidacija*
voda	*hidroliza*
sama toplota	*piroliza*
ionizirajoče sevanje	*radioliza*
mikroorganizmi	*biodegradacija*
atmosferski kisik + voda + sončna svetloba	*atmosferska degradacija*

Povzročitelji propadanja vplivajo na kemične in fizikalne spremembe na molekularni ravni, ki se razlikujejo od umetne mase do umetne mase. Polietilen je na pr. občutljiv na sončno svetlobo, če ni posebej stabiliziran z absorberji

ultravijoličnih žarkov (črni ogljik). Nasprotno pa sončna svetloba ne deluje na PMMA in PTFE ter sta zato bolj odporna na atmosfersko degradacijo.

Fotooksidacija in termalna oksidacija z reagiranjem polimerov s kisikom iz atmosfere lahko privede do trganja polimernih verig na manjše oksidirane fragmente. Ti so pogosto topljivi v vodi. Ta jih hkrati spira s površine polimernih elementov in s tem povzroča erozijske poškodbe. Polimerne barvne prevleke zaradi tega izgubijo lesk, postanejo površinsko praškaste, poveča se njihova propustnost in s tem zmanjša zaščitna vrednost. Ionizirajoče sevanje povzroča poškodbe polimernih molekul in združevanje ter propadanje verig.

Nosilnost in duktilnost nekaterih polimerov se bistveno zmanjša zaradi delovanja določenih organskih snovi. Polimeri postanejo krhki, njihova površina pa razpoka zaradi lokalnih koncentracij napetosti. Tako propada polietilen, če nanj delujejo določene vrste detergentov. Odpornost polietilenov pa je večja, če so polimerne verige daljše.

Procesi propadanja polimerov v splošnem niso enaki tistim, ki povzročajo korozij kovin ali keramik. Mnogi polimeri so odporni na snovi, ki povzročajo korozijo kovin in keramik in se zato uporabljajo za njihovo zaščito v obliki primesi ali prevlek. Tako so mnogi polimeri odporni na kisline in luge ter vodne otopine soli. Pri vlaknastih kompozitih je trajnost odvisna od oprijemljivosti med vlakni in polimerno matrico. Ta oprijemljivost se lahko bistveno zmanjša če voda prodre do vlaken. S tem se znižajo tudi mehanske lastnosti kompozita.

Toplota povzroča nepovratne poškodbe primarnih molekularnih verig že v temperaturnem območju od 200 do 300°C zaradi pirolize. Piroliza ustvarja male molekularne fragmente, ki imajo obliko organske pare. Pri temperaturah blizu vžiga te organske pare iz razpadajočega se polimera ustvarjajo ugodne razmere za pojav gorenja, ki se stopnjuje do izbruha ognja. Izgorevanje polimerov sprošča strupene snovi, ki dodatno povečujejo nevarnost posledic gorenja. Nevarnost vžiga polimerov se lahko zmanjša z dodajanjem zaviralcev, ki pa ne morejo spremeniti gorljivo naravo polimerov.

Polimeri so večinoma odporni na delovanje bakterij in glivic kakor tudi na razmere v zemljinah. Izjema so polimeri, ki so sestavljeni na osnovi naravnih polimerov, kot so celuloza, naravna guma, naravna olja v alkidnih premazih itd. Na splošno polimeri hitreje propadajo zaradi ostalih vzrokov kot zaradi bioloških vplivov. Na te vplive pa so bolj občutljivi dodatki, s katerimi se modificirajo polimeri (plastifikatorji, stabilizatorji, polnila). Propadanje teh dodatkov pod vplivi bakterij in glivic je glavni razlog za biodegradacijo nekaterih polimerov, kot so polivinilkloridi (PVC).

Nekateri organski monomeri, iz katerih so sintetizirani polimeri, so strupeni in je z njimi treba ravnati izredno previdno. Po polimerizaciji je preostanek prostih monomer v večini primerov tako majhen, da ne morejo vplivati na zdravje uporabnikov. Vendar pa, če se polimeri izpostavijo visokim temperaturam, lahko nastopi delna pirolitična dekompozicija, pri kateri se sproščajo monomere in drugi strupeni hlapi.

Med strupene nepolimerizirane snovi sodijo epoksidne in poliesterske komponente termoplastov, lepil in premazov, akrilamidne snovi za stabilizacijo zemljin in formaldehidne smole za fenoplastne (PF) in urea formaldehidne (UF)

pene. Dodatno nevarnost predstavljajo nekateri dodatki za modifikacijo polimerov, ki lahko pridejo v stik s tekočo vodo in povzročijo resne težave.

OBLIKOVANJE UMETNIH MAS

Polimerizacija v proizvodnih obratih in na gradbiščih

V proizvodnih obratih ali na gradbiščih se lahko iz posameznih komponent s polimerizacijo izdelujejo gradbeni elementi ali obloge in zaščite konstrukcijskih elementov zgrajenih iz drugih materialov. Komponente se ločeno dostavijo na gradbišče v obliki tekočih smol ali viskoznih past in ene ali več reaktivnih kemičnih substanc (katalizatorji, trdilci, agensi).

Nezasičeni poliestri

Iz nezasičenih poliestrskih smol se izdelujejo kompoziti, ki se armirajo s steklenimi vlakni. Tak izdelek so lahko tudi cevi premera do 3 m. Poleg steklenih vlaken so potrebne še tri komponente: nenasičena poliesterna smola, agens (organska tekočina - stiren) in katalizator ali trdilec (organski peroksid). Poliestrska smola je običajno otopljena v stirenu in predhodno zmešana. Trdilec se dodaja v natančnem odmerku, kar sproži kontrolirano reakcijo - polimerizacijo med nenasičenim poliestrom in stirenom. Tako se nitaste molekule poliestra zamrežijo s stirenovimi molekulami v čvrsto povezano mrežo. Reakcija se lahko pospeši s toploto ali v hladnem s kobaltovo soljo.

Sušenje alkidnih premazov

Ena izmed skupin antikorozijskih premazov za jeklene konstrukcije se izvaja s kopolimerizacijo naravnih rastlinskih olj (laneno olje, na pr.) in organskih esterjev. S polimerizacijo nastanejo razvejane molekule poliestrskih smol - alkidov. Površinske alkidne prevleke se pretvorijo v trden film ob stiku s kisikom iz zraka. Ta deluje kot agens, ki povzroča nastajanje zamreženega polimera. Proces se lahko pospeši z dodajanjem majhnih količin kobaltovih soli.

Impregnacija betona s polimeri

S polimerizacijo otrdelega betona se lahko bistveno zmanjša njegova propustnost in nekoliko zviša njegova trdnost. Med najbolj primernimi monomeri je metilmetakrilat, ki ima nizko viskoznost in lahko prodira v beton ter se polimerizira ali z gama žarčenjem ali s kemičnim iniciatorjem. Ionizirajoče sevanje povzroča majhno koncentracijo reaktivnih molekul, s katerimi se začne proces širjenja polimernih verig znotraj por v betonu in s tem nastajanja trdnega polimetil metakrilata (PMMA).

Dodatki

Pri sestavljanju termoplastov in duroplastov se poleg osnovnega polimera uporabljajo tudi različni dodatki, ki v natančnih odmerkih in kombinacijah dopolnjujejo in izboljšujejo lastnosti osnovnega polimera. Osnovne vrste dodatkov so opisane v nadaljevanju.

- *Polnila* so finozrnati keramični materiali, kot so kaolin, lojevec ali kratka steklena vlakna, ki se dodajajo zaradi povečanja modula elastičnosti, trdote,

trajnosti, odpornosti na obrabo in zmanjšanja cene materiala. Polnila v določenih primerih lahko vplivajo tudi na znižanje natezne trdnosti in udarne žilavosti, zato je pri dodajanju polnil potrebno te vplive poznati. Anorganski in organski pigmenti, ki se dodajajo zaradi obarvanja polimera, na polimere podobno vlivajo kot polnila.

- *Plastifikatorji* so nepolimerne organske snovi, ki se dodajajo polimerom (večinoma PVC-jem) zaradi zmehčanja in povečanja njihove gibkosti.
- *Stabilizatorji* so organske snovi, ki se pripravijo za vsak posamezen polimer zaradi omejitve vpliva toplotne oksidacije in svetlobne oksidacije, kar povečuje odpornost polimera na staranje in propadanje.
- *Zaviralci gorenja* so organske in anorganske snovi, ki ovirajo vžig polimera z dušenjem reakcij, ki povzročajo plamen.

Z variiranjem osnovnega polimera (dolžine verig in razporeditev verig) s kopolimerizacijo, legiranjem ter z variiranjem sestavin lahko nastanejo različne vrste polimerov, ki so prilagojene določenim zahtevam.

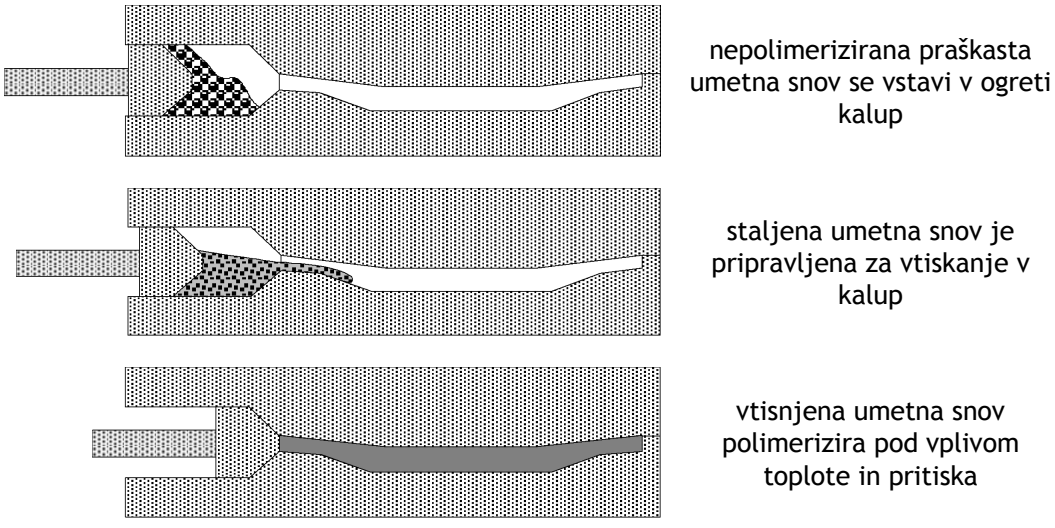
Osnovni postopki za izdelavo elementov iz umetnih mas

Lastnosti umetnih snovi, ki so narejene iz enakih umetnih smol, se lahko razlikujejo zaradi različnih dodatkov in postopkov obdelave v končni izdelek. V nadaljevanju je naštetih nekaj osnovnih postopkov za izdelavo izdelkov iz umetnih snovi. Izdelki iz termoplastov se običajno oblikujejo z iztiskanjem (ekstruzijo), injektiranjem, vpihavanjem in cenrifugiranjem v kalupih. Neojačeni duroplasti se običajno oblikujejo v kalupih pod pritiskom z vtiskanjem in injektiranjem v kalupe.

Oblikovanje v kalupih

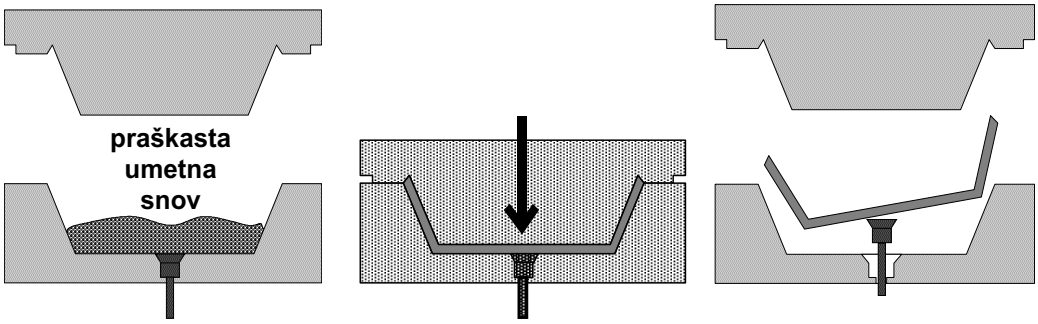
Uporabljajo se različne metode oblikovanja v kalupih, med katerimi so spodaj naštete tudi najbolj pogoste.

Oblikovanje z vtiskanjem v kalupe, kjer se s pritiskom doseže tečenje polimera v kalup, v katerem je povišan pritisk do končnega oblikovanja in ohladitve izdelka.



Slika 55: Oblikovanje z vtiskanjem v kalup

Oblikovanje pod pritiskom, kjer se iz segretega polimera pod pritiskom v kalupu oblikuje izdelek, ki se nato ohladi.



Slika 56: Oblikovanje z stiskanjem v kalupu

Oblikovanje s pritiskom zraka, kjer se votli izdelki izdelujejo z izpihavanjem v kalup na podoben način kot v steklarstvu. Na tak način se lahko hitro proizvede velika količina enakih izdelkov.

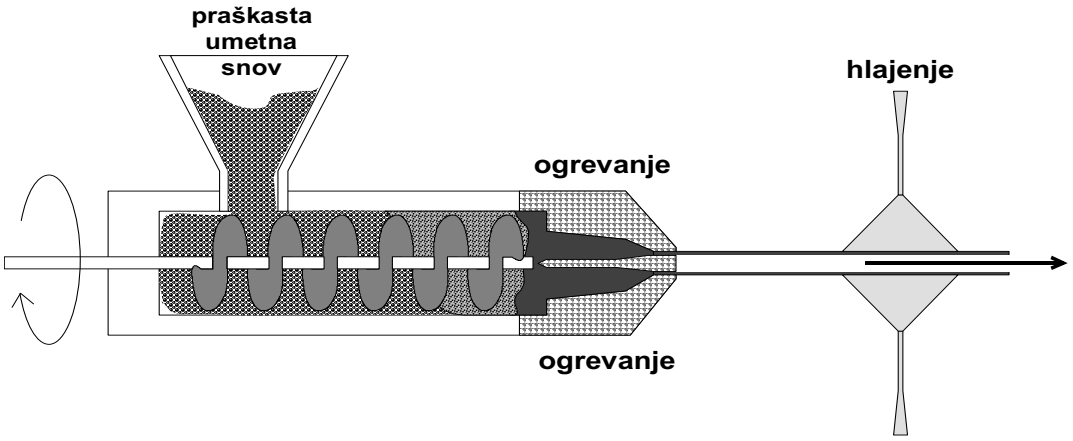


Slika 57: Oblikovanje z vpihavanjem zraka v kalup

Oblikovanje z injiciranjem v kalup, kjer se polimer pod visokim pritiskom vbrizga v kalup, kar poveča hitrost proizvodnje izdelkov.

Iztiskanje (ekstruzija)

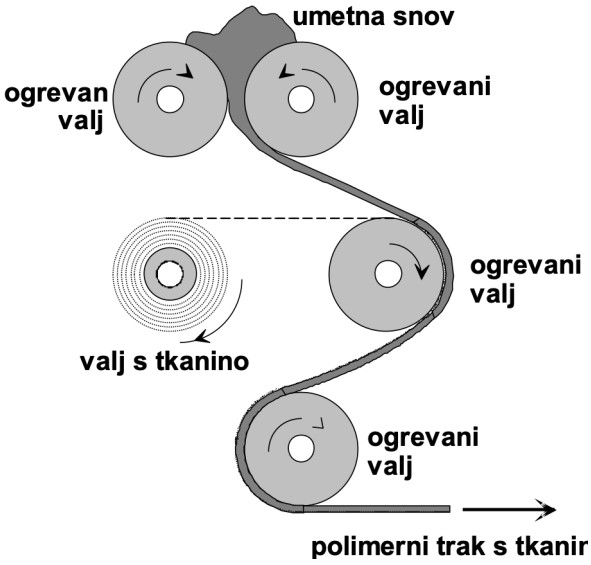
Polimeri se s pomočjo vijačnega polža iztiskujejo skozi ustnik določene oblike. Material se tako pod pritiskom oblikuje v izdelek na podoben način, kot se iztiska zobna pasta iz tube. Ko se material iztisne na prosto, se zaradi bočnih pritiskov lahko razširi in poveča obseg izdelka. Ploščati trakovi debeline nad 0,25 mm se izdelujejo z ustnikom v obliki dolge horizontalne reže. Tanjši trakovi ali folije se izdelujejo z iztiskanjem staljenega polimera skozi režo navpično preko hlajenih valjev, ki so nameščeni v hladilnem stolpu. Drugi način izdelave folije je z napihovanjem staljenega polimera v obliko tankostenske cevi, ki se po ohladitvi izravna med valji. S tem postopkom se lahko izdelujejo tudi kompoziti sestavljeni iz več vrst kompatibilnih polimerov tako, da se končni izdelek naredi s koekstruzijo (izdelava trdnejše površine z odpornejšim polimerom). Pri koekstruziji se več komor s polži združi v enem ustniku.



Slika 58: Oblikovanje polimernih izdelkov z iztiskanjem

Valjanje

Trakovi in folije se lahko izdelujejo tudi z valjanjem zmehčanega polimera med valji, kjer se trak postopno tanjša do želene debeline. Od površine valjev je odvisna kakovost in končni izgled površine traku na katero se lahko odtisnejo različni vzorci ali pa tudi vtisnejo drugi materiali (tkanina na pr.).



Slika 59: Izdelava polimernega traku kaširanega s tkanino

Vlečenje (pultruzija)

Ta postopek je patentno zaščiten in se večinoma uporablja v ZDA. Ohlajena polimerna vlakna se kontinuirano vlečejo skozi kopel iz katalizatorske smole in nato skozi ogrevane jeklene matrice, kjer se smole dokončno oblikujejo. Končni izdelek ima veliko enoosno trdnost. S tehniko hladnega vlečenja se izravnajo kristalinska območja v polimeru. S tem postopkom se lahko dosežejo tako visoke natezne trdnosti, da taki polimerni trakovi lahko ponekod zamenjajo kovinske trakove. S tem postopkom se proizvajajo tudi večplastni kompozitni trakovi in profili. Pri profilih debelejših od 3 mm se v sredino vgrajuje pletena vrvica ali mrežica kot armatura za preprečitev nastanka in širjenja razpok. Vrsta, oblika in razporeditev armature, ki je običajno iz polimernih ali steklenih

vlaken, je odvisna od oblike izdelka in predvidenih obremenitev med njegovo uporabo. Taki izdelki so primerni za uporabo v konstrukcijah tudi v gradbeništvu.

Vlivanje

Umetne mase se lahko v obliki dveh komponent (smola in trdilec) vlivajo v kalupe, v katerih se odvija polimerizacija. Drugi postopek je podoben tistemu, ki se uporablja v lončarstvu. Notranja površina ogretega kalupa se prelije z drobnimi polimernimi zrnci, ki so enakomerno vmešana v nosilno tekočino, kjer se s taljenjem polimera na notranji površini kalupa oblikuje izdelek. Postopek je možen tudi z uporabo polimernega prahu brez uporabe dodatnega medija, kot je nosilna tekočina.

Toplotno vakuumsko oblikovanje

S tem postopkom se oblikujejo izdelki iz termoplastov, ki se v obliki listov polagajo na vrh ogretega kalupa. Z vakuumom se folija povsem prisesa ob kalup in s tem se izdelek oblikuje. Debelejši izdelki se lahko oblikujejo z dodatnim pritiskom zraka. Na ta način se izdelujejo razni opaži za oblikovanje površin plošč.

UMETNE MASE V GRADBENIŠTVU

V gradbeništvu se umetne mase uporabljajo za izdelavo konstrukcijskih elementov, izdelkov, veziv, polnil in premazov. Uporabni so tako v visokogradnjah kot pri prometnicah in hidrogradbenih objektih.

Na področju visokogradenj se pogosto uporabljajo za izdelavo elementov na področju:

- *inštalacij* - vodovod, plinovod, kanalizacija, drenaža, ventilacija, električni in ostali elementi,
- *hidroizolacij* - membrane in vodne zapore, hidroizolacijski trakovi,
- *termoizolacij* - obložni paneli, zapolnitve stikov s penami, izolacije cevi,
- *akustičnih izolacij* - izolacije pred udarci in vibracijami, absorberji zvoka,
- *svetlobnih izolacij* - zasloni, elementi stavbnega pohištva,
- *nekonstrukcijskih elementov* - predelne stene, talne, stropne in strešne plošče,
- *stavbnega pohištva* - okenska in vratna krila, okvirji, tečaji,
- *sestojin kompozitov* - modificirane malte in betoni ter leseni elementi, mikroarmatura in polimerni agregati, aditivi,
- *prevlek in premazov* - barve, laki, tesnila, lepila, zaščitne prevleke pritrjene z lepili, folije, zaščita stekel pred soncem,
- *ponjav in membran* - pnevmatične konstrukcije, krovne konstrukcije, talne izolacije.

Na področju cestogradenj se poleg v izolativne namene polimeri uporabljajo kot bitumenska in asfaltna veziva ter za modifikacijo teh veziv z vlakni ali polimernimi aditivi. Nemogoče je našteti vsa področja uporabe polimerov v gradbeništvu, saj se to področje vsakodnevno širi v povezavi z razvojem novih vrst polimerov ali njihovih aplikacij. Posebno je treba poudariti njihovo vlogo

pri sanacijah in ojačitvah ter vzdrževanju zgrajenih objektov. Pri tem pa je nujna posebna pozornost in upoštevanje lastnosti polimerov, ki se časovno spreminjajo in lahko zato tudi negativno vplivajo na osnovno konstrukcijo ali druge elemente zgradbe.

Konstrukcijske umetne mase

Neojačene umetne mase niso primerne za velike konstrukcijske elemente razen za cevi, ker njihova togost in nosilnost običajno ni zadostna. PMMA, PVC in PC se uporabljajo v obliki elementov, ki niso močno obremenjeni (krovne plošče, predelne stene, stropne obloge). Njihova togost se poveča z rebri, ki so izdelana z vakumiranjem ali dodana na kak drug način. Zahtevni profili iz termoplastov se izdelujejo z iztiskanjem ali vlivanjem za zelo različne namene od okenskih profilov do distančnikov za armaturo.

Za konstrukcijske namene so veliko bolj uporabni z vlakni armirane umetne mase. Uporabljajo se za izdelavo cistern, konstrukcijskih panelov, večjih kanalizacijskih elementov itd. Paneli se najpogosteje izdelujejo v obliki "sandwichev" - jedri iz polimernih pen. Pri vseh konstrukcijskih elementih največji problem predstavlja njihova požarna varnost.

Veliki del polimernih materialov armiranih z vlakni obsegajo kompoziti, pri katerih je matrica iz epoksidnih smol (EP) ali nezasičenih poliestrov (UP), polnilo pa iz steklenih vlaken. Polimerna matrica ščiti površino vlaken pred mehanskimi poškodbami, dobra sprijemnost med vlakni in polimeri omogoča prenos obremenitev z matrice na vlakna, vlakna pa zagotavljajo visoko trdnost, žilavost in togost materiala. Taki materiali so odporni tudi na elektrokemično korozijo, katera povzroča propadanje kovinskih materialov.

Postopki za izdelavo elementov iz polimernih kompozitov s steklenimi vlakni so dokaj enostavni. Steklena vlakna se lahko dodajajo kot dolge ali kratke niti, mreže, tkanine in v drugih primernih oblikah. Najenostavnejši postopek je ročno nanašanje polimernih smol na plasti steklenih vlaken ali mešanje in vlivanje zmesi polimernih smol in narezanih vlaken. Možno je tudi nanašanje zmesi z brizganjem na matrico (korita čolnov). Primerni so tudi nekateri postopki, ki se sicer uporabljajo za oblikovanje izdelkov iz nearmiranih polimerov (ekstruzija, pultruzija, injektiranje v kalupe). Poleg steklenih vlaken se uporabljajo tudi druge vrste vlaken, med katerimi so tudi polimerna vlakna. Karbonska vlakna, ki se proizvajajo z obdelavo poliakrilonitrila (PAN) na visokih temperaturah, imajo izredne mehanske lastnosti in so izredno kompatibilna z epoksidnimi smolami. Druga vrst zelo trdnih polimernih vlaken so aramidna vlakna (aromatični poliamid).

Steklena vlakna se lahko uporabijo tudi za ojačitev termoplastov. Iz politetrafluoretilena (PTFE) se izdelujejo prožne plošče visoke kakovosti in odpornosti, ki se uporabljajo za pnevmatične konstrukcije in konstrukcijske elemente izpostavljene nateznim obremenitvam.

Cevi

Umetne mase se na veliko uporabljajo za cevovode pretok vode in plina, drenaže, industrijske odplake in kanalizacijo. Najpogosteje se uporabljajo termoplasti HDPE in PVC, za določene namene pa tudi LDPE, PP, ABS in

polibutilen. Cevi iz duroplastov se armirajo z vlakni (poliestri s stekleno armaturo), lahko pa se izdelujejo tudi iz armiranih poliesterskih malt, ki vsebujejo siliko ali druge vrste polnil. Cevi za bolj zahtevne namene imajo večplastno zgradbo, tako da ima vsaka plast določeno vlogo (nosilnost, zaščita, termalna izolacija, obrabna odpornost). Cevi se izdelujejo iz materialov, ki so odporni na vplive kemikalij in na propadanje zaradi različnih vplivov snovi v zemljinah. Cevi so lahke in se enostavno vodotesno in plinotesno sestavljajo. Stiki se lahko tesnijo s toplotnim varjenjem, s tesnilnimi obroči iz elastoplastov ali s premazi iz umetnih smol.

Polimeri se uporabljajo tudi za protikorozijsko izolacijo cevi iz drugih vrst materialov (kovin, keramik), njihovo stikovanje in sanacijo obstoječih cevovodov ali odtokov industrijskih odplak in kanalizacij.

Polimerne cevi so nekoliko bolj podajne od kovinskih in keramičnih ter bolj podvržene razvoju stalnih plastičnih deformacij zaradi tečenja polimernega materiala. Te lastnosti se morajo upoštevati pri načrtovanju in dimenzioniranju posameznih elementov cevovoda (cevi, stikov, izpustov in jaškov).

Večina poškodb cevovodov nastaja na stikih, vendar so znani tudi primeri termalne oksidacije, vključkov v polimerni substanci in lomov zaradi mehanskih obremenitev, ki so nastali zaradi neustrezne priprave podlage.

Membrane

Nepropustne membrane se že dolgo uporabljajo pri izgradnji objektov za različne namene. Njihov osnovni namen je preprečevanje kapilarnega pretoka vode v zidovih in ploščah. Folije se uporabljajo tudi za hidroizolacijo rezervoarjev, kanalov, industrijskih deponij in komunalnih odlagališč, strešnih konstrukcij in povsod tam, kjer se zahteva velika fleksibilnost, ustrezna trdnost, obrabna odpornost in trajnost nepropustnih materialov.

Zelo razširjena je uporaba polimernih membran pri geotehničnih delih, kjer se uporabljajo kot stabilizatorji in shranjevalniki zemljin, ločilci posameznih plasti zemljin in kot drenažni in filtrirni sloji. Tkanine, ki se uporabljajo za filtriranje in drenažo imajo natančno določene mehanske lastnosti in propustnost. Tovrstne tkanine se uporabljajo tudi za ločevanje nosilnega sloja in gramozne posteljice pri železniških progah in ločitev plasti v cestogradnji. Drenažne plasti se uporabljajo v tudi kombinaciji s polimernimi drenažnimi cevmi. Pri geotehničnih delih se največkrat uporabljajo naslednji polimeri: PP, PP/PVC, PP/PA in poliesterske gobaste pene.

Med termoplasti sta v obliki folij najbolj zastopana PE in PVC. Pod zemljo se PE lahko poškoduje le zaradi mehanskih vplivov (pritiskanje ob ostre robove, preboji, ki jih naredijo živali, žuželke ali rastline) in ne zaradi ostalih bioloških vplivov (bakterije, glivice). Na odprtem folije propadajo zaradi sončnega sevanja in fotooksidacije. Membrane, ki se uporabljajo v gradbeništvu, so lahko izdelane tudi iz elastoplastov in so na splošno debelejše ter trdnejše od PE in PVC folij. Nekatere elastomerne membrane imajo kompozitno zgradbo; ojačene so z različnimi polimernimi ali anorganskimi tkaninami. Folije in membrane se medsebojno nepropustno povezujejo s toplotnim ali kemičnim varjenjem.

Nepropustne membrane se izdelujejo z iztiskanjem, vpihavanjem in valjanjem iz različnih vrst polimerov (PE, PVC). Polimerne membrane so lahko enoplastne,

večplastne ali pa ojačene z različnimi vlakni in tkaninami polimerne ali anorganske sestave.

Propustne membrane sestavljajo polimeri v obliki dolgih vlaken, ki se pletejo v različne tkanine. Mrežaste tkanine imajo veliko nosilnost v smeri vlaken, zato se ta prepletajo glede na predvidene obremenitve materiala med njegovo uporabo. Polimeri se pletejo tudi v mreže z velikimi okni ali pa v mrežaste strukture, ki so na vozliščih zvarjene. Polimer v takih oblikah se uporablja za izvedbo različnih ojačitev materialov od oblog v visokogradnji (Demit fasade, mavčne plošče, bandažiranje fug pri mavčnih ploščah) do utrditve zemljišč v cestogradnji (ukopi, nasipi).

Polimerne ponjave

Polimerne ponjave so primerne za stalno ali začasno pokrivanje velikih prostorov na odprtem v obliki šotorastih ali pnevmatskih konstrukcij. Močne ponjave so narejene iz PTFE in tkanin iz steklenih vlaken ter lahko trajajo tudi do 20 let, ker je PTFE izredno odporen na vremenske vplive. Manj odporni a cenejši poliestri prekriti s PVC so primerni za časovno bolj omejene namene.

Nosilno osnovo trajnih ponjav tvorijo tkanine stkane iz steklenih niti. Vsaka nit je sukana iz približno 200 vlaken debeline do 4μm. Plast PTFE, ki zagotavlja nepropustnost in sodeluje pri prenašanju obremenitev ponjave, je debela od 0,8 do 1 mm ter ima maso od 1,25 do 1,5 kg/m^2. Trdnost in deformabilnost ponjav je odvisna od načina tkanja osnovne tkanine. Računske obremenitve vzdolž vlaken pri takih ponjavah lahko znašajo do 140 MPa, kar znaša okoli 15% njihove natezne trdnosti. Osnovna tkanina, ki je narejena iz anorganskega stekla, vpliva tudi na zvišanje požarne odpornosti kompozitne ponjave.

Premazi

Večina polimerov se ne raztaplja v vodi. Polimeri se zato modificirajo in kombinirajo z organskimi topili ter tako nanašajo na različne površine kot pigmentirani ali prozorni zaščitni premazi. Druga vrsta tekočih polimerov se uporablja v obliki raznih lepil, ki služijo za izdelavo kompozitnih lameliranih struktur. Topila so večinoma vnetljiva, kar narekuje pazljivo ravnanje s tekočimi polimeri. Zato se mnogi tekoči polimerni premazi izdelujejo kot emulzije v vodi, ki niso otopine, temveč so disperzije zelo drobnih polimernih delcev (premera okoli 1μm). Emulzije vsebujejo od 50 do 60% polimerov in se stabilizirajo z posebnimi dodatki. Ena izmed razširjenih emulzij je latex, ki se uporablja za površinske zaščite kot sestavni del mnogih lepil in kot modifikator keramičnih materialov iz portland cementa (betoni, malte, ometi). V emulzijah se najpogosteje uporabljajo polivinilacetat (PVAC) in njegovi kopolimeri, naravne in umetne gume ter akrilni polimeri (PMMA).

Polimerni površinski premazi ščitijo kovinske in keramične materiale pred vplivi okolja, ki povzročajo korozijo materiala. Pri jeklenih konstrukcijah se uporabljajo alkidni premazi na osnovi naravnih polimerov (rastlinskih olj), epoksidni premazi in barve na osnovi klorirane gume. Vsi barvasti premazi so mešanice polimernega veziva in trdnih delcev - pigmenta. Pigmenti delujejo kot polnila in s tem izboljšajo mehanske lastnosti premazov. Pigmenti poleg tega, da premazu dajejo barvitost in motnost, delujejo tudi kot zaščita polimerne matrice pred fotooksidacijo in s tem izboljšajo odpornost premazov

na atmosferske vplive. Določeni pigmenti ovirajo korozijske procese. Kovinski pigmenti (cink) elektrokemično delujejo na jekleno površino in jo korozijsko ščitijo. Nepigmentirani premazi (epoksidne smole) ščitijo betonsko armaturo v armiranobetonskih konstrukcijah, ki so izpostavljene agresivnemu okolju.

Lepila

V industriji se uporablja nekaj tisoč vrst polimernih lepil. V gradbeništvu se največ uporabljajo lepila na osnovi epoksidnih smol in lepila primerna za les ter gradiva lesnega porekla. Pri izbiri lepil je potrebno natančno poznati namen lepljenja in obremenitve, ki jih bo prenašal lepljeni stik. Pri tem se je treba zavedati, da ne obstaja univerzalno lepilo, ki bi bilo primerno za vse primere.

Pri izbiri lepila je treba upoštevati lastnosti osnovnih materialov in eventualni vpliv materialov, ki tvorijo lepilo. Poseben problem lahko predstavljajo topila, ki jih vsebuje lepilo, in ki lahko negativno delujejo na osnovni material (primer: acetonska lepila niso primerna za lepljenje polistirenskih plošč). Lepila lahko v določenem povzročijo ali pospešijo korozijo osnovnega materiala. Pri lepljenju je treba upoštevati kompatibilnost materialov.

Epoksidna lepila se lahko pripravijo v različnih razmerjih in vsebnostjo različnih dodatkov. Od tega so odvisni časi negovanja in strjevanja, viskoznost ter sposobnost zalivanja. Dobavljajo se v dveh ločenih komponentah (prepolimer in aktivator- katalizator), ki se pred uporabo zmešata v natančno določenem razmerju in pri ustrezni temperaturi. Določeni epoksidi so kompatibilni s svežimi portland cementnimi materiali (maltami, betoni). Zato se lahko dispergirani v vodi pomešajo s svežo cementno malto in s tem ustvarijo s polimeri modificirano anorgansko, keramično gradivo. Taki materiali se s pridom uporabljajo pri zaščitni obdelavi površin, stikov in pri popravilu konstrukcijskih elementov.

Večina visokotrdnih trajnih lepil za les sodi v skupino fenolnih ali amino formaldehidnih smol (duroplasti). Poleg teh se uporabljajo tudi polivinilacetatna (PVAC) lepila povsod tam, kjer se ne zahteva odpornost na vplive vode.

Polimerni in s polimeri modificirani betoni

Polimeri se lahko kombinirajo z betoni na različne načine, njihov namen pa je modifikacija lastnosti betona. Predvsem se s polimeri zvišujejo mehanske lastnosti betona, zmanjšuje se propustnost in s tem povečuje trajnost. Pri s polimeri impregniranih betonih se polimeri uporabljajo po strjevanju betona. Pri polimer cementnih betonih pa se polimeri (emulzije, disperzije monomerov, disperzije smolastih trdilcev) dodajo svežemu betonu in tako sodelujejo v procesu hidratizacije.

S polimeri impregnirani betoni imajo boljše lastnosti od običajnih betonov, ker se sistemi por zapolnijo s polimerno impregnacijo. Proizvodnja takih betonov je zahtevnejša zaradi potrebne opreme, zato še niso v zelo široki uporabi. Polimer cementni betoni imajo manjšo propustnost in v določenih primerih tudi višjo trdnost. Polimeri vplivajo na lastnosti sveže betonske mešanice zlasti pa na konsistenco in sprijemnost z otrdelim betonom. Primerni so za gradnjo pod

vodo, industrijske tlake, popravilo starih poškodovanih betonov (marine) in za zapolnjevanje votlin.

Polimeri se betonom in maltam dodajajo tudi v obliki mikrovlaken (polipropilenska vlakna - PP), ki zvišujejo žilavost betona. Raziskujejo se tudi možnosti uporabe karbonskih vlaken za armiranje betona. Polimerni dodatki (melamin formaldehidne smole - MF) služijo tudi za povečanje plastičnosti in s tem vgradljivost betona (superplastifikatorji).

Polimerne pene in celičasti izdelki

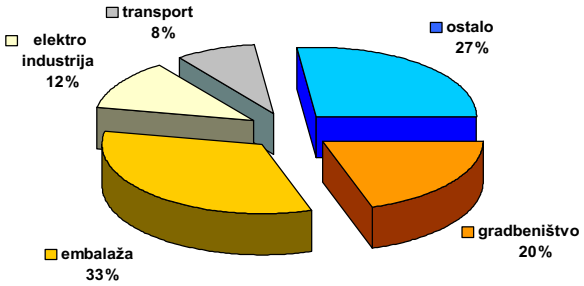
Z ustvarjanjem votličaste strukture polimerov se lahko dobijo tako togi kot podajni izdelki. Ti se lahko obravnavajo kot kompoziti, v katerih je dodani material zrak ali neki drugi plin. Zrak se lahko vnaša z mešanjem v tekoč polimer ali z kemičnimi reagensi, ki ustvarjajo plinaste mehurčke. Na tak način se izdelujejo izolativni materiali kakor tudi nosilne, trde konstrukcijske pene. Te so lahko sestavni del nosilnih panelov s kovinskimi ali polimernimi ploščami na obeh površinah polimernih pen ("sandwich" konstrukcije). Penaste gume se veliko uporabljajo pri izdelavi oblazinjenega pohištva, kot tudi stisljiva tesnila v gradbeništvu in sestavni deli zvočnih izolacij. Celičasti polimeri imajo izredne toplotno izolativne lastnosti in zelo nizko gostoto (tudi 10 kg/m^3).

RECIKLIRANJE IZDELKOV IN ODPADKOV IZ UMETNIH MAS

Med odpadke sodijo vsi tisti izdelki ali njihovi ostanki, ki niso več uporabni in jih ponavadi zavržemo na deponije. Nekaj plastičnih izdelkov sodi med odpadke, toda veliko se jih da ponovno vrniti v uporabo z različnimi postopki reciklaže. Na sliki 60 so prikazani približni deleži uporabe polimernih

materialov, kjer pa niso upoštevani bitumenski polimeri. Med polimernimi materiali, ki so v uporabi, imajo izdelki, ki so nastali z recikliranjem plastike pomemben delež. Predvidena življenjska doba polimernih izdelkov, ki se uporabljajo v gradbeništvu, elektro industriji, prometu in v nekaterih ostalih panogah (skupaj okoli 65% vseh izdelkov), je nad 8 let. Predvidena doba 15% polimernih izdelkov je od 1 do 8 let in okoli 20% polimernih izdelkov se uporablja do 1 leta starosti.

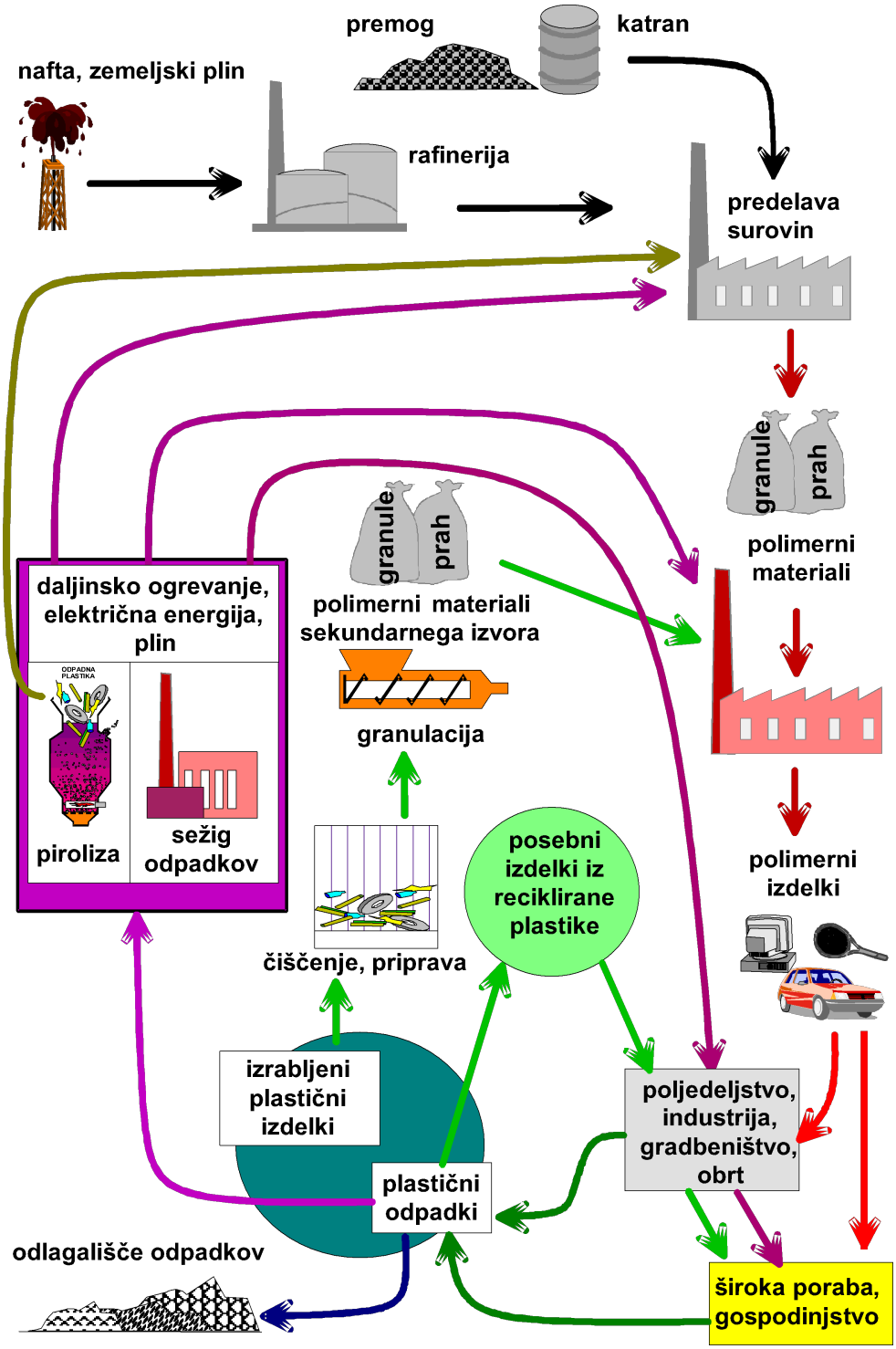
Ne glede na trajnost uporabe se soočamo s problemom izrabljene in odpadne plastike, ki je zaključila svojo življenjsko dobo v določeni obliki. Pri izdelavi polimerov iz primarnih surovin se soočamo z omejeno količino le-teh, problemi z uporabo energije in onesnaženja okolja. To je ogroženo zlasti, ko gre za odlaganje polimernih odpadkov, katerih čas razgradnje v naravi je izredno dolg, število primernih odlagališč pa je vse bolj omejeno. Polimerni ostanki in odpad nastajajo v njihovem celotnem življenjskem ciklusu.



Slika 60: Razmerje uporabe umetnih mas

Sodobna proizvodnja izdelkov iz umetnih mas in njihova uporaba je vse bolj povezana s skrbjo za njihovo reciklažo tako pri izbiri primernih polimerov kot pri oblikovanju izdelkov. Poleg odlaganja odpadkov na deponije sta se uveljavili dve možnosti ekološko bolj upravičene uporabe polimernih odpadkov. Prva je uporaba primernih vrst odpadkov za pridobivanje energije s postopki, kot so sežig odpadkov in piroliza izdelkov iz plastike. Druga možnost je ponovno vračanje odpadnih polimernih materialov v življenje v obliki različnih izdelkov. Pri slednji se sprošča tudi energija, ki se lahko koristno uporabi.

Na sliki 61 sta prikazani obe možnosti ponovne uporabe iztrošenih izdelkov iz polimerov in odpadkov. "Energetska reciklaža" in vračanje polimerov v življenjski krog sta nekoliko bolj podrobno obravnavani v nadaljevanju.

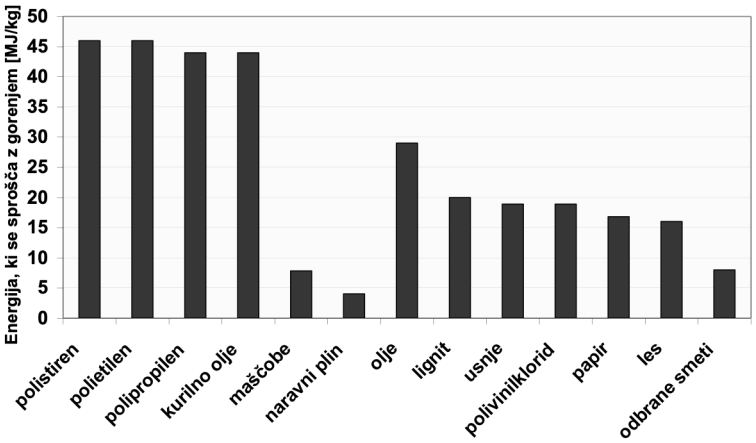


Slika 61: Pridobivanje polimernih materialov iz osnovnih virov in iz polimernih odpadkov

Pridobivanje energije iz polimernih odpadkov

V razvitih deželah je pridobivanje enegije s sežigom odpadkom že utečen postopek. Med prebranimi smetmi, ki vsebujejo tekstil, papir, organske ostanke, steklo, kovine so plastike zastopane v deležu do 15%. Na sliki 62 je prikazana primerjava energije, ki se sprosti z izgorevanjem različnih materialov. Nekateri polimerni materiali imajo glede na svojo maso zelo visoko

energijsko vrednost. V Franciji na primer s sežigom 500.000 ton odpadkov pridobijo energijo, ki je enaka energiji izgorevanja 400.000 ton kurilnega olja.



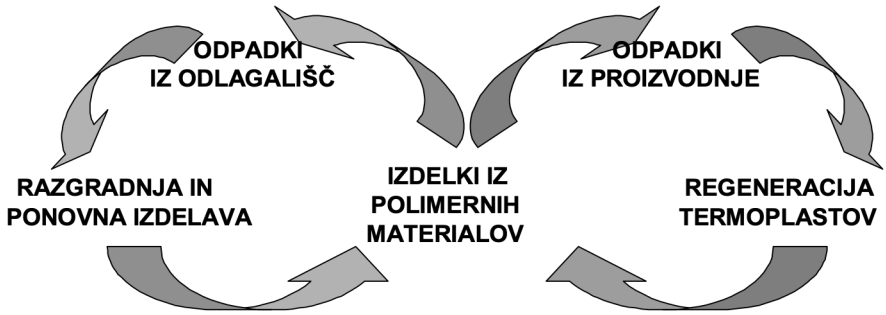
Slika 62: Primerjava energije, ki se sprošča pri gorenju različnih snovi

Pri sežigu nekaterih polimerov se sproščajo tudi škodljive snovi. Tako pri sežigu polivinilklorida (PVC) nastaja klorovodikova kislina (HCl), ki količinsko predstavlja polovico celotne količine, ki se sprošča s sežigom drugih odpadkov. Zato so sestavni del sežigalnih naprav tudi naprave za izločanje škodljivih snovi in plinov, ki so v nekaterih primerih stranski izdelki sežiga odpadkov.

Vračanje umetnih mas v življenjski krog

Reintegracija odpadkov v materiale, ki se lahko vključijo v nov življenjski krog različnih izdelkov obsega vrsto zahtevnih tehnoloških postopkov. Tudi pri najenostavnejšem sežiganju odpadkov sta potrebni vsaj dve fazi dela: razvrščanje odpadkov na tiste, ki se sežgejo in na tiste, ki se lahko uporabijo za reciklažo. Slednje je treba očistiti in primerno obdelati pred postopki recikliranja. Reciklaža je sama po sebi neekonomična, ker so cene osnovnih surovin za izdelavo polimerov nižje od surovin pridobljenih z recikliranjem. Vendar pri tem ne smemo zanemariti ekološkega vidika problema odlaganja odpadkov iz polimernih materialov, ki imajo poleg počasnega naravnega razkrajanja tudi razmeroma veliko prostornino. S sodobnimi tehnologijami predelave polimernih odpadkov se skuša povečati ekonomičnost postopkov in s tem tudi večjo proizvodnja izdelkov iz reciklirane plastike.

Na sliki 63 sta shematično prikazani dve vrsti recikliranja polimernih materialov. Desni krog predstavlja tradicionalno reciklažo termoplastov. Produkt take reciklaže so lahko vhodne surovine za izdelavo novih polimernih izdelkov ali pa sami izdelki iz neposredno reciklirane odpadne plastike. Surovina za take izdelke so prebrani odpadki, ki jih večinoma sestavljajo polimerni materiali. Mešanica različnih polimernih odpadkov, med katerimi pa so tudi manjše količine papirja, lesa, kovin in drugih trdnih snovi, se segreva do temperature 140°C - 180°C. Tako dobljena viskozna pasta se s postopkom iztiskanja (ekstruzija) oblikuje v različne izdelke, ki so odporni na atmosferske vplive in mehanske obremenitve (elementi za otroška igrišča, elementi ograj, vrtne klopi, zabojniki).

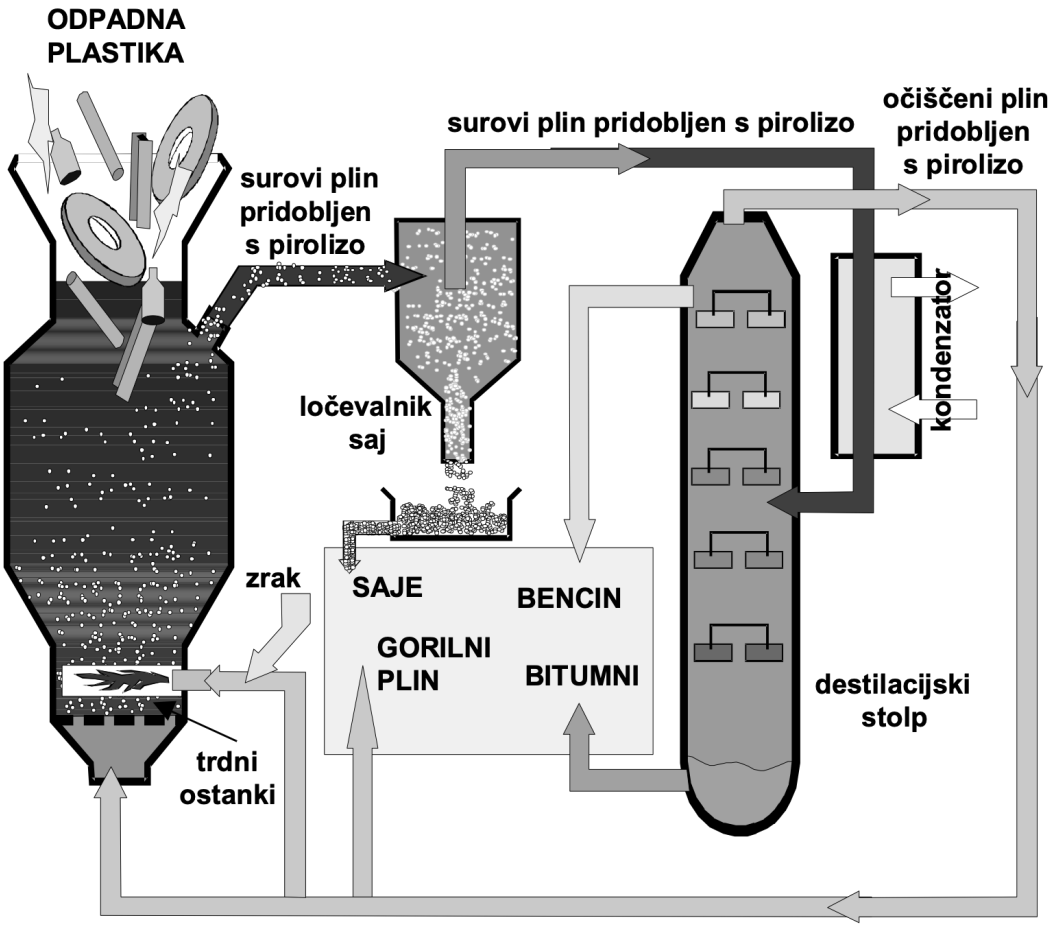


Slika 63: Shematični prikaz recikliranja umetnih mas

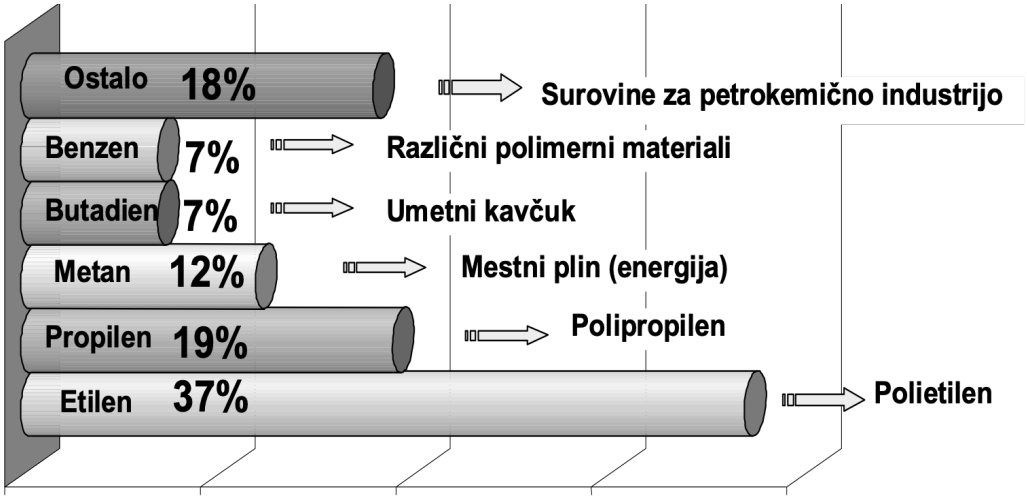
Levi krog predstavlja sodobnejše postopke reciklaže, kjer se polimeri razgrajujejo na osnovne kemične spojine, iz katerih se nato lahko ponovno sestavijo. Značilna postopka, s katerima se razgrajujejo polimerni materiali v surovine za izdelavo novih polimerov, sta ***hidroliza*** in ***piroliza***.

Hidroliza (ločevanje s pomočjo vode) je postopek pri katerem se s pomočjo vodne pare z visokim pritiskom in visoko temperaturo razgrajujejo polimeri na osnovne komponente. Primerna je za razgradnjo poliuretanskih pen, ki se nato ponovno sestavljajo iz komponent dobljenih s hidrolizo. Tako proizvedene poliuretanske pene se veliko uporabljajo v avtomobilski industriji.

Piroliza (ločevanje s pomočjo ognja) je postopek pri kateremu se termično pri temperaturah od 400°C do 800°C brez prisotnosti kisika polimeri razgrajujejo na osnovne komponente (slika 9-14). Poleg surovin za izdelavo polimerov in drugih izdelkov petrokemične industrije se s pirolizo dobijo tudi velike količine zelo čistega gorilnega plina, ki se pomešan z zemeljskim plinom uporablja v gospodinjstvih. S pirolizo se lahko predelujejo plastični odpadki, ki vsebujejo tudi do 20% drugih primesi in materialov, zato je ta postopek idealen za predelavo odpadkov bogatih s plastiko. Za pirolizo je idealna mešanica polietilena, polipropilena in polistirena v razmerju 3:1:1, iz katere se lahko dobi od 40 do 60% mešanice plinov (metan, etan, etilen, propilen) in do 50% tekočin (lahki bencini in bitumni). Vrednost produktov pirolize (slika 9-15) presega vrednost energije, ki se pridobi s sežigom odpadkov. Postopek pirolize se šele vpeljuje v prakso. V Evropi je že postavljen obrat, ki lahko s pirolizo predela 10.000 ton plastike na leto. Vendar pa je poslovanje takih obratov še na robu rentabilnosti zaradi nizkih cen nafte na svetovnem trgu.



Slika 64: Shematični prikaz pirolize plastičnih odpadkov



Slika 65: Delež in uporabnost različnih produktov pirolize

VPRAŠANJA

1. Kaj so to polimeri in kako jih razvrščamo po njihovem nastanku?
2. Pojasnite proces polimerizacije.
3. Pojasnite razliko med termoplasti in duroplasti, ter še posebej lastnosti elastoplastov.
4. Kako razvrščamo polimere glede na medsebojno razmerje polimernih verig v zamreženi strukturi?
5. Pojasnite, od česa so odvisne mehanske lastnosti različnih polimerov. Kaj je značilno za kristalinske polimere in kaj za elastoplaste?
6. Kako na mehanske lastnosti vpliva hitrost in stalnost obremenite in kako temperatura okolja?
7. Pojasnite, kaj vse vpliva na trajnost oziroma korozijo polimerov. Naštejte načine njihovega propadanja in vzroke za propadanje.
8. Naštejte in na kratko opišite tri primere polimerizacije v proizvodnih obratih in na gradbiščih.
9. Pojasnite, kakšna je vloga dodatkov k osnovnim polimerom. Naštejte vrste dodatkov in pojasnite njihovo vlogo.
10. Naštejte in na kratko opišite načine oblikovanja polimerov v kalupih.
11. Pojasnite razliko med oblikovanjem polimernih izdelkov z iztiskanjem in valjanjem.
12. Pojasnite postopek vlečenja, vlivanja in toplotnega vakumskega oblikovanja polimerov.
13. Naštejte področja uporabe polimerov v gradbeništvu.
14. Navedite in opišite primere uporabe polimerov za konstrukcijske elemente.
15. Kako in zakaj se polimeri uporabljajo za izdelavo cevi?
16. Pojasnite razliko med polimernimi membranami in ponjavami ter opišite njihove značilnosti.
17. Opišite uporabo polimerov za premaze.
18. Navedite, zakaj se polimeri lahko uporabljajo za izdelavo lepil.
19. Kako se polimeri uporabljajo za spreminjanje lastnosti betona in cementnih malt?
20. Pojasnite postopek reciklaže polimerov s hidrolizo in pirolizo.

10

OGLJIKOVODIKOVI MATERIALI

UVOD

Ogljikovodikovi materiali sodijo med polimerna gradiva, ki se podobno kot les v naravi nahajajo v obliki, ki je neposredno uporabna v graditeljstvu. Odlikuje jih velika trajnost in sprijemnost. Uporabljali so jih že v mezopotamskih kulturah 3000 let pr. n.š. za izolacijo vodohranov in za podobne namene. Njihovo trajnost dokazuje tudi sodobna uporaba vodohranov, ki se uporabljajo v izvirni obliki že več kot 2000 let. Naravni bitumni v neprečiščeni sestavi se še vedno uporabljajo v manj razvitih deželah vendar v celoti prevladujejo rafinirani bitumni, ki se pridobivajo iz naravnih bitumnov ali kot stranski produkt v naftni industriji. Pri obravnavi ogljikovodikovih materialov ločimo sledeče pojme:

- ***ogljikovodikovo vezivo*** je material, ki povezuje trdne delce in je sestavljen iz ene ali več vrst bitumnov ali katranov,
- ***bitumen*** je viskozna tekočina ali trdna snov, ki se sestoji v glavnem iz ogljikovodikov in drugih organskih snovi; topljiv je v ogljikovem disulfidu, je nehlapljiv in se zvezno mehča pri segrevanju, je rjave ali črne barve in je zelo lepljiv in vodonepropusten. Bitumen se pridobiva z rafiniranjem nafte ali iz naravnih nahajališč. V naravi se nahaja v razmeroma čisti sestavi ali pa v naravnih asfaltih, kjer je pomešan s kameninami in drugimi delci.
- ***katran*** je viskozna tekočina črne barve, ki ima veliko sprijemnost. Pridobiva se s suho destilacijo premoga, lesa ali bitumenskih skriljevcev.
- ***asfaltni cement*** je bitumensko vezivo, mešanica naravnega asfalta in bitumna ali naravnega asfalta in organskih olj, ki povezuje mineralni agregat v trdno asfaltno mešanico,
- ***asfalt*** je mešanica asfaltnega cementa in mineralnega agregata.

OGLJIKOVODIKOVA VEZIVA

Vsa ogljikovodikova veziva imajo nekaj skupnih lastnosti: so vodoodporna in vodonepropustna, odporna na vremenske vplive, lepljiva in razmeroma poceni ter so na voljo v velikih količinah.

Osnovne kemične lastnosti

Ogljikovodikova veziva so v kemičnem smislu zelo kompleksna. Katran je sestavljen iz več kot 10.000 sestojin in le manjši del teh se da ločiti. Posamezne vrste bitumnov in katranov se med seboj razlikujejo po topljivosti v različnih organskih topilih. Katrani se topijo v benzenu, n-heksanu in piridinu ter se ločujejo na sestavine s frakcijsko destilacijo. Razgrajujejo se v ogljikovem disulfidu (CS_2) in kloroformu. V bitumnih se poleg približno 80%

ogljika nahajajo še vodik (približno 10%), žveplo (približno 6%), dušik ter kisik (oba približno 1%). Bitumni se glede na topljivost delijo v tri skupine:

- *karbene*, ki so frakcije netopljive v ogljikovem tetrakloridu,
- *asfaltene*, ki so frakcije netopljive v lahkih alifatskih organskih topilih, kot so petrolej in eter, in
- *maltene*, ki so frakcije topljive v lahkih alifatskih organskih topilih.

Katrani

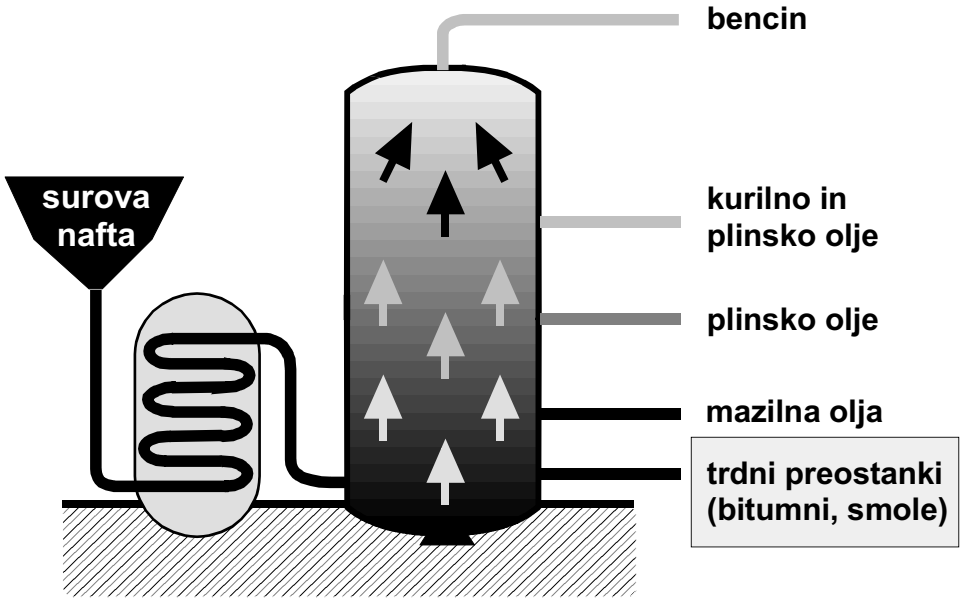
Katrani se pridobivajo s suho destilacijo premoga, lesa, bitumenskih skriljev itd. Uporabljajo se v deželah, kjer je pridobivanje katrana iz lastnih zalog premoga ekonomično. Pri suhi destilaciji premoga se pridobivajo različne vrste olj, ki imajo različne temperature izparevanja. Ostanek destilacije je trda in poltrdna snov. Ta snov je pretrda za neposredno uporabo in se zato meša z olji v različnih razmerjih glede na namen uporabe. Za gradbene namene se uporabljajo manj hlapljiva olja. Na kemične lastnosti katrana vpliva tudi postopek pridobivanja katrana. Najbolj trajni so katrani, ki jih pridobivajo v vodoravnih retortah. Trajnost katrana je odvisna od sprememb njegovih lastnosti zaradi vremenskih vplivov, ki se kažejo kot povečanje površinske trdote in togosti. V notranjosti katran obdrži prvotne lastnosti, če se otrdela površinska plast ne poškoduje ali odstrani. Katrani in bitumni vsebujejo snovi, ki ovirajo rast bioorganizmov, kar pomeni, da rastline ne morejo rasti na njih brez prisotnosti zemlje.

Bitumni

Vse vrste bitumnov se pridobivajo z destilacijo surove nafte. Ta proces pod določenimi pogoji lahko poteka tudi v naravi, kar dokazujejo nahajališča naravnega bitumna in bitumenskih skriljevcev.

Destilacija nafte poteka v več fazah (slika 10-1). Najprej se iz segrete surove nafte v okolju pod atmosferskim pritiskom izločijo alkoholi in lahka olja. Ostanek se segreva in destilira v vakuumu. Pri tem se izločajo plini in olja, ostanejo pa smole in bitumni, ki so neposredno uporabni v cestogradnji. Bitumni in smole se nato s spreminjanjem temperature in ostalih pogojev lahko dalje frakcionirajo in s tem ločijo po lastnostih.

V večini rafinerij se proizvajata dve vrsti bitumnov: mehki in trdi ("pitch"). Vmesne vrste se pridobivajo z njihovim mešanjem v različnih razmerjih, pri tem pa se uporabljajo tudi lažja olja za proizvodnjo manj viskoznih mešanic bitumna.



Slika 66: Shematski prikaz destilacije surove nafte

Z nadaljnjo predelavo bitumnov se pridobivajo *oksidirani* in *trdni* bitumni za industrijsko rabo. Pri predelavi se vpihuje kisik skozi segret bitumen v vakuumu, kar povzroča medsebojno zamreženje dolgih, nitastih ogljikovodikovih molekul. S tem postanejo bitumni bolj togi in manj občutljivi na temperaturne spremembe.

Po kemični sestavi so bitumni podobni katranom in so odporni na večino atmosferskih vplivov. Njihovo oksidiranje zaradi izpostavljenosti zraku, toploti in svetlobi je manj izraženo kot pri katranih. Oksidacija je tako kot pri katranih površinski proces, zato so bolj ogroženi tanki premazi bitumnov kot debelejše plasti. Pri tem velja omeniti tudi to, da so bitumni naravnega izvora (TLA – Trinidad Lake Asphalt) manj odporni na vremenske vplive kot bitumni pridobljeni z destilacijo surove nafte.

Varnostni ukrepi pri uporabi katranov in bitumnov

Bitumni in katrani gorijo tako kot vse organske spojine ob zadostni prisotnosti zraka in dovolj visoki temperaturi. Pomembni sta dve temperaturi: *temperatura vžiga* in *temperatura gorenja*.

Pri *temperaturi vžiga* se ob prisotnosti zraka in povzročitelja vžiga (iskra, plamen, cigareta) vžgejo hlapi, ki se dvigujejo s površine bitumna. Večina bitumnov se uporablja pri bistveno nižjih temperaturah. Določene vrste bitumnov se pred uporabo morajo segreti nad temperaturo vžiga, zato je potrebno izredno skrbno ravnanje z njimi. Pred uporabo bitumnov je treba poznati njihove lastnosti in temu ustrezno poskrbeti za varnostne ukrepe. Temperatura vžiga je odvisna od temperatur vžiga posameznih lahkih olj, ki jih vsebuje bitumen in ki izparevajo pri povišanih temperaturah okolja in bitumna. Ko ti hlapi izgorijo, plamen ugasne.

Pri izgorevanju hlapov se temperatura lahko dvigne do *temperature gorenja bitumna*, ko tudi sam začne goreti. Ta nevarnost obstaja pri požarih v zgradbah, ko se razvijejo temperature bistveno višje od temperatur gorenja

bitumnov. Pri gašenju se ne sme uporabljati voda, ker ta lahko povzroči dodatne težave (transport gorečega stopljenega bitumna).

Pri uporabi bitumnov in katranov je poleg problemov v zvezi z gorenjem treba upoštevati tudi toksičnost hlapov, ki se razvijejo na površini ob povišanih temperaturah okolja. Določene kemikalije, ki jih vsebujejo bitumni lahko povzročijo alergije na koži uporabnikov, nekatere snovi pa so tudi kancerogene.

Fizikalne lastnosti

Sprijemnost

Površine, na katere se nanaša bitumen ali katran, morajo biti ustrezno pripravljene, predvsem pa čiste, suhe in brez prahu. Za zagotovitev sprijemnosti morajo določene pogoje izpolnjevati tudi bitumni in katrani. Če so plasti veziva predebele ali preveč viskozne (toge), ne bodo primerno omočile površino, na umazano površino pa se vezivo ne more prilepiti. Ti problemi pogosto nastopajo pri uporabi neustrezno pripravljenega mineralnega agregata za asfalt betonske mešanice. Če se bitumensko vezivo nanaša na mokro površino ali površino pod vodo (slika 10-2), se le delno prilepi.



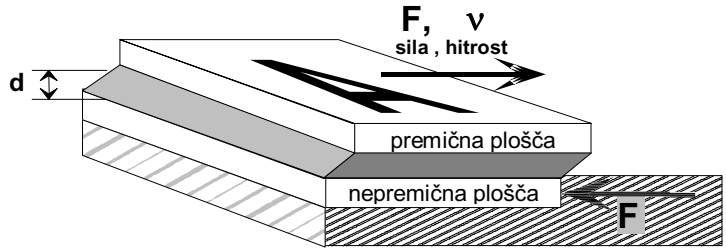
Slika 67: Lepljenje ogljikovodikovega veziva na mokro podlago

Pri ogljikovodikovih vezivih je kot θ vedno manjši od 90°, kar pomeni, da je treba vložiti določeno delo, s katerim se bo iztisnila voda in se s tem povečala površina lepljenja veziva na trdno podlago. Če je kot manjši, je potrebno manj energije za zlepljanje veziva in površine. Velikost kota θ je odvisna od vrste bitumna ali katrana. Pri katranih je kot θ manjši kot pri bitumnih. Zato imajo katrani boljšo sprijemnost s podlago kot bitumni in so primernejši za uporabo v primerih, ko se ni mogoče povsem znebiti vlage ali vode na površini trdne podlage. Na sprijemnost veziv se lahko vpliva z različnimi dodatki, ki povečujejo kot omakanja. Luščenje veziva s trdne podlage je enako povezano s kotom omakanja, zato so katrani bolj odporni pred luščenjem kot bitumni.

Viskoznost

Ogljikovodikova veziva se uporabljajo v različnih stopnjah konsistence; od tako trdih, da se pri udarcu lomijo, do tako mehkih, ki so tekoči že pri sobni temperaturi. Pri nizkih temperaturah in kratkotrajnih obremenitvah se mnogi bitumni in katrani obnašajo elastično, vendar pa je viskoznost skupna lastnost vseh. Nekatere vrste bitumnov (oksidirani bitumni) so tiksotropični. Tiksotropičnost je lastnost razmeroma togega materiala, da postane viskozen, ko se ga vibrira ali stresa.

Stopnja viskoznosti se odraža kot velikost plastičnih deformacij, ki se razvijejo v določenem času pri stalno obremenjenem materialu.



Slika 68: Shematični prikaz določanja viskoznosti

Bolj ko je material viskozen, manjše bodo deformacije. Viskoznost je definirana kot sorazmernostni koeficient med strižno hitrostjo in strižno napetostjo (slika 68). Z naraščajočo temperaturo se viskoznost bitumenskih materialov manjša.

Koeficient viskoznosti (η) se, kot je prikazano sliki 68, da izraziti v obliki:

$$\eta = \frac{F/A}{v/d} = \frac{Fd}{Av} \text{ (Ns/m}^2\text{)}$$

kjer so F strižna sila, A površina ploskve, d debelina bitumna in ν hitrost delovanja strižne sile. V literaturi se kot enota viskoznosti velikokrat uporablja *pois (P)*, ki je desetkrat manjša enota od Ns/m^2 ali *centipois (cP)*, ki je 1000 krat manjša enota od Ns/m^2.

Preglednica 24: Viskoznost različnih materialov

Material	Viskoznost v (cP)	Stanje pri 20°C
voda	1	tekočina, ki se lahko črpa
dieselsko gorivo	10	
težko strojno olje (50 SAE)	10^3	
mehkejši bitumni in katrani	10^5 do 10^6	poltekoča snov
srednje trdi bitumni in katrani	10^7 do 10^8	mehka poltrdna snov
trdi bitumni in katrani	10^{10}	trdna snov

Pri obravnavanju viskoznosti se mora vedno navesti tudi temperatura, pri kateri veljajo navedene vrednosti viskoznosti. Razpon viskoznosti bitumnov in katranov je zelo velik, zato so potrebne različne metode in instrumenti za ugotavljanje in določanje njene vrednosti. Pri mnogih vrstah bitumenskih veziv je viskoznost odvisna tudi od hitrosti spreminjanja temperature okolja. Zato se viskoznost preskuša pri stalnih temperaturah ali pa pri pogojih enakomernega, natančno določenega spreminjanja temperature.

Obstajata dve vrsti viskozimetrov. Pri prvi vrsti se viskoznost meri pri znanih silah in izmerah naprave ter se izraža v fizikalnih enotah (Ns/m^2 ali pois). Druga vrsta so standardizirane naprave, pri katerih se glede na izkustveno pridobljena znanja o viskoznosti le-ta izraža z enostavnejšimi enotami, kot so čas (s) ali temperatura (°C). V prvo skupino sodijo naprave kot sta viskozimeter z drsno ploščo in kapilarni viskozimeter, v drugo skupino pa sodijo Redwood-ov viskozimeter, Engler-ov viskozimeter in rotacijski viskozimeter.

S penetracijskim preskusom se ugotavlja viskoznost bitumna glede na odpor, ki ga nudi prodiranju igle. Mera viskoznosti je globina prodora igle v bitumen pri določeni temperaturi in pri določeni obtežbi igle. Običajni penetracijski preskus se izvaja z iglo premera 1 mm in obteženo z maso 100 g pri temperaturi 25°C. Bitumni, ki se uporabljajo v cestogradnji, se označujejo s številčnimi oznakami, ki prestavljajo 10-kratno vrednost penetracije (BIT 15, 25, 45, 60, 90 130 in 200).

Toplotna občutljivost ogljikovodikovih veziv

Bitumni in katrani, ki se uporabljajo v graditeljstvu so razmeroma trdi pri temperaturah, ki so običajne za tople poletne dneve. Kljub temu je ena od bistvenih značilnosti temperaturno območje, v katerem se ti materiali zmehčajo do določene stopnje, ki jo obravnavajo standardi. Temperatura zmehčanja se določa z napravo, ki deluje na principu spremljanja prodiranja standardizirane kroglice skozi material pri različnih temperaturah.

Druga bistvena lastnost, ki je povezana s temperaturno občutljivostjo, je odvisnost viskoznosti od temperature. Diagrami odvisnosti viskoznosti od temperature imajo linearno obliko, če viskoznost izrazimo z linearno skalo. Viskoznost katranov se hitreje spreminja kot viskoznost bitumnov, najmanj pa so občutljivi oksidirani bitumni.

Pri običajnih temperaturah je večina bitumenskih veziv trdnih. Zato jim je pred uporabo treba znižati viskoznost s segrevanjem ali celo utekočinjenjem z uporabo organskih topil tako, da se jih da brizgati, črpati ali mešati. Primerne viskoznosti za praktično uporabo so prikazane v preglednici 25.

Preglednica 25: Primerne stopnje viskoznosti za uporabo veziv

Uporaba veziva	Potrebna viskoznost	Temperaturno območje
brizganje	50 do 100 cP	70 do 200°C
črpanje	500 do 1000 cP	50 do 150°C
valjanje (bitumenske mešanice)	1000 do 50 000 cP	25 do 90°C

Ustrezne viskoznosti se lahko dosežejo s segrevanjem na razmeroma visoke temperature. Zaradi vgradljivosti mešanic, ki običajno vsebujejo do 10% veziva in se transportirajo na gradbišča, se pred mešanjem mora segreti tudi agregat.

Mešanice ogljikovodikovih veziv

Razredčena veziva in emulzije

Razredčena ogljikovodikova veziva (cutbacks) so mešanice veziv z lahkimi olji. Izdelujejo se tako, da se bitumnom segretim do zmehčanja dodajajo lahka olja (bencin). Take mešanice imajo bistveno manjšo viskoznost od osnovnega veziva, kar omogoča njihovo uporabo pri nižjih temperaturah. Tanjše plasti razredčenega veziva se hitro strdijo, ker lahka olja hitro izhlapijo. Običajna razredčila sta kerozin in kreosot.

Emulzije so disperzije ogljikovodikovih vezi v obliki drobnih kroglic v vodi, ki ohranjajo stabilnost s pomočjo dodanih emulgatorjev. Stabilnost izgubijo, ko se v tanki plati nanesejo na trdno podlago. Voda izhlapi, vezivo pa ustvari gosto prevleko. Emulzije se delijo v tri skupine: nestabilne, polstabilne in stabilne. Minimalna zahtevana doba stabilnosti je 3 mesece. Po sestavi so lahko alkalne (polnilo je iz apnenca ali sedimentnih kamenin) ali kisle (polnilo je iz kremenčevega peska, sienitnih in bazaltnih kamenin). Vgrajujejo se v hladnem stanju in se lahko mešajo s cementom, hidratiziranim apnom, kameno moko, azbestnimi vlakni, pluto, polimernimi vlakni itd. Uporabljajo se za premaze, zalivke in kot podlaga za druge premaze. Pri prometnicah se uporabljajo za stabilizacijo podlage.

Veziva z dodatkom gume

Ogljikovodikova veziva se lahko modificirajo z dodajanjem naravne gume. Guma se lahko primeša v obliki lateksa, prahu iz nevulkanizirane gume ali prahu iz vulkanizirane gume, dobljenega z mletjem avtomobilskih gum. Guma se lahko primeša le bitumenskim vezivom, ker ni kompatibilna s katrani še zlasti pri višjih temperaturah. Nevulkanizirani prah se najlažje dispergira v vezivu. Pri lateksu, ki vsebuje veliko vode, nastanejo zaradi nje težave pri temperaturah nad 100°C. Vulkanizirani prah se sicer težje dispergira, je pa veliko cenejši od nevulkaniziranega. Guma izboljšuje lastnosti veziva že v razmeroma majhnih koncentracijah:

- povečuje elastičnost in zmanjšuje nevarnost krhkega loma materiala,
- zvišuje viskoznost in temperaturo zmehčanja ter zmanjšuje penetracijo; učinek gume je večji pri mehkejših bitumnih,
- zmanjšuje občutljivost veziva na temperaturne spremembe.

Količine gume, ki se dodajajo vezivu, so majhne in običajno ne presegajo 5%, običajno pa le 0,5% ali manj. Lastnosti mešanice bitumna in gume se lahko spreminjajo z daljšim izpostavljanjem visokim temperaturam. Guma se pri tem spreminja in lahko deluje kot mehčalec veziva.

Mešanice veziv primerne za cestogradnjo

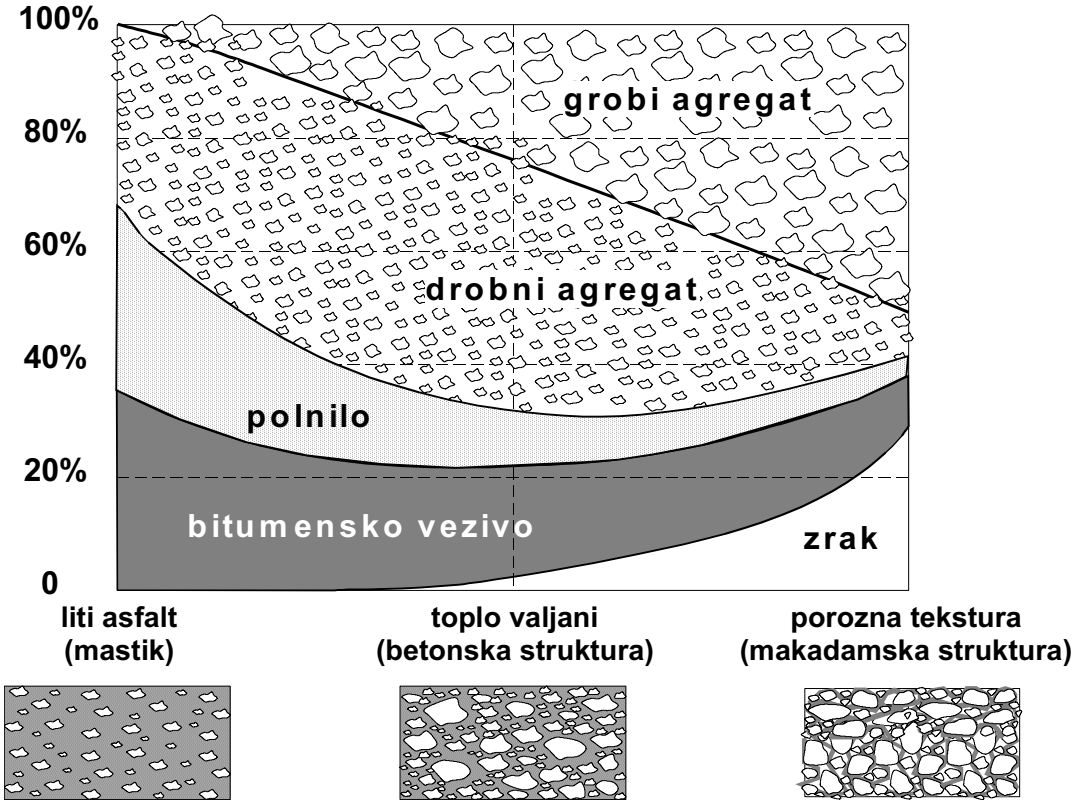
Asfalti, ki so bili narejeni s pomočjo naravnih bitumnov (TLA), imajo boljše lastnosti, saj je drsnost takih vozišč manjša od tistih, ki so narejeni iz asfalta z bitumni iz rafinerij. Naravni bitumni so razmeroma dragi, zato se uporabljajo tudi v mešanicah z bitumni iz rafinerij v razmerju 1:1. Boljše obnašanje naravnih bitumnov se pripisuje njihovi hitrejši oksidaciji in zrnatosti strukture oksidiranega bitumna. Asfalti iz gladkega agregata in bitumnov iz rafinerij imajo še posebej veliko drsnost. Mešanice bitumnov in katranov so veziva, ki oksidirajo hitreje od samega bitumna. Asfalti narejeni iz takega veziva imajo manjšo drsnost. Mešanice so stabilne pri deležu smol do 30%, večinoma pa se uporabljajo take, ki vsebujejo 20% smol.

BITUMENSKE MEŠANICE

Sestava mešanic

Ogljikovodikova veziva se redko uporabljajo kot material brez dodatkov. Običajno se uporabljajo v mešanicah z mineralnim agregatom in dodatki ter

polnili, ki izboljšujejo lastnosti mešanic (polimerne emulzije, organska in anorganska vlakna). Vse mešanice so med dvema ekstremoma: litim asfaltom (mastik), kjer so v večinski matrici iz zmesi ogljikovodikovega veziva in polnila enakomerno razpršena zrna drobnega agregata, in makadamsko mešanico z odprto teksturo, v kateri so večinoma groba zrna agregata povezana z vezivom (slika 69). Večinoma so mešanice sestavljene izkustveno, kar pomeni bolj na osnovi receptov kot na osnovi specifikacij, ki izhajajo iz predvidenega obnašanja materiala med uporabo.



Slika 69: Prostorninska razmerja komponent bitumenskih mešanic

Pri izbiri mešalnih razmerij za določene namene, želene lastnosti narekujejo sestavo mešanice. Med najpogosteje vodečimi lastnostmi je trajnost mešanice, ki omogoča dolgo življenjsko dobo in čim manjše vzdrževalne stroške. Ogljikovodikova veziva so po naravi zelo obstojna in se zato pri mešanicah, ki naj bi imele dolgo življenjsko dobo, pogosto uporabljajo razmeroma visoki deleži veziva in manjše količine drobnega agregata. Lastnosti takih mešanic so predvsem odvisne od lastnosti veziva. Po vgradnji se dobi zelo kompaktno in gosto gradivo, ki oksidira le na površini in je praktično nepropustno. Če se za pripravo mešanice uporabijo veziva velike viskoznosti, je tak material tudi zelo trden, izbira agregata pa omogoča tudi doseganje velike togosti. Take mešanice se lahko pripravijo in vgradijo le pri visokih temperaturah, kar še dodatno zvišuje njihovo že sicer visoko ceno.

Pri bitumenskih mešanicah, ki so zaščitene pred atmosferskimi vplivi, se dobre mehanske lastnosti, kot so trdnost, gibkost ter ekonomičnost, lahko dosežejo z uporabo ustrezno granuliranega kakovostnega agregata in manjšo količino veziva. Vezivo v takih mešanicah povezuje agregat in s tem omogoča enakomeren prenos obremenitve na posamezna zrna. Med vgradnjo vezivo deluje tudi kot mazivo, ki omogoča dobro medsebojno razporeditev zrn in

ustvarjanje kompaktnega materiala. Za tovrstne mešanice so primerna veziva z nizko viskoznostjo, kar omogoča vgradnjo pri razmeroma nizkih temperaturah.

Lastnosti mešanic

Mešanice se večinoma pripravljajo v asfaltnih bazah ali v tovarnah asfalta, kjer je vedno na voljo ogret agregat. Na gradbišču se pripravljajo le vroče hidroizolacije v visokogradnji in pri preplastitvi kamnitih vozišč z bitumenskimi prevlekami.

Večina vseh mešanic je sestavljena iz štirih komponent:

- *grobega agregata,* lomljenca, gramoza ali žlindre velikosti zrn nad 2,5 mm
- *drobnega agregata,* mineralnih zrn velikosti pod 2,5 mm,
- *polnila,* finozrnatega mineralnega materiala, pogosto apnenca in portland cementa v zrnih velikosti pod 0,075 mm in
- *ogljikovodikovega veziva,* kot je bitumen, katran ali mešanica obeh z dodatki.

Obdelovalnost mešanice

Mešanica mora biti sestavljena tako, da se lahko obdeluje ter enostavno vgrajuje in pri tem primerno kompaktira. Nekompaktne mešanice prepuščajo vodo in zrak, kar omogoča hitrejše oksidiranje veziva in njegovo ločevanje od agregata ter s tem znižanje trajnosti celotnega materiala. Pod obremenitvami se prekomerno deformirajo in so občutljive na mehanske poškodbe.

Obdelovalnost in kakovost vgradnje je odvisna od temperature materiala in okolja. Temperaturni razpon, pri katerem se da doseči ustrezna kakovost vgrajene mešanice, znaša od 15°C pri mešanicah z razredčenimi vezivi do 200°C pri litem asfaltu (mastik), ki je pripravljen iz veziva visoke viskoznosti in z veliko količino polnila. Mešanice, ki so pripravljene za vgradnjo pri nižjih temperaturah, niso občutljive na odstopanja od predpisanih temperatur, kot je to slučaj pri mešanicah pripravljenih za vgradnjo pri visokih temperaturah. Dodatno težavo povzroča hlajenje zelo vročih mešanic med transportom. Zato se mešanice, ki jih je treba vgrajevati pri visokih temperaturah, ne smejo transportirati na večje razdalje. Pred samo vgradnjo se morajo z dodatnim segrevanjem manjših količin materiala vzdrževati na ustrezno visoki delovni temperaturi. Bitumenska veziva so nekoliko manj občutljiva kot katranska.

Trdnost in gibkost mešanice

Ustrezno pripravljene in vgrajene bitumenske mešanice so sposobne prenašati statične in dinamične obremenitve. Od njih se pričakuje tudi primerna gibkost zaradi prilagajanja dolgotrajnim spremembam njihove oblike in posedkom podlage ter pogostim kratkotrajnim deformacijam, ki lahko povzročijo porušitev zaradi utrujanja materiala.

Na sliki 10-4 so prikazana približna prostorninska razmerja komponent za različne vrste mešanic od litega asfalta do makadamske strukture. Liti asfalt lahko vsebuje nad 1/3 veziva in je popolnoma neporozen, kar pomeni, da so vse praznine med agregatnimi zrni povsem zapolnjene. Zrna agregata se ne stikujejo, zato se obremenitev prenaša preko veziva, v katerem je razpršeno polnilo. Mehanske lastnosti takega materiala so določene predvsem z lastnostmi

bitumenskega veziva. Polnilo prispeva k zvišanju trdnosti in togosti materiala ter k znižanju temperature vgrajevanja. Od kakovosti in količine polnila je odvisno, ali se bodo pojavile tudi zračne pore (prekomerna količina polnila) ali pa bo vezivo neekonomično izkoriščeno (premajhna količina polnila).

Z zvišanjem količine drobnega in grobega agregata ter proporcionalnemu znižanju količine veziva nastaja material, pri katerem se večji del obremenitve prenaša preko stičnih ploskev agregata, manjši del pa se prenaša preko veziva s polnilom. Zato so pri takih materialih njihove mehanske lastnosti odvisne tudi od mehanskih lastnosti agregata, njegove granulometrijske sestave, površinske teksture, oblike, medsebojnega zaklinjanja zrn itd.

Trdnost bitumenske mešanice se lahko povečuje bodisi z uporabo veziv z višjo viskoznostjo bodisi z uporabo trdnega lomljenega agregata s hrapavo površino ali pa s kombinacijo obeh. Gibkost mešanice se dosega ali z večjo količino veziva ali z njegovo nižjo viskoznostjo.

Vezivo v mešanici se na kratkotrajno delovanje obtežb odziva elastično, zato je togost mešanice odvisna od togosti veziva in količine agregata v mešanici. Pri dolgotrajnih obremenitvah, ki povzročajo plastične deformacije veziva zaradi pojava tečenja, je togost mešanice zelo odvisna od vseh že naštetih lastnosti agregata. Na togost dodatno vpliva tudi vpetost mešanice v konstrukcijo, ki lahko ovira razvoj trajnih deformacij. Na trdnost in gibkost bitumenskih materialov veliko vpliva tudi sprememba temperature. Zvišanje temperature ima podoben učinek kot trajajoča obtežba, saj prispeva k plastičnem deformiranju veziva zaradi tečenja.

Trajnost mešanice

Trajnost bitumenskih mešanic je predvsem odvisna od trajnosti veziva. Zaradi vpliva toplega zraka iz veziva hlapijo lažja olja, polimerne verige oksidirajo in/ali dodatno polimerizirajo. S tem se površina veziva trdi in postaja bolj toga. Spremembe v vezivu nastajajo na odprtih površinah mešanice med njeno pripravo, med transportom na gradbišče in med samo vgradnjo oziroma polaganjem plasti materiala. Ko se material vgradi in kompaktira, se proces površinskega strjevanja in staranja zelo upočasni. Viskoznost veziva se zaradi staranja lahko v prvem letu po vgradnji poveča do petkrat.

Na trajnost mešanice vpliva tudi zlepljenost veziva in zrn agregata. Slaba zlepljenost je lahko posledica vgradnje mokrega, zaprašenega ali umazanega agregata. Kasneje se vezivo lahko odlepi tudi zaradi pronicanja vode ali drugih tekočin. Temu se izognemo z gosto in neporozno mešanico. Slaba zlepljenost je lahko tudi posledica uporabe veziva, ki nima primerne viskoznosti glede na obremenjenost mešanice in temperaturo okolja. Vezivo je lahko ali preveč tekoče zaradi temperaturnih vplivov ali pa pretrdo in preobčutljivo na mehanske obremenitve, ki krhko porušijo stik med agregatom in vezivom.

Projektiranje sestave bitumenske mešanice

Projektiranje mešanice je izraz, ki je bolj primeren za betone pripravljene z mineralnimi vezivi. Pri mešanicah z ogljikovodikovimi vezivi je bolj primerno sestavljanje obravnavati kot izbiro komponent bitumenskih mešanic. Mešanice in razmerje komponent se izbirajo glede na zahtevano trdnost, gibkost, trajnost, nepropustnost, togost, drsnost in ekonomičnost. Pri tem se projektant

ozira na izkušnje z obnašanjem različnih vrst mešanic v preteklosti pod pogoji, ki se pričakujejo na določeni lokaciji.

Izkustveno določanje receptur ima svoje prednosti in pomanjkljivosti. Sestava mešanice se lahko enostavno določi, kar zmanjšuje možnosti nesporazumov med projektantom in izvajalcem. Zaradi enostavnosti je tudi lažja kontrola sestave in kakovosti materiala. Pomanjkljivost je v tem, da je kakovost mešanice bolj odvisna od vgrajevanja kot od same sestave. Postopek vgrajevanja je težje enoznačno predpisati, posebno ko se razmere na gradbišču bistveno razlikujejo od tistih, ki so narekovale izbiro mešanice. Če se dokaže neustreznost ravnanja z materialom med vgradnjo, je težko natančno določiti posledice in stopnjo pomanjkljivosti vgrajenega materiala. Izkustveno načrtovanje in pripravljanje mešanic je tudi ovira nadaljnjemu razvoju in vpeljavi izboljšav v prakso.

Pri določanju količine bitumna za določeno mešanico je odvisno ali se želi dobiti betonska ali makadamska struktura. Pri betonski strukturi mešanice je pomembno, da so z bitumnom oblepljena vsa zrna agregat, pri makadamski strukturi pa je pomembno, da je zapolnjen ves prostor med zrni agregata.

Obstajajo različni izkustveni obrazci, na osnovi katerih se v praksi določa količina potrebnega bitumna za pripravo makadamske in betonske asfaltne mešanice. Količina potrebnega bitumna za doseganje goste betonske strukture se lahko oceni z izrazoma:

- za določanje količine bitumna izražene v gramih: $B = K_0 \dfrac{\sum(S)}{1000}$ in
- za določanje količine bitumna izražene v cm^3: $B = e\dfrac{\sum(S)}{1000}$.

V obeh izrazih pomeni: (B) količino bitumna za pripravo mešanice z betonsko strukturo, (K_0) s predhodnimi preskusi določeno optimalno količino določene vrste bitumna za doseganje ustrezne trdnosti asfaltne mešanice, (e) eksperimentalno določeno povprečno debelino bitumenske plasti, ki omogoča najbolj trdno povezavo med zrnom agregata in bitumnom (za zrna agregata premera 3 mm znaša e $\approx$ 5μm) in Σ(S) skupno površino vseh zrn agregata.

Količina potrebnega bitumna za doseganje porozne makadamske strukture se lahko oceni z izrazom za določanje količine bitumna izražene v gramih, ki jo je treba zamešati s 100 grami agregata:

$$B = \alpha\frac{\rho_{bit}}{\rho_a} \qquad \text{pri čemer je} \quad \alpha = \frac{\rho_a - \rho}{\rho_a} \quad .$$

V izrazih pomeni (α) poroznost makadamske strukture, (ρ_a) specifično gostoto agregata, (ρ_{bit}) specifično gostoto bitumna in (ρ) specifično gostoto poroznega makadamskega asfalta.

Približni izrazi so prikazani kot ponazoritev izkustvenega pristopa k projektiranju sestave bitumenskih mešanic, ki imajo pričakovane lastnosti.

Vloga bitumna v asfaltni mešanici je:

- zadrževanje mineralne strukture asfalta v stanju nosilnosti, kar je posledica lepljivosti bitumna,
- povečanje nosilnosti in stabilnosti asfalta z zapolnitvijo prostora med zrni agregata in
- zagotavljanje gibkosti in optimalne plastičnosti asfaltne mešanice.

Polnilo, ki se dodaja bitumnu, močno vpliva na stabilnost in plastičnost mešanice. Vpliva na znižanje poroznosti mešanice in na časovni razvoj plastičnih deformacij (reološke lastnosti materiala), kar je posledica delovanja adhezijskih sil med bitumnom in zrnci polnila.

UPORABA OGLJIKOVODIKOVIH MATERIALOV

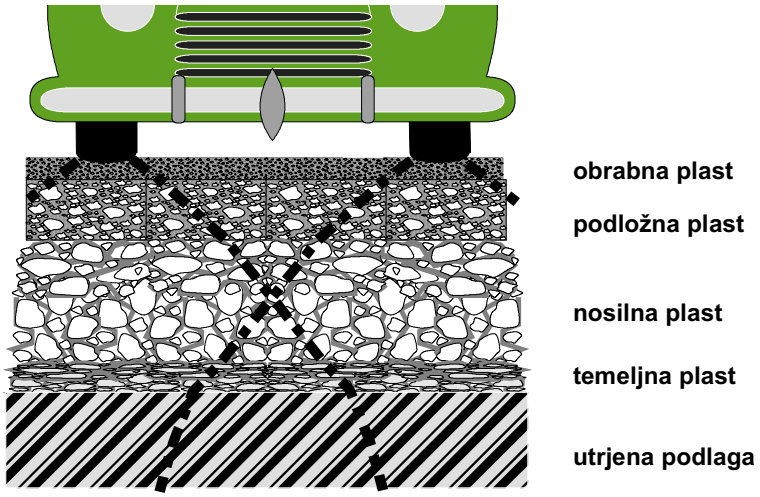
Uporaba bitumenskih materialov je zelo razširjena zaradi:

- razmeroma nizke cene in dostopnosti v velikih količinah,
- trajnosti,
- sprijemnosti in vodonepropustnosti,
- enostavnosti priprave in vgradnje bitumenskih mešanic ter hitrega strjevanja po vgradnji.

Naštete prednosti bitumenskih materialov pridejo najbolj do izraza tako pri gradnji cest in ostalih objektov nizkogradnje kakor tudi pri izvedbi različnih vrst hidroizolacij v nizkih in visokih gradnjah.

Cestogradnja

Bitumenski materiali se uporabljajo ali za vse ali samo za posamezne plasti celotne cestne konstrukcije. Za površinsko, obrabno plast se uporabljajo najbolj kakovostne bitumenske mešanice, ki zagotavljajo ustrezne vozne pogoje (ravnost, omejeno drsnost), ščitijo ostale plasti pred vremenskimi in mehanskimi vplivi ter zvezno prenašajo obremenitve na nižje ležeče plasti. Ostali dve plasti vozišča sta sestavljeni tako, da prenašata obremenitve in dajeta ustrezno togo podlago obrabni plasti cestišča.



Slika 70: Shematični prikaz razporeditve obtežbe skozi plasti vozišča

Bitumenski materiali tvorijo plastovito konstrukcijo cestišča. Na utrjeno zemeljsko podlago se nanaša temeljna plast. Ta služi za izolacijo višjih slojev od podlage in je sestavljena iz ustrezno granuliranega mineralnega materiala. Z njeno debelino se hkrati regulira globina celotne konstrukcije glede na zahteve v zvezi z zaščito pred zmrzovanjem.

Nosilna plast je najpomembnejši del konstrukcije, ki omogoča raznos zunanje obtežbe na tako veliko površino, da jo utrjena podlaga ceste lahko prenaša. Zgornji plasti sta izdelani iz najbolj kakovostnih bitumenskih mešanic. Njuna vloga je ustvarjanje ustreznih voznih pogojev in zaščita manj odporne nosilne plasti. Zaradi tega morajo imeti lastnosti kot so vodotesnost, majhna drsnost, odpornost na obrabo, na zmrzovanje in tajanje, na ostale vremenske vplive in škodljive snovi itd. Podložna in obrabna plast sta pogosto sestavljeni iz različnih mešanic. Podložno plast odlikujejo višje mehanske lastnosti, obrabno plast pa večja odpornost na zunanje vplive.

Mešanice za izdelavo obrabne plasti

Pri načrtovanju sestave mešanice za pripravo obrabne plasti je treba upoštevati trajnost in ekonomičnost, ki se izraža tudi v stroških vzdrževanja cestišča. Zato je treba presojati med višino stroškov izvedbe novega cestišča in pričakovanimi stroški vzdrževanja oz. periodičnih popravil. Od mešanic za izdelavo obrabne plasti so v veliki meri odvisne varnost in vozne lastnosti cestišč kakor tudi vrste in dimenzije ostalih spodaj ležečih plasti. Uporabniki cest si želijo varna vozišča, ki omogočajo velike hitrosti vožnje in ki trajajo dolgo časa brez popravil. Idealne cestne površine so ravne, toge in stabilne z ustrezno oprijemljivostjo in veliko trajnostjo. Veliko trajnost zagotavlja mešanica, ki je bogata z bitumenskim vezivom. Stabilnost in oprijemljivost pa je lažje doseči z ostrorobim agregatom in manjšo količino veziva. Zato je pri sestavljanju mešanice potrebno uskladiti nasprotujoče si vplive posameznih komponent. Običajno se dobre lastnosti obrabne plasti dosegajo z visoko vsebnostjo bitumenskega veziva (trajnost), visoko viskoznostjo veziva (togost in stabilnost) in z oprijemljivostjo s površinskim vtiskanjem ostrorobega mineralnega agregata, ki je predhodno oblit z bitumnom. Pomanjkljivost te rešitve so visoki stroški. Ti so visoki tudi zato, ker se mešanice bogate z visokoviskoznim vezivom morajo vgrajevati močno segrete in ker take obrabne plasti zahtevajo zelo trdno in togo podlago.

Mastik asfalt

Liti asfalti (mastik) sodijo med najbolj drage izvedbe asfaltnih vozišč, ki pa jih po drugi plati odlikuje velika trajnost in odpornost na deformacije celo pri najtežjih prometnih obremenitvah. Zato se uporabljajo na močneje obremenjenih odsekih, kjer vozila zavirajo ali speljujejo (križišča, postajališča). Uporabljajo se tudi za vozišča, na katerih popravila povzročajo velike zastoje prometa in so povezana z dodatnimi stroški ali z zmanjšanjem varnosti zaradi oviranja tekočega prometa (mostovi, tuneli). Na dolgih jeklenih mostovih, kjer je lastna teža pomemben del celotne obtežbe, se jeklena nosilna podlaga preplasti s tanko plastjo litega asfalta, kar daje izredno trajno vozišče. Površinska hrapavost takega vozišča se lahko poveča s površinskim nanosom uvaljanega peska iz trdnih kamenin, ki je predhodno oblit z bitumnom.

Asfalti iz apnenih skriljevcev

Apneni skriljevci so naravno impregnirani z bitumni. Njihova nahajališča so v Franciji, Italiji in Švici. Impregnirana kamenina se zdrobi v prah in se lahko uporablja za pripravo bitumenske mešanice brez dodatnega bitumenskega veziva. Bitumenski prah se polaga po segrevanju od 110 do 140°C v plasteh debelih okoli 50 mm tako, da se kompaktira z ročnim nabijanjem s težkimi železnimi nabijali. Zglajena površina se naknadno hrapavi s krtačami, ki so prepojene z mehkim bitumnom razredčenim s kerozinom ali belim špiritom. Na tako pripravljeno površino se razprostre z bitumnom oblit ostri pesek, ki se uvalja z lahkimi valji. Taka obrabna plast je toga, odporna na visoke temperature, trda in odporna na obrus ter ostale vrste poškodb. Slaba stran je njena razmeroma visoka cena.

Vroče valjani asfalt

Vroče valjani asfalt tvori visoko odporno, gosto obrabno plast vozišča. Polaga se strojno in je skoraj povsem vodonepropusten. Uporablja se za preplastitev mestnih ulic in ostalih močno obremenjenih vozišč. Polaga se na utrjeno in togo podlago, ki je lahko izdelana tudi iz betona. Vroče valjani asfalt lahko vsebuje različne količine mineralnega agregata (frakcije med 2 in 16 mm), na njegovo trdnost pa najbolj vpliva viskozna asfaltna malta. Ta se sestoji iz drobnega agregata, polnila in veziva, ki je lahko bitumen, naravni asfalt ali druge mešanice bitumenskih veziv, med katerimi je tudi trdi bitumen, ki se pridobiva kot najtežja frakcija z destilacijo nafte ("pitch").

Vroče valjani asfalti se polagajo ali v eni ali dveh plasteh pri temperaturi okoli 40°C. Spodnja plast vsebuje več grobega agregata (od 55 do 65%) in je zato tudi manj veziva. Valjajo se s težkimi valjarji (vsaj 6 ton), vozišče pa se lahko uporablja takoj po ohladitvi asfalta. V primerih, ko asfalt vsebuje manj kot 45% grobega agregata, se vanj uvalja bitumenizirani grobi pesek.

Gosti katran

Obrabna plast iz gostega katrana vsebuje veliko količino veziva (katrana) in veliko količino polnila. Je zelo gosta, njena površina je zelo trdna in odporna na obrabo. Polaga se strojno v več tanjših plasteh podobno kot vroče valjani asfalt. Katran, ki se uporablja kot vezivo, ima nekoliko manjšo viskoznost kot vezivo v vroče valjanem asfaltu, zato je tudi nekoliko mehkejši in bolj podajen

v poletnih mesecih. Plasti iz gostega katrana se polagajo pri delovni temperaturi okoli 70°C, sam material pa se dobavlja segret na okoli 90°C. Zaradi tega mora delo potekati hitro zlasti še v hladnih dneh, ko podlaga hitreje odvaja toploto. Obrabna plast iz gostega katrana ima nekaj prednosti pred vroče valjanim asfaltom. Odporna je proti oljem, ki jih med vožnjo spuščajo vozila, in je zato primerna za prekrivanje parkirišč, avtobusnih postaj in letaliških terminalov. Pri temu pa je treba upoštevati omejitve obremenitev pri višjih temperaturah okolja.

Asfalt beton

Po sestavi je podoben vroče valjanem asfaltu s to razliko, da je zrnavostna sestava agregata bolj kompaktna. Zato se obremenitve prenašajo bolj preko stičnih površin agregata kot preko asfaltnega veziva. Agregat je običajno lomljenec, zato so zrna medsebojno zaklinjena, kar dodatno izboljšuje mehanske lastnosti asfalt betona. Ta vsebuje manj bitumenskega veziva v primerjavi z vroče valjanim asfaltom. Vozišča prekrita z asfalt betonom lahko prenašajo najtežje prometne obremenitve.

Gosti bitumenski makadam

Gosti bitumenski makadam lahko nadomešča asfalt beton, vendar je nekoliko bolj porozen (poroznost okoli 10%). Njegova stabilnost je odvisna predvsem od mehanskega zaklinjenja zrn agregata. Kot vezivo se uporabljajo trši bitumni v manjših količinah kot pri asfalt betonu. Med obremenitvami se agregatna zrna dodatno zaklinjajo, poroznost se zmanjšuje, vezivo pa se izceja navzgor proti površini. Velikost maksimalnih zrn agregata je do 16 mm, če se mešanica polaga v plasteh debeline 5 cm pri nižjih temperaturah, kot so potrebne za polaganje asfaltov. Kakovost takih vozišč je zelo odvisna od granulometrijske sestave agregata in njegovega kompaktiranja med vgradnjo. Prometne obremenitve se dobro razporejajo v gostih bitumenskih makadamih. Za močno obremenjena vozišča se uporabljajo tudi agregati iz žlindre.

Katranski in bitumenski makadami

Na obnašanje katranskih in bitumenskih makadamov zelo vplivajo klimatske razmere, pomembna je sestava agregata, pri večjih obremenitvah pa so primernejše mešanice z manjšo količino bitumenskega veziva. V okoljih z nižjimi temperaturami se pri manj obremenjenih voziščih boljše obnesejo mešanice z več bitumenskega veziva, kar je v nasprotju s toplejšimi okolji, kjer se uporablja manj veziva. Pri polaganju se uporabljajo težki valjarji. Polaganje je lahko v dveh plasteh do skupne debeline 13 cm. Zgornja plast je običajno debela do 4 cm. Nove plati so hrapave, vendar pod prometno obtežbo postanejo bolj gladke, ker se bitumensko vezivo s časom izceja na površino.

Drobnozrnati hladni asfalti

Uporabljajo se za popravila asfaltnih površin. Sestavljeni so iz drobnejših frakcij mineralnega agregata in nizko viskoznih bitumnov. Zato se lahko polagajo v segretem ali celo v hladnem stanju in so lahko uskladiščeni za dalj časa. Polagajo se v tankih plasteh in valjajo z valjarji s silo vsaj 50 kN. Vozišča se lahko uporabljajo neposredno po polaganju in valjanju asfalta.

Mešanice za podložne plasti cestišč

Podložne plasti vozišč so običajno dvakrat debelejše od vrhnjih, obrabnih plasti. Njihov namen je, da podpirajo obrabno plast in omogočajo razporeditev oziroma raznos prometnih obremenitev, ki se prenašajo preko vrhnje plasti. Te plasti niso neposredno izpostavljene vremenskim vplivom in obtežbam. Zato so lahko sestavljene iz mešanic z bolj grobim agregatom nekoliko slabše kakovosti, kot je agregat obrabnih plasti. Kot vezivo se uporabljajo bitumenski materiali nižje viskoznosti. Podložna plast vozišča se lahko krajši čas uporablja za promet tako, da se obrabna plast vozišča polaga nekaj časa po odprtju ceste za promet.

Mešanice za nosilne plasti cestišč

Ena izmed značilnosti asfaltnih vozišč je možnost hitrega in ekonomičnega popravila. Zato so tudi nosilne plasti izdelane iz bitumenskih mešanic, ki so v primerjavi z betonskimi podlagami bolj podajne. Izjema so primeri, kjer se za obrabne plasti uporabljajo visokokakovostne bitumenske mešanice, kot so to mastikni asfalti in vroče valjani asfalti.

Asfaltne nosilne plasti omogočajo enakomeren prenos prometnih obremenitev na utrjeno podlago vozišč. Sestojijo se iz grobega agregata, ki se v plasteh nanaša na podlago in komprimira z valjarji. Zaradi lažje komprimacije so prepojeni z bitumenskimi emulzijami, ki se kasneje strdijo. Imajo makadamsko strukturo z razmeroma majhnim deležem bitumenskega veziva. Trdnost plasti zagotavlja zaklinjenje zrn agregata, ki so debeline do 48 mm. Agregat je oblit z bitumnom ali katranom. Polaga se v plasteh debeline od 8 do 10 cm in se kompaktira s težkimi valjarji (s silo od 80 do 100 kN). Bitumensko vezivo pomaga pri kompaktiranju agregata in povečuje trdnost plasti. Trdnost nosilnih plasti se lahko poveča, če se uporabijo nekoliko bolj viskozna bitumenska veziva. Če je količina uporabljenega bitumenskega veziva dovolj velika, se utrjene nosilne plasti lahko začasno uporabljajo za promet takoj po valjanju.

Bitumenske hidroizolacije

Bitumenski materiali so se najprej uporabljali kot hidroizolacijski materiali. O tem pričajo najdbe izpred 3000 let. Naravne bitumne pomešane s peskom in gramozom so uporabili za tesnjenje s kamnom obloženih brežin in pomolov na reki Tigris. Osnovna naloga bitumenskih materialov, ki jih uporabljamo za hidroizolacije je:

- preprečiti pretok vode skozi oblogo in njeno prodiranje v konstrukcijo ter
- ustvariti dovolj trdno površino, ki je odporna proti erozijskemu delovanju vode tudi v primeru valovanja.

Vodonepropustne prevleke

Najbolj enostavna uporaba bitumenskih materialov je v obliki nanašanja tenkih plasti. S tem se površina konstrukcije zaščiti pred propadanjem, ki ga povzroča prodiranje vode, v kateri so raztopljene škodljive snovi. Za nanašanje na keramične materiale (beton, opeka, kamen) in les so primerne vroče in hladne emulzije. Za zaščito kovinskih konstrukcij so primerni vroči premazi.

Bitumenski premazi ščitijo tudi pred zelo agresivnimi vplivi okolja. S posebnim postopkom (Angus Smith) se kovina segreje na 320°C, potopi v bitumensko mešanico, ki je segreta na 150°C. Mešanica se sestoji iz bitumna in katrana, olj (pogosto laneno olje) in paranaftalena v razmerju 4:3:1. Na ta način se zaščitijo litoželezne in jeklene kanalizacijske cevi.

Tanke plasti bitumenskih premazov in emulzij zapolnijo odprte pore na površini materiala, na katerega se nanašajo, in s tem preprečijo vodi in vodni pari vstop v material. Na tak način se izvajajo hidroizolacije temeljev in zidov nad temelji v kombinaciji z večplastnimi bitumenskimi lepenkami. Izboljšanje izolacije armiranobetonskih plošč, ki se polagajo neposredno na komprimirano plast gramoza, se lahko doseže tudi z bitumensko impregnacijo vrhnje plasti utrjenega gramoza. Pri določanju debeline bitumenske membrane je treba upoštevati hidrostatični pritisk podtalnice.

Vodonepropustne obloge

Vodonepropustne obloge se uporabljajo za izolacijo podzemnih delov zgradb pred podtalno vodo. Sestavljene so iz večih plasti mastiknega asfalta (običajno 3 plasti), ki tvorijo zvezno membrano debeline od 20 mm (stene) do 30 mm (plošče). Obloge se lahko izdelajo tudi iz dveh ali treh plasti izolacijskih bitumenskih trakov povezanih z vročimi bitumenskimi premazi.

Vodonepropustne obloge niso odporne proti mehanskim poškodbam. Zato jih je treba ustrezno zaščititi. Ščitijo se z ometi, betonskimi ali opečnimi oblogami, kakor tudi s polimernimi oblogami, ki jih ločijo od okolišnje zemljine. Pri izvedbi oblog je treba ustrezno pripraviti podlogo, ki jo prekrivamo. Pregrobo podlago, ki bi lahko poškodovala oblogo treba izravnati vendar ne povsem zgladiti. Rahlo hrapava podlaga omogoča dobro sprijemnost z bitumenskim vezivom. Navpični in vodoravni stiki oblog morajo biti natančno izvedeni in obdelani ter dodatno ojačeni s plastmi bitumna ali bitumenskih trakov.

Ravne strehe

Zvezne bitumenske membrane so primerne za hidroizolacijo ravnih streh. Obstaja več različnih vrst bitumenskih membran, izmed katerih so najpogosteje zastopane asfaltne membrane, bitumenske plastovite obloge in bitumenske kritine.

Asfalt

Asfaltne membrane se sestojijo običajno iz dveh plasti mastik asfalta. Teža obeh plasti znaša okoli 0,4 kN/m^2, kar je običajno dovolj, da ju veter ne potegne s strehe. Zato posebne pritrditve niso potrebne, če ne pričakujemo izrednih obremenitev s srkom vetra. Asfaltni premazi niso občutljivi na manjše spremembe konstrukcije zaradi diferenčnih posedkov zgradbe in so dovolj togi ter trdni, da prenašajo zmerne udarce tudi pri nižjih temperaturah. Zato se take izolacije uporabljajo tudi pri armiranobetonskih premostitvenih objektih.

Kritine na ravnih strehah so izdelane iz več plasti. Na vrhu je vodonepropustna asfaltna plast, ki prekriva nosilno plast izdelano iz prefabriciranih elementov (lahki beton) ali na mestu izdelane plasti (estrih). Nosilna plast je položena na plast iz materiala, ki je toplotni izolator (trdi tervol, poliuretanske pene), pod njo pa je vodonepropustna membrana (polietilenska folija), ki služi kot parna

zapora. Popolna zaščita toplotne izolacije pred vlago je nujna, saj večina toplotno izolativnih materialov izgubi del svojih izolativnih lastnosti, ko se navlaži. Namesto čvrste nosilne plasti se lahko uporabi tudi plast lahkega agregata, ki je impregniran z bitumenskim vezivom, vendar je pri tem treba poskrbeti za zaščito pred izcejanjem bitumenskega veziva skozi nižje ležeče plasti konstrukcije. Vrhnja plast je občutljiva na staranje zaradi delovanja atmosferskega sevanja, oksidacije in temperaturnih sprememb. Zato se ščiti ali s peščenimi plastmi ali z različnimi premazi z mineralnim posipom.

Bitumenski trakovi

Bitumenski trakovi se uporabljajo za prekrivanje nepohodnih streh. Bitumenski trakovi so običajno izdelani iz tkanine spletene iz impregniranih polimernih ali anorganskih vlaken in bitumenske matrice. Trakovi so večplastni in razmeroma lahki, zato jih je treba mestoma pritrditi (lepljenje) na podlago ter s tem preprečiti dvigovanje zaradi srka, ki ga povzroča veter. Trakovi morajo imeti ustrezno elastičnost zaradi prenašanja deformacij podlage zlasti še na stikih različnih površin. Dilatacije se pred polaganjem širokih trakov prekrivajo s ozkimi neprilepljenimi trakovi (okoli 200 mm). Življenjska doba trakov znaša okoli 20-25 let za razliko od asfaltnih prevlek, ki trajajo tudi do 60 let. Pri ravnih strehah so kritična stična področja, ki se pogosto poškodujejo zaradi površinske korozije, diferenčnih posedkov konstrukcije in delovanja dilatacij zaradi različnega krčenja in raztezanja podlage. Zato ravne strehe prekrite z bitumenskimi prevlekami zahtevajo redne preglede in sprotno vzdrževanje s popravili poškodovanih področij. Pri tem se poleg bitumenskih materialov uporabljajo tudi različni polimerno - bitumenski kiti in lepila.

Posebna vrsta prekrivanja ravnih streh je izdelava večplastnih bitumenskih membran na sami strehi. Ta je omejena na ugodne vremenske razmere. Bitumensko vezivo se brizga na ustrezno pripravljeno površino, ki se prekriva s tkaninami iz umetnih ali naravnih vlaken. Večkratne plasti ustvarijo gosto kritino, ki pa je občutljiva na mestih ostrih prehodov ali dilatacij. Zato je pri tem treba še večjo pozornost posvetiti načrtovanju in kakovostni izvedbi stikov in ostalih detajlov.

Vodne zgradbe

Uporaba bitumenskih mešanicah pri hidrogradnjah je dokaj razširjena. Bitumni se uporabljajo za tesnjenjne stikov med predizdelanimi betonskimi elementi ali stikov med drugimi sestavnimi deli oblog. Tako zapolnjeni stiki morajo prenašati določene premike elementov, ki jih povezujejo, brez nastanka razpok. Morajo se dobro prilegati na podlago in se ne smejo niti izcejati iz stikov pri zvišanju temperature okolja niti razpokati pri nizkih temperaturah. Tipična sestava bitumenske mešanice, ki se vliva v stike med betonskimi bloki, se sestoji iz 35 - 40% srednje viskoznega bitumna, 55 - 60% finega peska ali mivke in 5% umetnih ali mineralnih vlaken dolžine od 2 do 4 mm. Pred zapolnitvijo reg se te premažejo s bitumenskim predpremazom.

Kanali in rezervoarji

Pri izvedbi kanalov v propustnih tleh je potrebna ustrezna zaščita pred nezaželenim pronicanjem vode iz kanalov. Najbolj enostavna zaščita je bitumenska prevleka. Bitumenska veziva, ki se uporabljajo za take prevleke, morajo biti trajna, žilava in sposobna prenašati razmeroma velike premike

podlage, ne da bi se pretrgala. V ZDA se na primer v ta namen uporabljajo oksidirani bitumni z zmehčiščem pri temperaturi 85°C. Take podloge so debele okoli 6 mm in zaščitene pred poškodbami s 40 cm debelo plastjo ustrezno pripravljene zemljine.

Druga možnost zaščite in tesnjenja kanalov je uporaba bitumenskih makadamov ali pa asfaltnih betonov podobne sestave, kot se uporabljajo v cestogradnji. Makadamske strukture služijo kot nosilna plast za površinske prevleke, ki so zadosti vodotesne in odporne na površinsko erozijo. V primerih, ko je potrebna drenaža okolišnjega zemljišča, morajo obložne plasti z notranje strani prepuščati vodo, ki je pod določenim hidrostatičnim pritiskom, in istočasno preprečevati močno pronicanje vode, ki se pretaka po kanalu. Značilna porozna asfaltna podloga se sestoji iz:

- 65% grobega agregata (frakcija 16/32 mm),
- 25% finega agregata (frakcije 4/8 in 8/16 mm),
- 5% polnila in
- 5% bitumna.

Asfaltni betoni se uporabljajo tam, kjer se zahteva velika erozijska odpornost in vodonepropustnost površin kanalov. Sestava asfalt betonov mora omogočati lažjo vgradljivost kot pri asfalt betonih v cestogradnji, ker so pogoji dela pri izvedbi kanalov praviloma bolj zahtevni, površine pa morajo biti še bolj vodotesne. Mešanice vsebujejo večjo količino mineralnega polnila (10%) in bitumenskega veziva (7-8%). Bitumensko vezivo je nekoliko mehkejše kot pri primerljivi mešanici v cestogradnji.

Kamnite pregrade

Vodotesnost kamnitih pregrad na uzvodni strani se lahko doseže s polaganjem preprog iz asfalt betona. Tradicionalni način zagotavljanja vodotesnosti je uporaba glinenega jedra, ki predstavlja notranjo steno v pregradi. Pomanjkljivosti take konstrukcije so večji stroški in trajanje gradnje, saj se dejansko istočasno gradijo tri pregrade, dve zunanji kamniti in ena notranja glinena pregrada. Tesnjenje kamnite pregrade z asfalt betonsko preprogo je hitrejše in cenejše, saj se preproga lahko izdela po izgradnji enodelne kamnite pregrade, kar olajša organizacijo gradnje, pri kateri veliki delež dela opravi težka gradbena mehanizacija. Zaradi fleksibilnosti asfaltne preproge kasnejši zmerni poseki ne vplivajo bistveno na vodotesnost preproge, v primeru večjih posedkov pa je popravilo tesnilne plasti razmeroma enostavno.

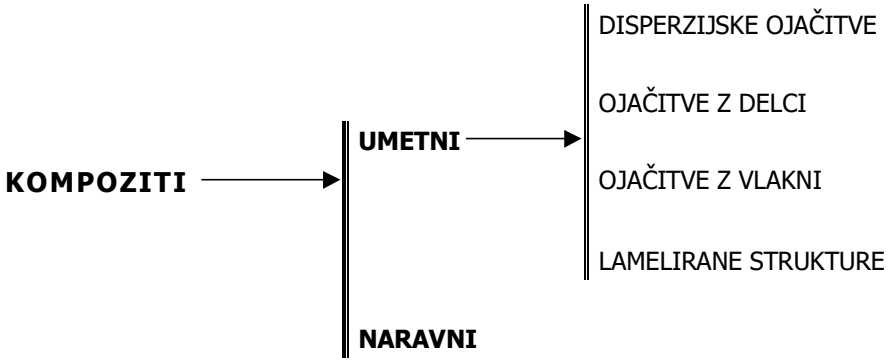
Dobro pripravljena kamnita površina pregrade se preplasti vsaj z dvema plastema asfalt betona v skupni debelini okoli 25 cm. Naklon zunanje površine je pogosto dokaj strm (od 45° do 60°), kar povzroča težave pri polaganju obloge. Zato so postopki valjanja posebej prilagojeni tem razmeram. V primerih, ko ni dostopna ustrezna količina lomljenega agregata, se lahko prevleke izvedejo tudi iz mešanic, ki vsebujejo samo pesek, polnilo in bitumensko vezivo. To so bitumenske malte, ki vsebujejo približno od 85% do 90% peska, 5% polnila in od 5 do 10% bitumenskega veziva. Zaradi slabših mehanskih lastnosti se morajo plasti prekrite z bitumensko malto še dodatno zaščititi.

VPRAŠANJA

1. Pojasnite sledeče pojme: ogljikovodikovo vezivo, bitumen, katran, asfaltni cement in asfalt.
2. Pojasnite razliko med katrani in bitumni ter opišite značilne lastnosti vsakega izmed njih.
3. Katere varnostne ukrepe moramo upoštevati pri uporabi katranov in bitumnov ter pojasnite zakaj?
4. Pojasnite pomen sprijemnosti ogljikovodikovega veziva s podlago.
5. Kako se določa viskoznost bitumenskih veziv in kateri parametri vplivajo na njeno velikost? Katere vrste viskozimetrov poznate?
6. Opišite lastnosti razredčenih ogljikovodikovih veziv, emulzij in veziv z dodatki gume.
7. Pojasnite in grafično prikažite prostorninska razmerja komponent bitumenskih mešanic ter osnovne značilnosti treh karakterističnih struktur mešanic.
8. Pojasnite naslednje pojme: obdelovalnost, trdnost, gibkost in trajnost bitumenske mešanice.
9. Kako projektiramo sestavo bitumenske mešanice in kakšna je vloga bitumna v bitumenski mešanici?
10. Navedite osnovne razloge za razširjenost uporabe bitumenskih mešanic in na kratko opišite glavna področja njihove uporabe.
11. Kakšna je vloga posameznih plasti v cestni konstrukciji in katere značilnosti materialov za izdelavo te konstrukcije so pomembne pri posameznih plasteh?
12. Naštejte in opišite osnovne lastnosti mešanic za izdelavo obrabne plasti vozišč.
13. Pojasnite razliko med vroče valjanim asfaltom, asfalt betonom in bitumenskim makadamom.
14. Opišite lastnosti in pojasnite razlike med mešanicami za podložne plasti in mešanicami za nosilne plasti cestišč.
15. Kaj so osnovne naloge bitumenskih hidroizolacij in kako se le-te dosežejo v primeru vodonepropustnih prevlek ter kako v primeru vodonepropustnih oblog?
16. Pojasnite razliko in osnovne lastnosti asfaltnih strešnih kritin in kritin z bitumenskimi trakovi.
17. Kako uporabljamo bitumenske materiale pri zagotavljanju vodonepropustnosti kanalov in kamnitih pregrad?

KOMPOZITI

HIERAHIČNA RAZPOREDITEV KOMPOZITOV



Kompoziti so materiali, ki so sestavljeni iz dveh ali več komponent. Lastnosti kompozitnega materiala se razlikujejo od lastnosti posameznih materialov, ki ga tvorijo. Večina vseh materialov, ki se uporabljajo v tehniki, so kompozitni materiali, saj so le-ti praviloma večfazni materiali. Kljub temu pa materiale kot so jekla, kovinske zlitine in nekatere polimere ne obravnavamo kot kompozite, ker se njihove komponente tvorijo neposredno iz homogenega materiala. Kompozitni materiali so v ožjem pomenu tisti, pri katerih se komponente jasno razločijo ves čas njihovega nastanka, obdelave in uporabe. V vsakem kompozitu je en material (ena faza) zvezno razprostranjen in s tem tvori matrico kompozita. Ostali materiali (ostale faze) so dodani kot ojačitve matrice. Lastnosti tako sestavljenega materiala so v veliki meri določene z velikostjo in razporeditvijo dodanega materiala. Glede na vrsto ojačitve matrice se kompoziti lahko raztvrstijo v nekaj skupin, kot je to prikazano v nadaljevanju.

Prvi umetni kompoziti so bili sestavljeni leta 1915, ko so izdelali elektroizolacijski material iz fenol-papirnatega laminata. Velik napredek je pomenila iznajdba ojačitve epoksidnih in poliesterskih matric s steklenimi vlakni ("fiberglas"). S tem so se razvila področja uporabe kompozitov za izdelavo konstrukcij. Novi materiali so bili primerni za izdelavo velikih posod, trupov ladij, pohištva ter kasneje tudi avtomobilskih karoserij in letal.

Nosilni kompoziti se običajno razporejajo v tri skupine: kompozite z razpršenimi delci, kompozite z vlakni in lamelirane kompozite. Beton sodi med kompozite z razpršenimi delci (mineralni ali polimerni agregat) v matrici (cementni kamen, bitumensko vezivo), ki z armiranjem postane tudi kompozit z vlakni (jeklena armatura). Armirano betonske konstrukcije nezadostne nosilnosti se lahko dodatno ojačijo z dolepljanjem jeklenih ali karbonskih lamel. Na ta način lahko neka armiranobetonska konstrukcija postane kompozit, v katerem so združene vse tri vrste kompozitov. Najbolj značilen lameliran kompozit pa je lesena vezana plošča, ki se zaradi izrednih mehanskih lastnosti uporablja v gradbeništvu (montažne hiše), ladjedelništvu in v letalski industriji.

Najbolj enostavni kompoziti so penasti materiali. Dodatni material je plin - velikokrat je to atmosferski plin, ki je razpršen v matrici in proti njej inerten (poliuretanske pene, penobeton itd.). Plin se uvaja v matrico kot komprimiran plin s kemično reakcijo, s penastimi substancami, z razgradnjo dodatkov v matrici itd. Penasti materiali imajo lahko zaprte celice in se uporabljajo kot konstrukcijski ali izolacijski materiali. Če imajo celice odprtega tipa, se uporabljajo kot filtri ali absorberji. Pene (poliuretanska pena na pr.) se lahko vbrizgajo v odprtine v gradivih, ki z njimi ne reagirajo in se tako uporabljajo kot toplotno, zvočno ali električno izolativni material. Največ penastih materialov je polimerov - obstaja več kakor dvajset vrst polimernih pen različnih gostot. Elastomerne pene so zelo gibke, stisljive in mehke, obstajajo pa tudi pene, ki so uporabne v nosilnih konstrukcijah ali celo take, ki se uporabljajo namesto jeklenih vzmeti.

Lepila, barve in premazi so tudi sestavni deli kompozitov. Kompozit, ki je sestavljen s pomočjo lepila, je uspešen, če je porušna trdnost stika med lamelo in lepilom večja od porušne trdnosti osnovnih lamel ali samega lepila (lepljeni lamelirani leseni nosilci, ojačitve betonskih konstrukcij z dolepljenjem jeklenih trakov). Nekatere strukture, ki so vezane z lepili, so bolj obstojne od osnovnih materialov (lepilo lahko deluje kot protikorozijski premaz), obremenitve prenašajo bolj enakomerno kot zvari ali kovinska vezna sredstva pri jeklenih konstrukcijah, vendar so temperaturno bolj občutljiva in težje je preverjanje kakovosti stikov. S premazi se ščitijo mejne površine materialov ali pa se spreminjajo njihove adhezivne lastnosti in izboljšuje estetski videz. Najbolj uspešni premazi so tanki filmi mrežastih polimerov, ki se tvorijo na površini materiala med njegovim prekrivanjem.

Disperzijske ojačitve matrice

Značilnost disperzijske ojačitve matrice so delci s premerom od 0.05 μm do 10 μm in prostorninskim deležem dispergiranega materiala od 1 do 15%. Dispergirani delci ovirajo razširitev defektov v matrici, ki je nosilec poškodb. Učinek utrditve matrice z delci je podoben utrditvi s toplotno obdelavo kovinskih materialov. Primer je kompozit iz aluminijevega prahu (matrica) z dodatkom aluminij-oksida (v dispergiranih delcih), ki ima veliko boljše mehanske lastnosti in obstojnost pri višjih temperaturah kot sama matrica. Aluminijev prah sestavljajo zelo majhne luske (debeline pod 1 μm), ki se polirajo v posebnih napravah z dodajanjem masti (stearinske kisline na pr.) zaradi doseganja visokega sijaja in povečanja površinske napetosti. Prah je osnova aluminijskih barv, uporablja se pri izdelavi poroznega betona, penaste gume in impregnaciji tkanin.

Ojačitve matrice z delci

Pri tovrstnih kompozitih imajo delci premer večji od 10 μm in prostorninski delež nad 20%. Delci ovirajo deformacije matrice in jo s tem tudi ojačijo, ker se obremenitev kompozitnega materiala razporedi na matrico in dodane delce. Deformabilnost in s tem tudi kakovost kompozita je odvisna od razmerja med moduli elastičnosti delcev in matrice. Večina komercialnih keramik od opeke do brusnih kamnov in mnogi ojačeni polimeri sodijo v to vrsto kompozitov. Primer je tudi krhka matrica polistirena (po domače "stiropor"), ki z dodatkom elastomernih delcev postane odporna na udarne obremenitve. V to skupino kompozitov sodijo ojačitve polimerne matrice s steklenimi in mineralnimi delci.

Pri brusilnih orodjih so v steklasto keramično matrico vgrajeni trdi keramični delci. Primer sodobnih materialov so kermeti, kjer so delci iz trde keramike vgrajeni v kovinsko osnovo.

Ojačitve matrice z vlakni

V to skupino sodi veliko različnih kompozitov, pri katerih ima matrica vlogo veziva, ki povezuje vlakna in jih ščiti pred zunanjimi vplivi. Vlakna so osnovni nosilci obremenitev, vendar je njihov učinek predvsem odvisen od kakovosti povezave z matrico. Vlaknaste strukture kovin in keramik visoke trdnosti imajo majhno koncentracijo defektov. Pri tankih vlaknih je mejna površina med vlaknom in matrico velika v primerjavi s površino prereza vlakna. Vlakna ojačijo matrico le v primeru, ko je trdnost stika med matrico in vlaknom večja od trdnosti same matrice. Trdnost stika se lahko zviša s premazovanjem vlaken. Pri nekaterih matricah se trdnost stika lahko doseže tudi s toplotno obdelavo. Vlakna so v matrici kontinuirana in orientirana (celulozna vlakna v lesu, steklena, ogljikova ali kovinska vlakna v polimernih matricah) ali fragmentirana in neorientirana (steklena in mineralna vlakna v polimerih matricah, kovinska vlakna v cementnih matricah). Kompoziti s fragmentiranimi vlakni so cenejši, lahko se vlivajo in lažje obdelujejo, ker imajo izotropne lastnosti. Kompoziti z orientiranimi vlakni so tehnološko bolj zahtevni in dražji, vendar imajo večjo trdnost in večjo upogibno elastičnost. Posebno kakovostni so polimerni kompoziti, ki vsebujejo orientirana karbonska vlakna.

Lamelirane strukture

To so plastoviti kompoziti, v katerih so pogosto tudi posamezne plasti kompoziti (matrice ojačene z razpršenimi delci ali z vlakni). Plasti so medsebojno povezane s polimernimi lepili ali s kemično in/ali toplotno obdelavo površin lamel v kombinaciji z mehanskimi postopki. Imajo veliko trdnost, razmeroma majhno težo in so razmeroma poceni. Znani predstavnik te vrste kompozitov je vezana plošča, ki se na veliko uporablja v gradbeništvu. Sestavljena je iz plasti lesenih furnirjev povezanih s fenolnimi ali aminskimi smolami. Vezane plošče sestavlja liho število furnirnih plasti položenih tako, da vzdolžna lesna vlakna posameznih plošč potekajo pravokotno na vzdolžna vlakna sosednjih plošč. Podobno zgradbo imajo tudi lamelirana stekla, pri katerih se kot lepilna plast uporablja polivinil butiral. Z ustrezno kombinacijo posameznih lamel se izboljšajo njihove lastnosti, ki so pogosto le enosmerno orientirane. Včasih dodajamo materiale na mestih, kjer so konstrukcijski elementi posebej obremenjeni. Na tak način se lahko ojačijo betonske konstrukcije z dolepljanjem jeklenih ali karbonskih lamel.

Posebna oblika lameliranih kompozitov so "sandwich" plošče. Notranja debelejša plast (jedro) je na obeh straneh zaprta s tanjšimi zunanjimi plastmi, ki so prilepljene na vmesno lepilno plast. Jedro je lahko izdelano iz papirnatega satovja (krila vrat) ali polimernega materiala (izolacijske plošče, z jedri iz polistirena, poliuretana, steklene ali mineralne volne). Satovje je lahko izdelano tudi iz močnejših materialov, kot je aluminij, in prekrito z aluminijevimi ploščami. Take plošče se uporabljajo v letalski industriji, ker so lahke, imajo veliko nosilnost in togost. Če se satovje napolni s penastimi polimeri, take plošče dušijo tresljaje in so hkrati dobri toplotni izolatorji.

Naravni kompoziti

Pri naravnih kompozitih srečamo vse predhodno naštete oblike. V gradbeni praksi se najbolj pogosto uporabljajo tiste vrste kompozitov, ki so po sestavi vlaknasti kompoziti (les).

11

UMETNI KOMPOZITI

UVOD

V primerih, ko lastnosti posameznih materialov ne zadoščajo, se s kombinacijo večih materialov lahko dosežejo zahtevane lastnosti. Kombinirani materiali, ki delujejo kot enovit material, so kompoziti. Kompozitni material je vsak material, ki je sestavljen iz dveh ali več komponent. Te med sabo sodelujejo tako, da so lastnosti celotnega kompozitnega materiala različne od lastnosti posamezne komponente. V nadaljevanju bomo podrobneje obravnavali kompozite s polimerno matrico, ki je utrjena z vlakni.

V praksi se pod pojmom kompoziti najbolj pogosto obravnavajo materiali, ki jih sestavlja polimerna matrica in dodani material (armatura). Običajno so armaturna vlakna oblikovana na tri načine in to kot: krajša (okoli 50 mm) v vse smeri enakomerno orientirana vlakna (matta), vzdolžno orientirana medsebojno prepletena vlakna v trakovih ali šopih (rowing) in na različne načine iz rowinga pletene tkanine. Pri laminatih se lahko kombinirajo matta, ki utrjuje polimerno matrico in armatura v obliki rowinga, v obliki tkanine ali v obeh oblikah. Armirani polimeri so po zasnovi podobni keramičnim materialom armiranim s kovinami (armirani beton), bistveno pa se razlikujejo v količini armature. Pri armiranem betonu odstotek armiranja redko dosega 5%, pri armiranih polimerih pa odstotek armiranja znaša od 35% do 65% celotnega prereza konstrukcijskega elementa. Poleg tega, natezna trdnost polimerne matrice v primerjavi z njeno tlačno trdnostjo, ni zanemarljiva kot pri betonu. Polimerne smole, ki se uporabljajo za kompozite, so žilave in to lastnost dajejo celotnemu kompozitu. Zvezna vlakna prispevajo k trdnosti in togosti kompozita, polimerna matrica pa zagotavlja prenos obremenitev in zaščito vlaken pred vplivi okolja in delno tudi pred mehanskimi poškodbami. Polimerni kompozit se pred zunanjimi vplivi (vlaga, plini, UV sevanje) in poškodbami ščiti s posebno polimerno plastjo (gel-coat), ki kompozitu daje tudi izgled (barva, tekstura). Ta plast je običajno debela okoli 0,5 mm in je materialno kompatibilna z matrično smolo, s katero se po nanosu tudi kemično veže. Značilne vrste vlaken so steklena, aramidna in ogljikova ter borova, ki so zaradi dragocenosti in izjemnih lastnosti manj prisotna pri kompozitih za gradbeništvo. Za polimerne matrice se večinoma uporabljajo duroplasti kot so nenasičeni poliestri, epoksidi, vinilestri in fenoli. Uporaba slednjih se zmanjšuje zaradi škodljivega vpliva na zdravje oseb v proizvodnem procesu. Kljub hitrem razvoju na področju novih materialov in njihovem uspešnem uvajanju v gradbeno prakso, je njihova uporaba v Sloveniji dokaj skromna in omejena samo na določena področja popravil in utrditev konstrukcij. Bodoče uvajanje teh materialov v gradbeno prakso bo odvisno od znanja o osnovnih lastnostih kompozitnih materialov primernih za gradbeništvo. K boljšem spoznavanju lastnosti novih materialov zelo prispevajo tudi

informacije dostopne na spletnih straneh njihovih razvijalcev, proizvajalcev in dobaviteljev.

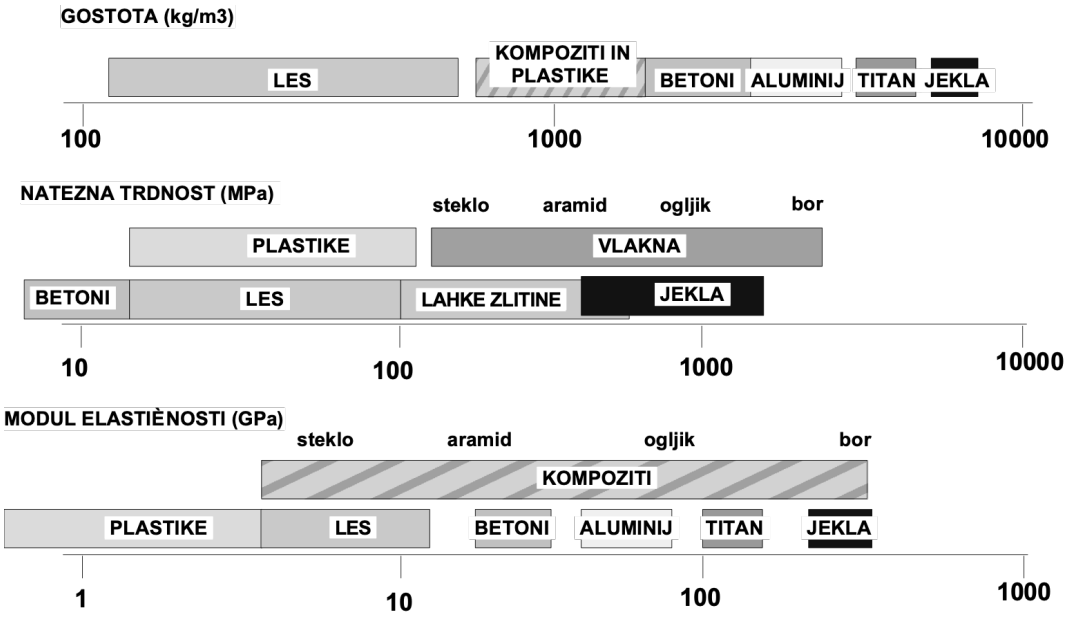
Številčne vrednosti posameznih lastnosti materialov, ki so podane v literaturi ne gre posploševati, ker veljajo izključno za določen tip materiala. Iz enakih komponent se da z spreminjanjem razmerja med matričnim materialom in armaturo ter z obdelavo obeh narediti kompozitne materiale različnih materialnih lastnosti in jih s tem prilagajati potrebam.

Prednost tradicionalnih gradiv kot so les, jeklo in beton je razmeroma nizka cena surovin in znano obnašanje. Primerna so tako za novogradnje kot za popravila in utrditve obstoječih konstrukcij. Vendar pa, novoprihajajoči materiali imajo svoje prednosti in ob nižanju cen ter ob vse bolj masovni uporabi postajajo konkurenčni. Polimere armirane z usmerjenimi vlakni so prvotno razvili za potrebe letalstva in obrambne industrije, a so se pokazali tudi kot izredno uporabni v gradbeništvu. Dokončen prodor tovrstnih gradiv, kateremu smo priča danes, je posledica znižanja cen. Tej je botrovalo spoznanje, da ekstremne lastnosti kompozitov (high-performance advanced composites) niso nujne za široko uporabo in da zadoščajo lastnosti, ki obenem zagotavljajo tudi sprejemljivo ceno (cost-performance materials). Pocenitev kompozitov je omogočila tudi poenostavitev in prilagoditev tehnoloških postopkov, ki še vedno zagotavljajo izdelavo visokokakovostnih materialov in izdelkov. Poleg tega, v gradbeništvu se lahko uporabljajo tudi kompoziti, ki so težji od kompozitov v letalski industriji a še vedno izredno lahki v primerjavi s klasičnimi gradbenimi materiali. Gradbeništvo predvsem potrebuje velike količine poceni gradiv z dolgo življenjsko dobo, ki niso zahtevni glede vzdrževanja. Pri utrditvah in popravilih konstrukcij se v zadnjem desetletju uveljavljajo laminati s pretežno enosmerno ali dvosmerno orientiranimi vlakni zaradi razmeroma enostavnih in ekonomičnih postopkov vgradnje v obstoječe konstrukcije. Te materiale odlikujejo tudi izjemne mehanske lastnosti in dokajšna korozijska odpornost.

Armirane plastične mase omogočajo projektantom snovanje konstrukcij, ki jih odlikuje optimalno obnašanje. Zaradi visokega specifičnega modula elastičnosti in specifične trdnosti (razmerja med trdnostjo in gostoto) se lahko izdelajo zelo lahke, a toge in trdne konstrukcije. Zaradi načrtovanja usmeritve nosilnih vlaken v želeno smer (smer glavnih napetosti na pr.) so take konstrukcije zelo učinkovite in ekonomične. Ob ustrezni izbiri matrice in ostalih komponent je kompozitni material lahko zelo odporen na vplive okolja in procese korozije. Izdelati se ta tudi kompozite, katerih vrednosti koeficientov toplotnega raztezka so nizke. Taki kompoziti so primerni za izdelavo termalno stabilnih konstrukcijskih elementov. Lastnost kompozitov je tudi sposobnost dušenja dinamičnih obremenitev in odpornost na utrujanje. Ustrezno načrtovani in izdelani kompoziti z ogljikovimi vlakni so praktično neobčutljivi na utrujanje. Te materiale odlikuje tudi visoka žilavost in s tem povezana sposobnost absorpcije velikih količin energije. Konstrukcije, ki so narejene iz kompozitov se razmeroma enostavno vzdržujejo in tudi popravljajo celo po nastanku lokalnih poškodb. To znižuje obratovalne stroške konstrukcije. Kompozite se da razmeroma enostavno in poceni oblikovati v različne konstrukcijske elemente, celo take, ki jih ni mogoče oblikovati z nobenim drugim materialom. Deli konstrukcije se lahko povezujejo na enostaven način, majhna teža elementov pa omogoča hitro montažo na gradbišču. Serijska izdelava večjega števila predizdelanih elementov različnih oblik je razmeroma poceni.

Uvajanje kompozitov v masovno uporabo v gradbeništvu še vedno zavirajo nekatere lastnosti, zaradi katerih bodo tradicionalni materiali verjetno še dolgo prevladovali. Izhodiščna cena kompozitov je razmeroma visoka zaradi višjih cen osnovnih materialov in v večini primerov tudi tehnologij proizvodnje. Te so manj prilagojene masovni produkciji kot tehnologije za pridobivanje tradicionalnih gradiv. Lastnosti polimernih kompozitov še niso dovolj znane širokemu krogu projektantov in izvajalcev gradbenih del, izkušnje in znanje projektantov pa so dokaj pomanjkljive. Polimerni kompoziti sodijo v kategorijo »prihajajočih materialov«, za katere ni na voljo dovolj ustrezne tehnične regulative in standardov na področju gradbeništva. Ena izmed prednosti kompozitnih materialov, ki bo prišla do izraza v bodoče, se na sedanji stopnji razvoja kaže kot pomanjkljivost. Pri uporabi kompozitov bo treba povsem spremeniti pristop k snovanju in projektiranju konstrukcij. Projektanti imajo možnost projektirati skupaj tako lastnosti materiala kot samo konstrukcijo. Pri tem morajo upoštevati soodvisnost obeh možnosti in iskati optimalne konstrukcijske rešitve in maksimalne izkoristke materiala in njegovih lastnosti. Projektanti se s tem neposredno vključujejo v procese proizvodnje materiala saj lahko naročajo materiale natančno določenih lastnosti in s tem prevzemajo tudi del odgovornosti za obnašanje materiala tekom celotne življenjske dobe konstrukcije. Te možnosti pred projektante postavljajo višje zahteve, kar bo potrebno upoštevati tudi pri vzgoji in izobraževanju bodočih generacij. Znanje o materialih je pri sedanjih projektantih pogosto pomanjkljivo tudi ko gre za tradicionalna gradiva. To zlasti velja ko gre za njihovo trajnost in spremembe lastnosti tekom celotne življenjske dobe. Problematičen je lahko vpliv lezenja polimernih smol in s tem celotnih kompozitov kakor tudi spreminjanje njihovih mehanskih lastnosti pri višanju temperature okolja. Pri kompozitih se je treba zavedati, da je njihovo obnašanje v celotnem območju uporabe večinoma linearno-elastično in da so porušitve krhke. Poleg neduktilnosti je problematična tudi njihova trajnost, če se pri izbiri materialnih komponent kompozitov ne upošteva njihova občutljivost na vplive okolja in korozijske procese.

Na sliki 71 so shematično prikazane osnovne lastnosti tradicionalnih gradiv in kompozitov. Iz primerjave prikazanih lastnosti sledi, da je gostota kompozitov le nekoliko večja od gostote lesa, natezna trdnost ogljikovih vlaken je primerljiva z natezno trdnostjo kovin, modul elastičnosti armiranih plastik pa variira v širokem področju od primerljivosti z lesom do primerljivosti s kovinami.



Slika 71: Primerjava gostote, natezne trdnosti in modula elastičnosti tradicionalnih gradiv in kompozitnih materialov (prikazane so logaritemske skale)

KOMPONENTE UMETNIH KOMPOZITOV

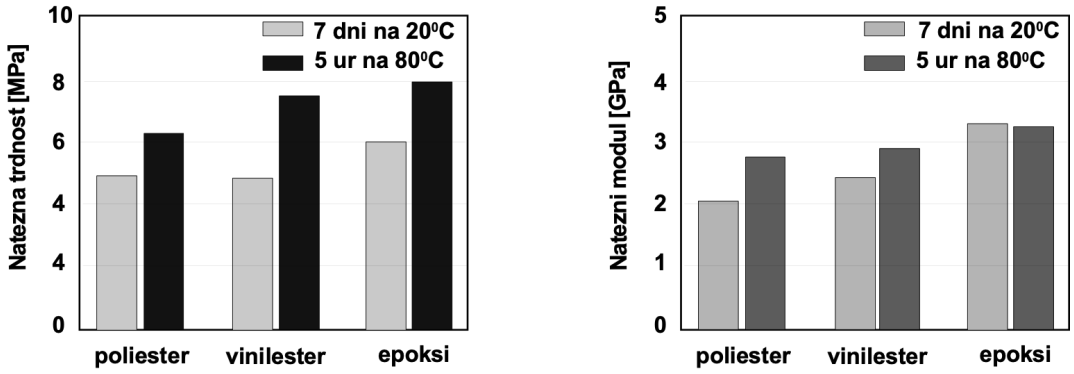
Polimerna matrica

Polimerna matrica povezuje vlakna v kompozit in zagotavlja ustrezen položaj in usmeritev vlaken. Preko matrice se prenašajo obremenitve na vlakna za kar je potrebna visoka strižna trdnost in odpornost povezave med vlakni in matrico. Trdnost in deformabilnost kompozita določa prostorninsko razmerje med matrico in vlakni (odstotek armiranja) in kakovost povezave matrice z vlakni. Matrice so iz različnih smol, izbira le-teh pa je odvisna tudi od izbire armature. Od strižne trdnosti stika matrice in vlakna so odvisne mehanske lastnosti kompozita v celoti. Zato se vlakna obdelajo z apreturo, ki se na eni strani kemično veže z materialom vlakna, na drugi strani pa z matričnim materialom. Na trajnost kompozita vplivajo procesi propadanja ki nastajajo in se razvijajo vzdolž stikov med vlakni in matrico. Od termalnih lastnosti matrice je odvisna temperaturna odpornost kompozita, saj so vlakna praviloma toplotno bolj odporna in stabilna kot matrični material. Bistveno vlogo ima lastnost amorfnega polimera, ki je znana kot "temperatura steklastega prehoda" (T_g) in ki predstavlja temperaturno mejo med območji različnih mehanskih lastnosti istega polimera. Po prekoračitvi te temperature "steklasti" močno zamreženi polimer prehaja v mehkejše stanje in dobiva lastnosti, ki so podobne lastnostim šibkeje zamreženih elastomerov.. Temperatura steklastega prehoda polimerov, ki se uporabljajo za kompozite se giblje od 150°C do 250°C (akrilne, fenolne in epoksidne smole) seže pa tudi višje (cianat esterske smole, do 350°C). Med najbolj pogosto uporabljanimi smolami za izdelavo matric kompozitov so epoksidne, nenasičene poliesterske, vinilesterske, fenolne, bismelamidne in cianat esterske smole.

Epoksidne smole se dobijo v kvalitetah, ki so primerne za različne postopke izdelave kompozitov (mokro polaganje, vakumiranje s toplotno obdelavo,

vlivanje pod pritiskom, brizganje, pultruzija, navijanje tkanin). Njihove mehanske lastnosti se lahko načrtno prilagodijo zahtevam tako, da se dosežejo želene mehanske lastnosti, žilavost, odpornost na agresivnost okolja in trajnost ob dostopni ceni, kar je zlasti pomembno pri uporabi v gradbeništvu. Z ustrezno formulacijo se lahko uporabijo tam, kjer je potrebna odpornost na povišane temperature, odpornost na udarce in odpornost na vroča in vlažna okolja. Značilnost fenolnih smol je visoka požarna odpornost, relativno nizka cena, a bistveno slabše mehanske lastnosti v primerjavi z lastnostmi epoksidnih smol. Bismelamidne smole so razmeroma drage vendar imajo odlične mehanske lastnosti tudi pri višjih temperaturah (okoli 250°C), dimenzijsko stabilnost in odlično kemično odpornost. Cianat esterske smole (policianati) imajo izredne tehnološke lastnosti, ki omogočajo izdelavo visoko kakovostnih kompozitov. Visoke mehanske lastnosti obdržijo tudi pri visokih temperaturah (do 350°C), a so zato dokaj drage. Postopki izdelave kompozitov so podobni kot pri epoksidnih smolah.

Pri izdelavi kompozitov so pomembni termalni pogoji pod katerimi se negujejo matrice do končne polimerizacije in povezave z vlaknasto armaturo. Na sliki 11-2 je prikazana razlika med nateznimi trdnostmi in moduli elastičnosti različnih polimernih smol, pri katerih je polimerizacija potekala sedem dni pri sobni temperaturi. Epoksidne smole imajo občutno višje mehanske lastnosti kot nenasičene poliesterske in vinilesterske smole. Z dodatno pet urno nego pri povišani temperaturi se polimerizacija nadaljuje tako, da se mehanske lastnosti zvišajo pri vseh treh primerjanih smolah z izjemo modula elastičnosti pri epoksidni smoli. Pri tem velja omeniti tudi krčenje smol, ki pri prehodu iz tekočega in semi-gelskega stanja v trdno pri nenasičenih poliestrih znaša okoli 8%, pri epoksidih pa le 2%. Krčenje povzroča notranje napetosti v materialu, ki znižujejo trdnost kompozita. Povzroči lahko tudi tanjšanje krovne plasti polimerne matrice nad vlaknasto armaturo, kar je težko odpraviti z naknadnimi posegi



Slika 72: Primerjava mehanskih lastnosti matričnih polimerov pri različnih negah

Armaturna vlakna

Matrice se najbolj pogosto armirajo s steklenimi, aramidnimi in ogljikovimi vlakni, nekoliko manj pa še s polietilenskimi in borovimi vlakni. Matrice se

armirajo z enosmerno orientiranimi zveznimi vlakni, ki so prepletena v dveh ali več smereh v ravnini tako, da tvorijo na različne načine tkane tkanine.

Ogljikova vlakna proizvajajo s kontrolirano oksidacijo, karbonizacijo in grafitizacijo organskih snovi, ki so bogate z ogljikom. Najbolj kakovostna vlakna se pridobivajo iz poliakrilonitrila (PAN), manj kakovostna pa tudi iz katranov in bitumnov ter iz celuloze. Z variiranjem procesa grafitacije se pridobijo ali vlakna visoke trdnosti (pri okoli 2600°C) ali vlakna visokega modula elastičnosti (pri okoli 2600°C). V primerjavi z ostalimi vrstami vlaken imajo ogljikova vlakna visoko trdnost in srednje do izjemno visok modul elastičnosti, korozijsko odpornost, odpornost na lezenje in utrujanje ter razmeroma nizko udarno trdnost. Uporabljajo se za izdelavo kompozitov visoke trdnosti in togosti. Ker so ogljikova vlakna in polimerna matrica kemično povezani, lahko stik prenaša izjemne obremenitve, kar dodatno prispeva k visoki trdnosti tovrstnih kompozitov.

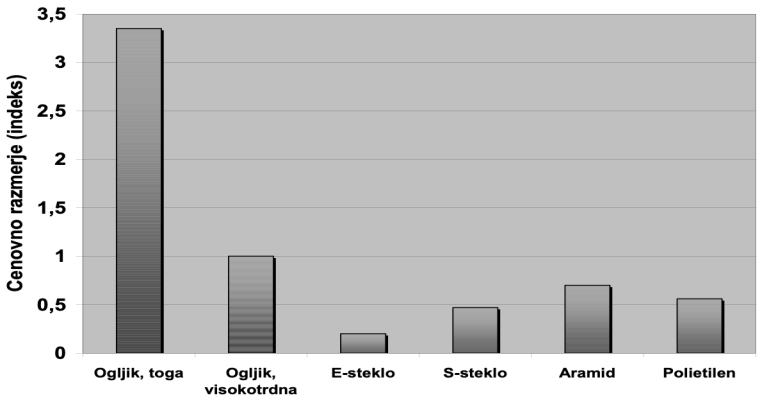
Iz taline zmesi kremenčevega peska, kaolina, apnenca in kolemanita na 1600°C se skozi tenke šobe vlečejo in hladijo steklena vlakna. Iz različnih razmerij surovin in dodatkov se izdelujejo steklena vlakna različnih vrst. V kompozitih se najpogosteje uporabljajo vlakna iz A-stekla (alkalna), E-stekla (električna), C-stekla (kemična). A-stekla so občutljiva na alkalno korozijo, E-stekla so srednje alkalno odporna C-stekla pa visoko alkalno odporna. Na trgu se dobijo tudi alkalno izjemno odporna steklena vlakna, ki pa so tudi dokaj draga (NEG ARG vlakna z visoko vsebnostjo ZrO_2). Zaradi sprejemljive cene in razmeroma dobrih tehničnih lastnosti je najbolj razširjena uporaba E-stekel. Kompoziti armirani s steklenimi vlakni so težji in imajo manjšo trdnost in togost, a so nekajkrat cenejši od kompozitov z ogljikovimi vlakni. Zaradi občutljivosti stekla na alkalno korozijo mora matrični material prenašati obremenitve in deformacije tako, da je obseg poškodb in razpok, ki bi omogočile prodor alkalij do steklenih vlaken, čim manjši. To je zlasti pomembno tam, kjer kompoziti pridejo v stik z vlažnimi betoni ali maltami.

Aramid je sintetizirani polimer iz katerega se izdelujejo vlakna z različnimi komercialnimi imeni (Twaron®, Kevlar®). Imajo veliko specifično trdnost in odpornost na udarne obremenitve. Tlačna trdnost je podobna tlačni trdnosti E-steklenih vlaken. Odporna so na toplotne obremenitve, propadanje zaradi kemičnih in toplotnih vplivov, a manj odporna na UV žarke. Aramidna vlakna so primerna za armiranje kompozitov, ki so izpostavljeni udarni obremenitvi. Taki kompoziti so sposobni absorpcije in disipacije energije in imajo visoko obrabno odpornost. V preglednici 26 so primerjane posamezne lastnosti vlaken na način, ki pokaže prednosti posameznih vrst vlaken in primernosti za različno uporabo. Oznaka A pomeni, da je obravnavana lastnost vlakna najbolj izražena, oznaka C pa da je lastnost najmanj izražena. Na sliki 73 so primerjane tudi cene posameznih vlaken.

Preglednica 26: Primerjava lastnosti različnih vlaken: A-najbolj izražena, C-najmanj izražena lastnost

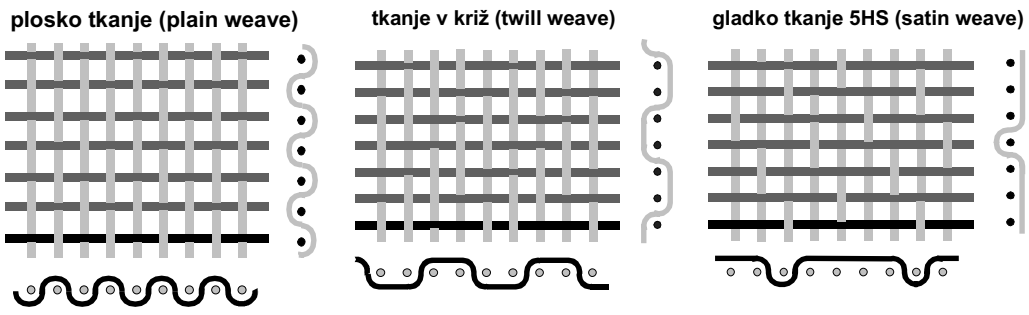
Lastnost	Aramid	Ogljik	Steklo	Lastnost	Aramid	Ogljik	Steklo
Natezna trdnost	B	A	B	Strižna trdnost v ravnini	B	A	A
Natezni modul	B	A	C	Gostota	A	B	C
Tlačna trdnost	C	A	B	Odpornost na utrujanje	B	A	C
Tlačni modul	B	A	C	Požarna odpornost	A	C	A

Upogibna trdnost	C	A	B	Toplotna izolativnost	A	C	B
Upogibni modul	B	A	C	Elektroizolativnost	B	C	A
Udarna trdnost	A	C	B	Toplotni raztezek (nizek)	A	A	A
Medplastna strižna trdnost	B	A	A	Nizka cena	C	C	A



Slika 73: Primerjava cen posameznih vrst vlaken glede na visoko trdna ogljikova vlakna (indeks 1)

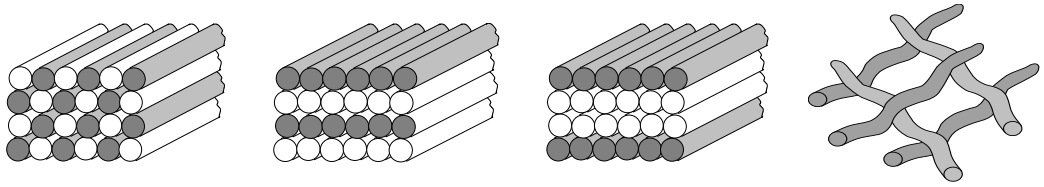
Iz vlaken se tkejo tkanine, ki so močna kompozitna armatura. Različni načini tkanja dajejo tkaninam različno togost v svoji ravnini in s tem možnost oblikovanja tudi najbolj zapletenih oblik izdelkov. Najbolj pogosto se uporabljajo tkanine, ki so stkane s ploskim, križnim in gladkim tkanjem. Niti, ki tečejo s koluta tvorijo osnovo. Niti ki jih skozi osnovo pretika čolniček tvorijo votek. Pri ploskem tkanju se niti osnove in votka prepletajo izmenično in tako ustvarjajo tkanino, ki je zelo odporna na deformacije v svoji ravnini. Dobro se prilagaja ostrim spremembam oblike profilov. Križna tkanina nastane z izmeničnim pretikanjem po dveh vlaken osnove z dvema vlakni votka. Tkanina je enaka na obeh ploskvah tako kot plosko tkana tkanina. Lažje se deformira v svoji ravnini in s tem prilagaja želeni obliki kompozitnega izdelka. Še bolj je prilagodljiva tkanina, ki nastane z gladkim tkanjem. Pri tej vlakno votka teče pod določenim številom vlaken osnove, prekriža eno vlakno osnove in ponovno poteka pod več vlakni osnove. Na sliki 74 so shematsko prikazana vsa tri opisana načina tkanja.



Slika 74: Osnovni načini tkanja vlaken

Sestavljanje komponent

Narava kompozitnih materialov je taka, da projektantu konstrukcije omogoča ne samo njihovo uporabo z upoštevanjem danih lastnosti, temveč tudi načrtovanje samih lastnosti kompozitov. To pomeni, da se lahko izdela material, ki bo na različnih delih konstrukcije imel različne lastnosti izbrane tako, da prenaša pričakovane obremenitve. Pri tem se znotraj kompozita lahko uporabijo tudi različni dodani materiali kot na primer vlakna različnih vrst. Na ta način se lahko z vgradnjo cenejših vlaken v manj obremenjene dele konstrukcije doseže večja ekonomičnost konstrukcije. Dva primera različne razporeditve dveh vrst vlaken je prikazana na sliki 75.



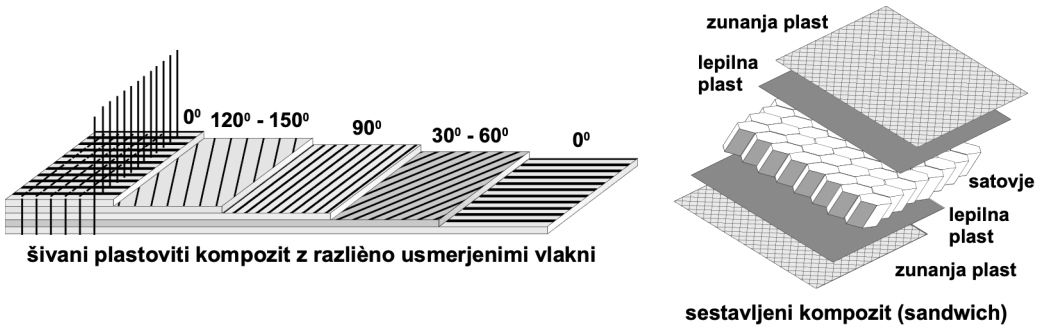
Slika 75: Različne razporeditve vlaken v kompozitnem materialu

Pri sestavljanju kompozitnih materialov se posebna pozornost posveča izboru vlaken glede na namen kompozitnega materiala. Značilnost steklenih vlaken je visoka trdnost in razmeroma velika masa v primerjavi z drugimi vlakni. Karbonska in aramidna vlakna so bistveno dražja a tudi lažja. Zato se pri izdelavi kompozitov uporabljajo različne vrste vlaken. Tako nastanejo hibridni kompoziti, v katerih vsaka izmed vrst vlaken prispeva svoj delež k doseganju želenih lastnosti materiala. Različne kombinacije vlaken v hibridnih kompozitih so shematično prikazane na sliki 75. S premišljeno razporeditvijo vlaken različnih lastnosti se lahko sestavljajo materiali ustreznih lastnosti z upoštevanjem ekonomičnosti.

Tako se na primer draga karbonska vlakna razporedijo v plasteh, ki so najbolj obremenjene, cenejša steklena vlakna pa v ostalih plasteh. S prepletanjem vlaken v tkanine se za vzdolžno bolj obremenjeno smer uporabijo močnejša vlakna. Običajno so armaturna vlakna oblikovana na tri načine in to kot: krajša (okoli 50 mm) v vse smeri enakomerno orientirana vlakna (matta), vzdolžno orientirana medsebojno prepletena vlakna v trakovih ali šopih (rowing) in na različne načine iz rowinga pletene tkanine. Pri laminatih se lahko kombinirajo matta, ki utrjuje polimerno matrico in armatura v obliki rowinga, v obliki tkanine ali v obeh oblikah. Armirani polimeri so po zasnovi podobni keramičnim materialom armiranim s kovinami (armirani beton), bistveno pa se razlikujejo v količini armature. Pri armiranem betonu odstotek armiranja redko dosega 5%, pri armiranih polimerih pa odstotek armiranja znaša od 35% do 65% celotnega prereza konstrukcijskega elementa. Poleg tega, natezna trdnost polimerne matrice v primerjavi z njeno tlačno trdnostjo, ni zanemarljiva kot pri betonu. Polimerne smole, ki se uporabljajo za kompozite, so žilave in to lastnost dajejo celotnemu kompozitu. Zvezna vlakna prispevajo k trdnosti in togosti kompozita, polimerna matrica pa zagotavlja prenos obremenitev in zaščito vlaken pred vplivi okolja in delno tudi pred mehanskimi poškodbami. Polimerni kompozit se pred zunanjimi vplivi (vlaga, plini, UV sevanje) in poškodbami ščiti s posebno polimerno plastjo (gel-coat), ki kompozitu daje tudi izgled (barva, tekstura). Ta plast je običajno debela okoli 0,5 mm in je materialno kompatibilna z matrično smolo, s katero se po nanosu tudi kemično veže. Značilne vrste vlaken so

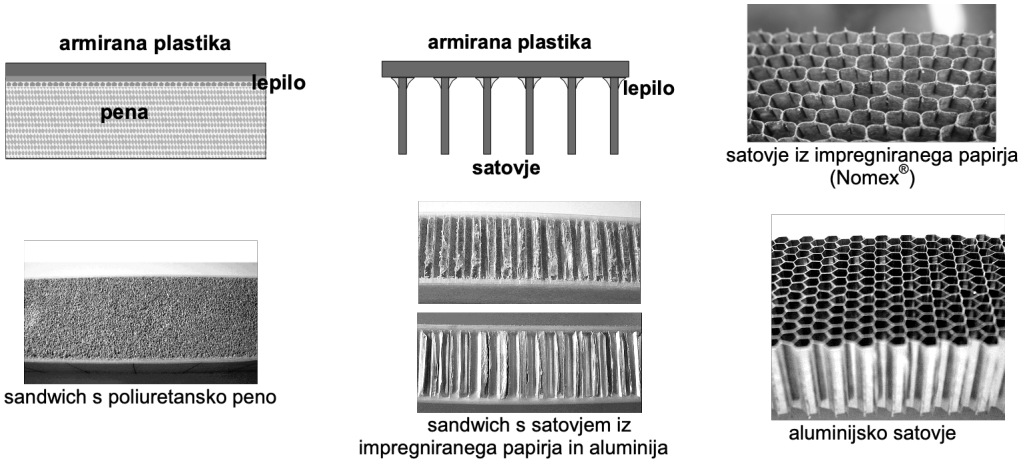
steklena, aramidna in ogljikova ter borova, ki so zaradi dragocenosti in izjemnih lastnosti manj prisotna pri kompozitih za gradbeništvo. Za polimerne matrice se večinoma uporabljajo duroplasti kot so nenasičeni poliestri, epoksidi, vinilestri in fenoli Uporaba slednjih se zmanjšuje zaradi škodljivega vpliva na zdravje oseb v proizvodnem procesu. Kljub hitrem razvoju na področju novih materialov in njihovem uspešnem uvajanju v gradbeno prakso, je njihova uporaba v Sloveniji dokaj skromna in omejena samo na določena področja popravil in utrditev konstrukcij.

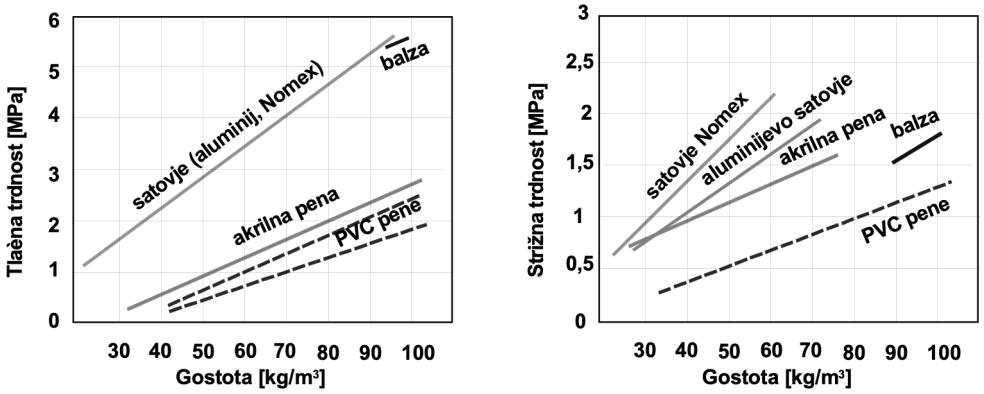
Kompozitni trakovi in plošče se lahko sestavljajo v večplastne laminatne strukture, ki se povežejo s šivanjem in tako nastanejo tridimenzionalno armirani polimerni materiali izrednih mehanskih lastnosti in velike odpornosti. Take trakove je treba apretirati po šivanju. Vsaka plast laminata je armirana z vlakni vgrajenimi pod različnim kotom glede na vzdolžno os laminata. Iz teh kompozitov se lahko oblikujejo različni konstrukcijski elementi z lokalnimi ojačitvami in želenimi lokalnimi materialnimi lastnostmi (slika 76)



Slika 76: Dve vrsti lameliranih kompozitov

Kompozitne materiale lahko sestavljamo v različne vrste sklopov, pri katerih se lastnosti posameznih komponent optimalno izkoriščajo. Med posebej učinkovite sklope sodijo sestavljeni (sandwich) sklopi (slika 77, preglednica 27).





Slika 77: Prikaz različnih jeder in primerjava njihovih tlačnih in strižnih trdnosti v odvisnosti od njihove gostote

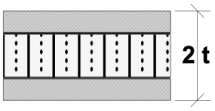
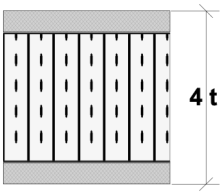
Mehanske lastnosti jedra so lahko različne v odvisnosti od uporabljenih materialov, strukture in stroškov, ki si jih lahko privoščimo. Jedro v vsakem primeru bistveno zviša nosilnost sklopa in njegovo togost ob minimalnem povečanju mase. Tanki kompozitni plasti sta prilepljeni na obe ploskvi lahkega jedra, kar ustvari podoben učinek kot je dosežen pri profilih z nosilnimi pasnicami in vmesno stojino, le da je jedro uklonsko bolj stabilno od tanke stojine. Pri sodobnih konstrukcijah se večinoma uporabljajo lahka kovinska in nekovinska jedra, ki so oblikovana kot satovje. Visoka nosilnost in togost konstrukcije se doseže z aluminijevim satovjem, ki ima visoko specifično trdnost (razmerje med trdnostjo in maso) in je razmeroma poceni. Pri uporabi kompozitnih plasti armiranih z ogljikovimi vlakni lahko pride do korozijskih problemov, če aluminijevo satovje ni izolirano z ustrezno vmesno lepilno plastjo, ki ovira galvansko korozijo. Satovje Nomex® je sestavljeno iz celic narejenih iz tankega materiala in impregniranih s potapljanjem v epoksidno smolo. Satovje ima visoko specifično tlačno in natezno trdnost (90-99% votlost), je odporno na udarce in fleksibilno, je najlažja vrsta jedra, požarno odporna in dokaj draga. V glavnem se uporablja v letalski industriji toda razvijajo se tudi druga področja uporabe. Cenejše vrste satovja so narejene iz termoplastov. Njihove lastnosti so veliko slabše, izdelava kakovostnih elementov pa težavna zaradi problemov povezanih z lepljenjem kompozitnih plasti na površino satovja.

Poleg satovja, se kot jedro uporablja tudi lahek les balza in različne polimerne pene. Jedro iz balze ima visoko tlačno trdnost in je dober toplotni in zvočni izolator. Slaba lastnost je relativno velika gostota in poroznost, tako da je površino jedro iz balze potrebno pred polaganjem kompozitnih plasti impregnirati. Polimerne pene so veliko lažje od balze. Uporabljajo se pene iz polivinilklorida (PVC), polistirena (PS), poliuretana (PU), akrila (PMMA), stirenakrilonitrila (SAN) in politermida (PEI). PVC pene so uporabne v temperaturnem območju do 80°C, ne vpijajo tekočin in so odporne na mnoge kemikalije, imajo uravnovešene statične in dinamične materialne lastnosti ter so najpogosteje uporabljane pene v sestavljenih kompozitnih. Najboljše mehanske lastnosti imajo akrilne pene, ki so odporne na višje temperature kot PVC pene, a so tudi dražje. SAN pene so podobne PVC penam, le da so bolj žilave. PEI pene so požarno bolj odporne kot ostale polimerne pene, prenesejo temperature do 180°C, vendar so drage.

Gostejši materiali, ki jih uporabljajo za jedra imajo tudi višje strižne in tlačne trdnosti, kar je pomembno upoštevati pri načrtovanju sestavljenih kompozitov.

Na sliki 7 je prikazana odvisnost teh dveh mehanskih lastnosti od gostote različnih materialov. Pri lažjih jedrih iz pen so pore večje in je zato poraba polimernih smol za zunanje plasti večja, kar poveča tudi maso celotnega sestavljenega kompozita. Pri satovjih se da doseči zelo majhna zapolnitev odprtin s smolami, če se te dobro prilepijo na tenke stene satovja. Zato je tako sestavljeni kompozit izredno lahek.

Preglednica 27: Vpliv debeline jedra na lastnosti sestavljenega kompozita

	 laminat brez jedra	 laminat z jedrom debeline t	 laminat z jedrom debeline 3t
Relativna togost	1	7	37
Relativna upogibna trdnost	1	3,5	9,25
Relativna masa	1	1,03	1,06

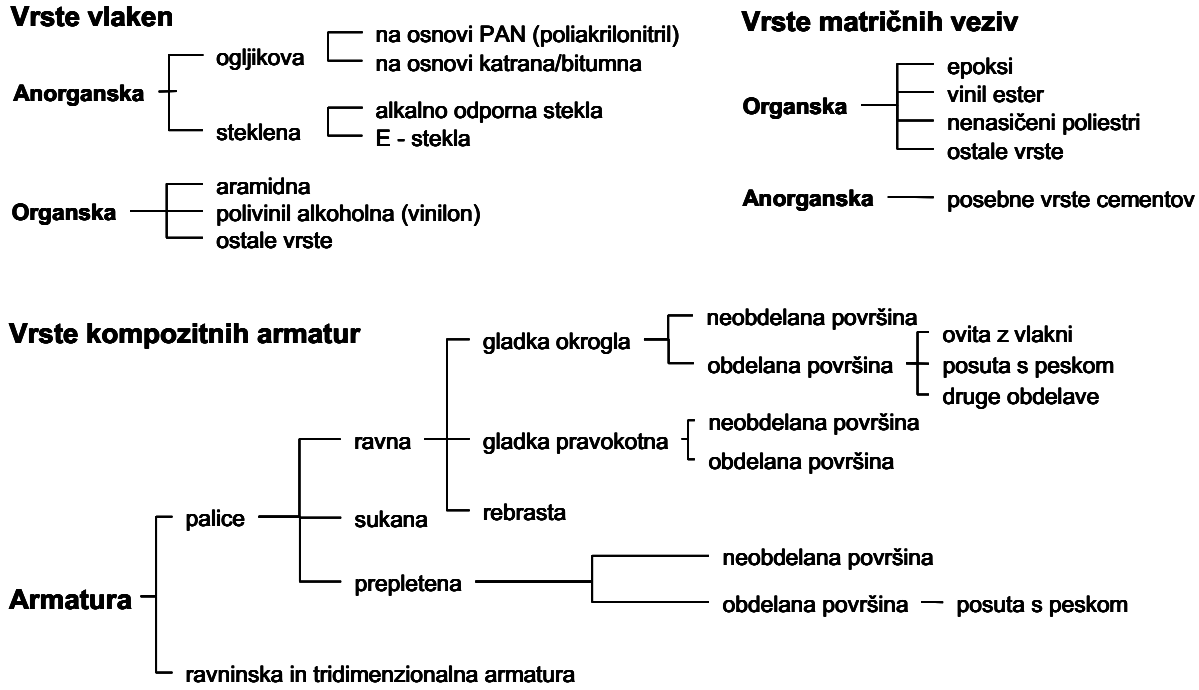
BETONSKA ARMATURA

Ena izmed možnih uporab armiranih plastik je tudi izdelava armature za konstrukcijske in nekonstrukcijske betonske elemente, ki ima v določenih primerih prednost pred tradicionalno jekleno armaturo. Na Japonskem so po štiriletnih teoretičnih in eksperimentalnih raziskavah že leta 1993 izdali prva navodila za dimenzioniranje betonskih konstrukcij armiranih s tovrstno armaturo. Leta 1996 so v Kanadi zšli predpisi, ki obravnavajo uporabo kompozitne armature pri projektiranju avtocestnih mostov. Leta 1998 so izšla priporočila za dimenzioniranje tudi v ZDA. V Evropi je v zadnjih petih letih raziskavam možnosti uporabe kompozitne armature posvečeno nekaj projektov. Med rezultati teh preiskav je tudi demonstracijski most zgrajen leta 1997.

Na sliki 78 so naštete vrste vlaken, matric in oblike armature za betonske konstrukcije, kot so sistematično obravnavane v japonskih navodilih za dimenzioniranje. Kompozitne palice se zaradi povečanja sprijemne trdnosti z betonom pogosto površinsko obdelajo z nalepljanjem kremenčevega peska, z ovijanjem vlaken ali s profiliranjem površine matrice. Za razliko od z jeklom armiranega prereza, mora s kompozitnimi palicami armiran prerez biti predimenzioniran, saj kompozitne palice niso duktilne in je njihova porušitev krhka. Minimalni odstotek armiranja je pogojen s preprečitvijo nateznega pretrga kompozitnih palic. To pomeni, da se pri dimenzioniranju vedno upošteva mehanizem krhke porušitve betona v tlaku bistveno pred izčrpanjem trdnosti kompozitne armature. Pri betonih, ki se jih želi armirati s polimerno kompozitno armaturo je treba posebno pozornost posvetiti njihovi modifikaciji zaradi zagotovitve kompatibilnosti betona in armature. Modul elastičnosti betona je treba kar se da približati modulu elastićnosti kompozitne armature in zagotoviti bobro sprijemnost armature in betona. V preglednici 28 so naštete prednosti in pomanjkljivosti kompozitne armature, ki jih je treba upoštevati pred odločanjem o njihovi uporabi.

Preglednica 28: Primerjava prednosti in pomanjkljivosti kompozitne armature

Prednosti	Pomanjkljivosti
Specifična trdnost (10-15 višja kot pri jeklu) Korozijska odpornost Elektromagnetna nevtralnost Odpornost na utrujanje (pri ogljikovih in aramidnih vlaknih 3 krat višja kot pri jeklu) Nizek koeficient toplotnega raztezka	Visoka cena Nizek modul elastičnosti (aramid in steklo) Nizka porušna deformacija v primerjavi z jeklom Dolgotrajna trdnost nižja od trenutne statične Možne poškodbe zaradi UV žarčenja Vprašljiva trajnost aramida in stekla v vodi Neznana trajnost stekla v alkalnem okolju Vprašljiva odpornost na utrujanje steklenih vlaken



Slika 78: Pregled materialov in vrst kompozitnih armatur za beton

Prednosti armiranih plastik (visoka trdnost, razmeroma nizek modul elastičnosti v primerjavi z jeklom, elastično obnašanje) so bolje izkoriščene pri prednapenjanju ali ponapenjanju. Kabli z steklenimi, aramidnimi ali ogljikovimi vlakni imajo do 70% prostorninskega deleža vlaken. Oblikovani so kot palice s krožnim prerezom, ploski trakovi, kabli z 7, 19 ali 37 prameni in kot pleteni kabli. Natezne lastnosti kablov so odvisne od vrste vlaken in matrice, prostorninskega razmerja vlaken in matrice, načina izdelave, premera palic (palice večjega premera so razmeroma manj nosilne) in sistema sidranja kablov. Kabli z aramidnimi in ogljikovimi vlakni so primerni za vgradnjo v beton, za razliko od kablov s steklenimi vlakni, ki so manj odporna na alkalno korozijo. Pri odločitvi o uporabi kablov iz armirane plastike je treba posebej preučiti probleme, ki lahko nastanejo zaradi relaksacije, lezenja, nateznega utrujanja, sprijemnosti med kompozitom in betonom, vnosom sil prednapenjanja in ostalim vplivom, ki se pri kompozitnih kablih kažejo na drug način kot pri jeklenih kablih. Zaradi nižjega modula elastičnosti kompozitnih kablov so nižje tudi izgube prednapetja zaradi manjšega vpliva lezenja betona, krčenja in ugrezanja sidrišč v beton. Različne vrste kompozitnih kablov različno relaksirajo. V splošnem je relaksacija kablov s steklenimi in ogljikovimi vlakni velikostnega reda relaksacije jeklenih kablov, relaksacija kablov z aramidnimi vlakni pa večja. Posebno pozornost je treba posvetiti načinom sidranja kablov, ki so praviloma tehnološko bolj zahtevni od sidranja jeklenih kablov.

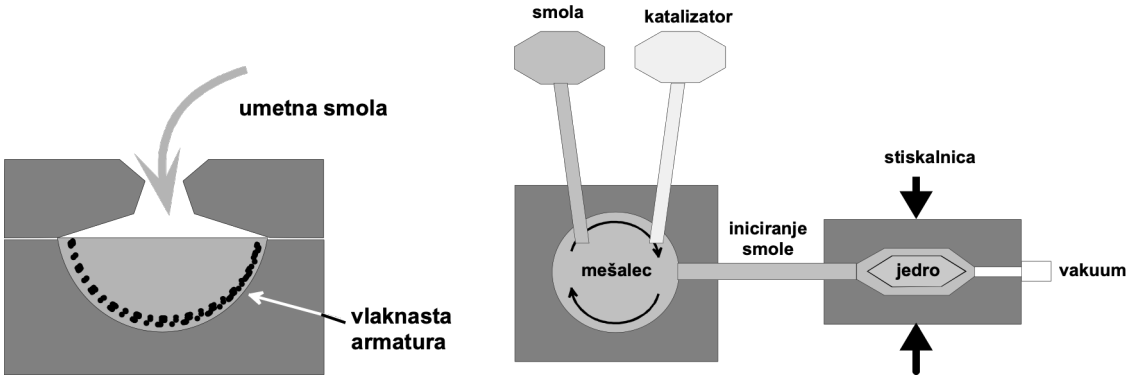
IZDELAVA KOMPOZITOV

Kompoziti se lahko izdelujejo z ročnim polaganjem posameznih plasti, vlivanjem pod pritiskom, lameliranjem, navijanjem vlaken in vlečenjem (pultruzija). Najstarejši način izdelave polimerov je ročno polaganje plasti ali vlivanje polimernih matric z ojačitvenimi vlakni v kalupe. Polimerna smola se lahko ročno nanaša na ojačitvena vlakna ali tkanino. Preko nje se polaga druga plast ojačitve. Z ročno izdelavo kompozitov se gradijo in popravljajo plovila in druga vozila. Na ta način se lahko izdelujejo kompoziti z minimalno potrebno opremo na sobni temperaturi.

Pri "prepreg" postopku se nosilna tkanina impregnira s smolo pred izdelavo kompozitnega materiala. Med polaganjem na kalup se tkanina segreva in nato hladi s hladnim zrakom tako, da dobi želeno obliko. Izdelki se nato negujejo pri povišani temperaturi in pod določenim tlakom.

Vlivanje smol v dvodelne kalupe je prikazano na sliki 11-9. Ojačitveni material se nahaja razporejen po dnu kalupa. Na ta način se lahko izdelki proizvajajo razmeroma hitro, ker so časi nege krajši, izdelki pa so cenejši tudi zaradi enostavnosti postopka.

S postopkom vlivanja polimerne matrice pod pritiskom (slika 79) se lahko izdelujejo izdelki z jedrom (epoksidna pena). Jedro se ovije z grafitnimi vlakni, polimerna matrica (epoksidna smola) pa ga enakomerno oblije. Po približno petih minutah se izdelek lahko odstrani iz kalupa.

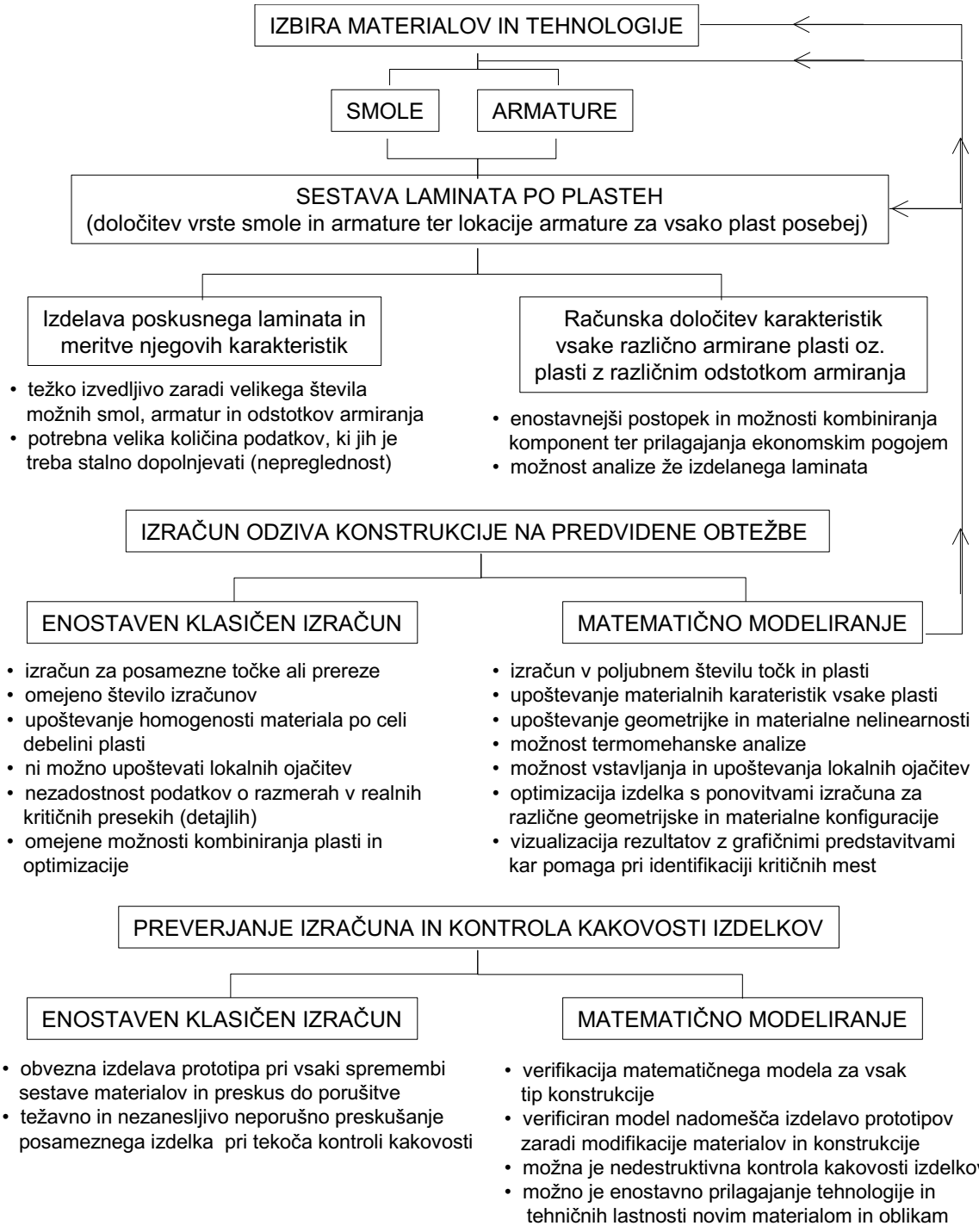


Slika 79: Vlivanje smole v kalup in izdelava kompozitov z vlivanjem pod pritiskom

Ena izmed osnovnih pomankljivosti kompozitov je razmeroma zamudna proizvodnja elementov, ki povečuje stroške. Cena osnovnih materialov je tudi razmeroma visoka. Vendar pa mnoge prednosti, ki jih imajo kompozitni materiali, vse bolj povečujejo njihovo zastopanost v praksi. S povečanjem količine in razširitvijo področij uporabe pada tudi njihova cena, kar jim bo v bodoče še povečalo uporabnost.

Pri konstruiranju in optimizaciji izdelkov iz laminatov zaradi zahtevnosti morata tesno sodelovati tehnolog in projektant. Pogosto so potrebne tudi spremljevalne eksperimentalne preiskave materialov in njihovih sklopov ter razvoj in eksperimentalna verifikacija matematičnih modelov. Slika 80 prikazuje pristop k projektiranju, kot ga na osnovi dolgoletnih izkušenj s preiskavami in dimenzioniranjem poliesterskih laminatov predlaga Makarovič, ki

je pred štirinajstimi leti s sodelavci opravil obsežne laboratorijske raziskave poliesterskih laminatov. Prikazani pristop je na splošno primeren za projektiranje in optimizacijo konstrukcij iz zgrajenih kompozitov, zlasti še, ker je danes na voljo kakovostna programska oprema in visoko zmogljivi računalniki. Prednosti računsko podprtega načrtovanja so očitne.



Slika 80: Postopki konstruiranja in optimizacije izdelkov iz laminatov (dimenzioniranje, obtežba, temperaturni pogoji, kemijska odpornost in ostale zahteve)

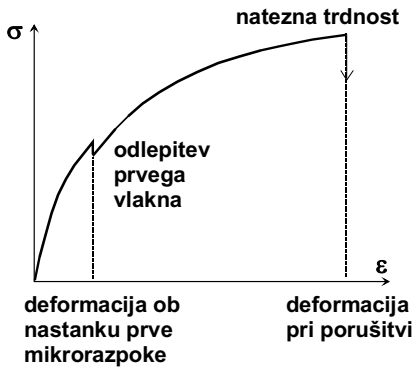
TRAJNOST ARMIRANIH PLASTIK

Armirane plastike so izpostavljene različnim vplivom, ki povzročajo njihovo staranje in propadanje. Korozijski procesi so manj izraziti in bolj počasni kot

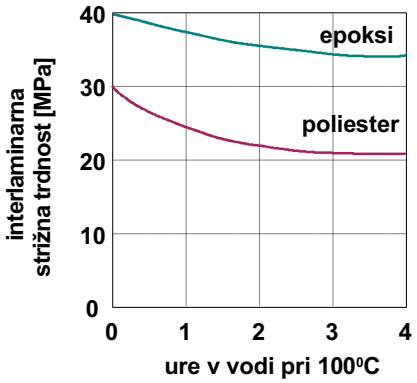
pri mnogih tradicionalnih materialih, a so posledica kemične zgradbe komponent in njihove odpornosti na različne agense. Armirane plastike so tudi občutljive na nastanek in širjenje mikrorazpok ter utrujanje. Pri armiranih plastikah, ki so izpostavljene vlažnem okolju ali so potopljene v vodo, sta pogost vzrok za pospešeno propadanje tudi pronicanje vode in osmoza. Procese propadanja ovirajo zaščitne plasti na zunanjih površinah armiranih plastik (gel-coat) in obdelave armaturnih vlaken (apreture) vendar jih v veliko primerih na daljši rok ne morejo povsem ustaviti.

Razvoj in vpliv mikrorazpok ter odpornost kompozita na utrujanje

Razširjeno mnenje je, da je trdnost laminatov enaka njihovi porušni obremenitvi, pri kateri se zlomi matrična plastika in pretrgajo vlakna. Vendar pa se že pred to obremenitvijo doseže napetostno stanje pri katerem se matrična osnova začne ločevati od vlaken, ki ne potekajo povsem v smeri delujoče obremenitve. Te razpoke se postopoma širijo skozi matrico in se povezujejo v mrežo mikrorazpok. Tako se začne proces porušitve. Pri projektiranju trajnih konstrukcij iz laminatov je treba upoštevati mejo nastanka prvih mikrorazpok kot merodajno mejo, ki jo je pri projektiranju treba upoštevati kot začetek procesa zmanjševanja nosilnosti armature (Slika 81).



Slika 81: $\sigma - \varepsilon$ diagram laminata z vidno mejo nastanka mikrorazpoke



Slika 82: Primerjava izgube medplastne strižne trdnosti epoksidnega in poliesterskega laminata s stekleno tkanino pri pospešenem propadanju

Deformacije, ki jih lahko doseže laminat pred pojavom prvih mikrorazpok, so odvisne od žilavosti in lepilnih lastnosti matričnega materiala. Pri krhkih smolah, kot so npr. določene kvalitete nenasičenih poliestrov, nastanejo mikrorazpoke zelo zgodaj in s tem omejujejo možnost varnega deformiranja laminata. Glede na podatke iz literature, se pri nenasičenih poliestrih armiranih s steklenimi tkaninami mikrorazpoke pojavijo že pri deformacijah nekaj krat nižjih od deformacij doseženih pri porušitvi laminata. Epoksidne smole so bolj odporne na nastanek in razvoj mikrorazpok kot so nenasičene poliesterske smole.

Glede na to, da je trdnost laminata odvisna od pretrga vlaken v celoti, mikrorazpoke ne vplivajo takoj na nosilnost laminata. Razpokani laminat vsrka veliko več vlage kot nerazpokani. Zaradi tega se poveča njegova masa, vlaga reagira z nepolimerizirano smolo v žepkih in povzroča odlepljanje vlaken. Posledica je zmanjšanje togosti laminata in znižanje njegovih mehanskih lastnosti.

Odpornost kompozitov na utrujanje je višja od odpornosti večine kovin. Porušitev zaradi utrujanja je odvisna od postopne akumulacije malih poškodb. Zato je tudi odpornost na utrujanje kompozitov odvisna od žilavosti matričnega materiala, njegove odpornosti na nastanek in širjenje mikrorazpok in količine por in drugih napak v materialu, ki so nastale med njegovo izdelavo. Mehanizem porušitve zaradi utrujanja lahko nastopi zaradi pretrga posameznih vlaken znotraj matrice, odlepljanja vlaken od matrice, nastanka in širjenja razpok v matrici in medplastne strižne porušitve.

Propadanje zaradi vdora vode in zaradi osmoze

Pomembna lastnost sintetičnih smol je njihova odpornost na vplive vode, ki posebej pride do izraza pri kompozitih v zelo vlažnih okoljih. Vsaka armirana plastika vpija določeno količino vode, kar povečuje njeno maso. Pomembno je, kako absorbirana voda dolgoročno vpliva na lastnosti matrice in na lastnosti stičnih površin med matrico in vlakni. Vinilesterske in nenasičene poliesterske smole so občutljive na vplive vode zaradi vodotopnosti esterjev, ki tvorijo molekularno zgradbo. Zato tanki poliesterski laminati po enem letu potopitve v vodo lahko izgubijo tudi do 35% medplastne strižne trdnosti. Pri bolj odpornih epoksidnih laminatih ta izguba znaša okoli 10%. Na sliki 9 je prikazana primerjava znižanja medplastne strižne trdnosti epoksidnih in poliesterskih laminatov armiranih s stekleno tkanino pri pospešenem propadanju zaradi potopitve v vodo segreto na 100^0C.

V morskem okolju se skozi laminate giblje majhna količina vodne pare. Pri počasnem prehodu skozi polimerno okolje vodna para reagira z vodotopnimi komponentami polimera in ustvarja pore zapolnjene s koncentrirano raztopino. V osmotskem ciklu se postopoma povečuje pretok vode skozi tako ustvarjeno polprepustno membrano, ki redči raztopino. Voda povečuje pritisk znotraj por do okoli 5MPa, kar povzroča poškodbe. Te so vidne na površini kompozita v obliki ujetih mehurčkov. Znotraj por se lahko nalagajo tudi nečistoče, ki so posledica nizke kakovosti proizvodnje kompozita kakor tudi molekule esterja, ki so se izločile iz poliesterskih ali vinilesterskih makromolekul. Ko se je proces osmotskega propadanja sprožil, je edini način popravila odstranitev poškodovanega dela kompozita v izogib nadaljnjem širjenju propadanja.

Uveljavljanje armiranih plastik v gradbeništvu je pogojeno s poznavanjem njihovih osnovnih lastnosti in omejitev primernosti uporabe. Zaradi nekaterih lastnosti, kot so korozijska odpornost in velika specifična trdnost, ponujajo ekonomične in trajne rešitve mnogih konstrukcijskih problemov. Posebej so primerne za popravila in utrditve obstoječih konstrukcij izpostavljenih zahtevnim vplivom okolja ali izrednim obtežbam kot je potres. Z razvojem standardov in specifikacij ter metod projektiranja bo uporaba armiranih plastik stalno naraščala.

Pri uporabi armiranih plastik je treba razviti občutek za posebnosti tega materiala in le te izkoristiti kot njihovo primerjalno prednost glede na

tradicionalne materiale. Uspešna in racionalna uporaba armiranih plastik je tudi pogojena z izkoriščanjem njihovih posebnih lastnosti tako, da se ne skušajo obravnavati na enak način kot kateri od bolj znanih tradicionalnih materialov. Pri tem pa se je treba zavedati omejitev, ki jih narekujejo lastnosti materialov, ki tvorijo kompozite. Najbolj osnovne omejitve izvirajo iz upoštevanja temperaturnih območij v katerih so polimerni kompoziti uporabni. Že pri temperaturah okoli 60°C so mehanske lastnosti nekaterih kompozitov bistveno drugačne kot pri sobni temperaturi, še posebej pa je lahko problematična požarna odpornost kompozitnih konstrukcij. Zato je pri snovanju kompozitnih konstrukcij in utrditev klasičnih konstrukcij s kompoziti posebej treba načrtovati tudi zaščito pred segrevanjem in požarom.

Preglednica 29: Stanje na področju uvajanja armiranih plastik v gradbeno prakso

Problem	Stanje
Dostopnost materialov	velika
Raznolikost produktov	velika
Tehnološka raven	visoka
Cena	postaja konkurenčna
Znanje o mehaniki konstrukcij	razmeroma dobro
Razumevanje mehanizmov obnašanj	neenakomerno razširjeno
Podporne podatkovne baze	omejene
Standardi in specifikacije	pomanjkanje
Metodologija dimenzioniranja	začetniška
Zaupanje v zanesljivost konstrukcij	slabo

Konzervativnost gradbeništva kot panoge je razumljiva s stališča zagotavljanja varnosti konstrukcij, kar se odraža tudi pri popravilu in utrditvi obstoječih objektov. Zaradi te značilnosti se novi materiali in tehnologije bolj počasi uvajajo v gradbeno prakso kot v druge veje tehnike. Vendar pa so izkušnje pridobljene tekom petdesetih let uporabe armiranih plastik v tehniki pomagale prodoru teh materialov v gradbeništvo zadnjih deset let. V preglednici 29 je prikazano stanje na področju uvajanja armiranih plastik v gradbeništvo, ki je glede na podatke iz literature veljalo leta 2000. Očitno je, da je konzervatizem, ki je razlog za nizko stopnjo zaupanja v zanesljivost konstrukcij še vedno ena osnovnih ovir večji uporabi teh sodobnih materialov. Z boljšim spoznavanjem novih materialov in uvajanjem ustrezne tehničnih specifikacij ter pridobivanjem ustreznih znanj bodo ti materiali kmalu postali del široke palete gradiv, katera so na voljo sodobnim graditeljem.

VPRAŠANJA

1. Kaj je osnovna značilnost kompozitov in kako so sestavljeni?
2. Naštejte osnovne vrste umetnih kompozitov in opišite njihove značilnosti.
3. Opišite značilnosti ojačitve matrice z disperzijo drobnih delcev.
4. Opišite značilnosti ojačitve matrice z razpršenimi delci.
5. Opišite značilnosti vlaknasto ojačane matrice.
6. Opišite značilnosti lameliranih struktur.

7. Pojasnite prednosti projektiranja konstrukcij iz umetnih kompozitov glede na možnosti vpliva projektanta na sestavo materialov.
8. Katere so glavne ovire množični uporabi umetnih kompozitzov v gradbeništvu?
9. Grafično prikažite primerjavo med gostotami, trdnostmi im moduli elastičnosti tradicionalnih materialov in umetnih kompozitov.
10. Pojasnite vlogo polimerne matrice pri umetnih kompozitih in njen vpliv na lastnosti kompozita.
11. Opišite način proizvodnje ogljikovih, steklenih in aramidnih vlaken.
12. Pojasnite vlogo vlaken v umetnih kompozitih in njihov vpliv na lastnosti kompozita.
13. Navedite prednosti in pomanjklivosti kompozitne armature za armiranje betona
14. Opišite značilne postopke izdelave umetnih kompozitov.

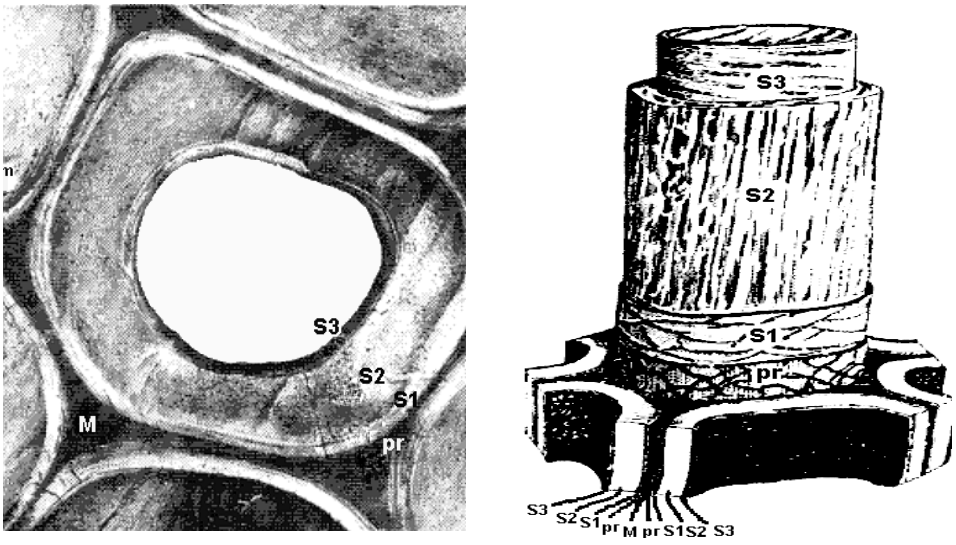
12

NARAVNI KOMPOZITI

LES

Les je od nekdaj predstavljal eno izmed osnovnih dobrin, ki si jih je prisvojil človek. Njegovo vrednost in plemenitost dokazuje uporaba od prvih bivališč dalje in sodobna uporaba za mnoge namene, od katerih je vloga odličnega gradiva samo ena izmed njih. V tehničnem smislu je les naravni, vlaknasti, organski kompozitni material, ki je večinoma sestavljen iz celuloze, olesenel pa je zaradi vložkov iz lignina.

Večina lesne snovi je sestavljena iz kemičnih snovi visoke molekularne teže. Suho lesno snov tvorijo ogljikovodiki (okoli 3/4 celotne suhe teže), fenolne snovi (20-30%), terpeni (do 5% v iglavcih, zelo malo v listavcih) in ostale snovi (kisline, alkoholi, proteini, anorganske snovi). Ogljikovodiki so v glavnem polisaharidi - celuloza, hemiceluloza, škrob, pektinske snovi in v vodi topni polisaharidi. Celuloza tvori približno polovico vse suhe lesne snovi.

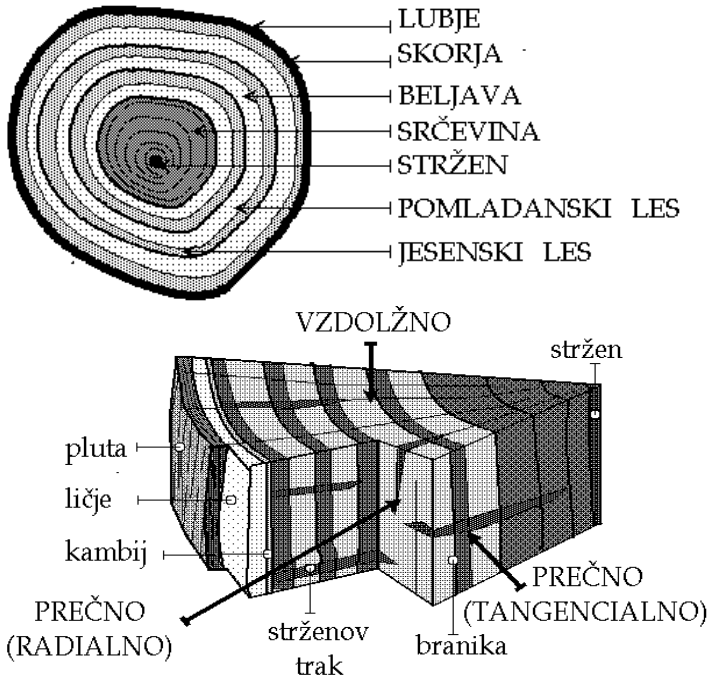


Slika 83: Prečni prerez in shematski prikaz traheide iglavca

Osnovni gradnik lesa je celica. Ko je še živa ima membrano in protoplazmo. Z odmiranjem celice protoplazma izgine, ostane membrana, praznino pa zapolnjujeta voda in zrak.

Celično membrano tvori pet plasti (slika 83) - osrednja lamela (M), primarna ovojnica (pr) in tri plasti sekundarne ovojnice (S1, S2, S3). Osrednja lamela je amorfna in izotropna, ostale plasti pa tvorijo mikrofibrili (snopiči celuloznih in

polisaharidnih verižnih molekul), ki so različno usmerjeni v posameznih plasteh ovojnic. Osrednjo lamelo tvori samo lignin (fenol-propanski mrežasti polimer - oporna snov lesa). V primarni ovojnici je poleg večinskih sestavin lignina, hemiceluloze (polimerizirana celuloza) in pektina (visokomolekularni polisaharid) še okoli 20% celuloze. V sekundarni ovojnici je okoli 50% celuloze in manjši odstotek lignina. Celična membrana je pri mladi rastlini tanka, ko drevo raste pa se srednja plast (S2) sekundarne ovojnice neenakomerno debeli. Pri tem nastajajo tudi piknje (neodebeljeni deli sekundarne ovojnice), ki olajšujejo izmenjavo snovi med celicami.



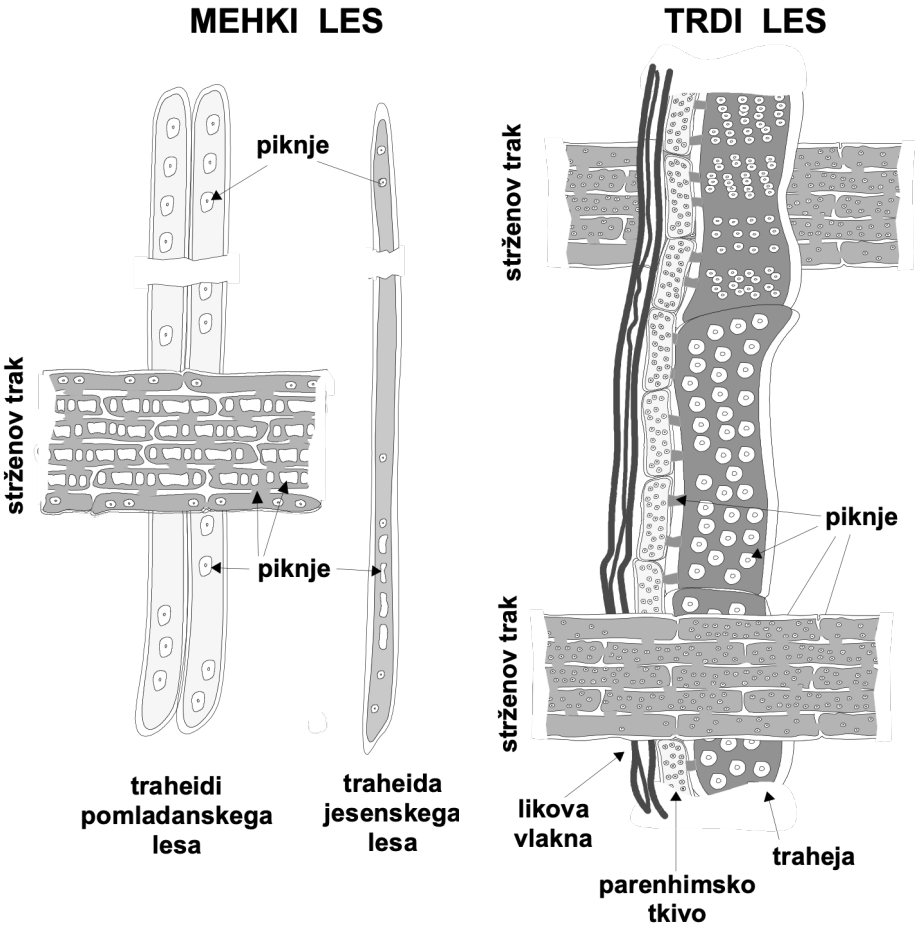
Slika 84: Značilnosti prereza lesnega debla

Strukturo lesa tvorita dve skupini tkiv: tkivo, ki služi fiziološkim nalogam (hranjenju, izločanju rezervnih snovi in izločanju odpadnih snovi) in tkivo, ki nosi celotno zgradbo (zagotavlja trdnost in togost lesa). V prvi skupini ločimo tkivo, ki prevaja snovi (traheide in traheje) in tkivo, ki akumulira in razporeja hranljive snovi (parenhimsko tkivo). Prevajanje vode in rudninskih snovi ter nalaganje rezervnih snovi sta omejena na mlajši, zunanji del lesa (beljava). Starejši, osrednji in ponavadi temnejši del (srčevina ali črnjava) daje rastlini trdnost in oporo (slika 84).

Značilne in prevladujoče celice iglavcev so traheide - ozki prevajalni elementi, ki pri mladem lesu opravljajo fiziološke naloge s prevajanjem snovi, pri staremu lesu pa opravljajo mehanske naloge. Traheide so podolgovate na obeh straneh zaprte celice, ki hranljive snovi izmenjujejo skozi piknje. Pri listavcih snovi prevajajo traheje. Nastale so iz zaporedno nameščenih celic, katerih prečne stene so se razgradile ali so preluknjane, vzdolžne stene pa so se močno odebelile. Na prečnih prerezih lesa jih lahko vidimo kot pore enake ali neenake velikosti. Nosilno vlogo pri listavcih imajo likova vlakna. Parenhimsko tkivo se sestoji iz več vrst parenhimskih celic (prečne, vzdolžne in epitelne) in medceličnih prostorov. Pri iglavcih in listavcih so s prostim očesom vidni radialno potekajoči strženovi trakovi, ki jih tvorijo prečne parenhimske celice. Vzdolž debla iglavcev potekajo tudi povezani medcelični kanali - smolni kanali -

po katerih se iz sosednih celic izloča smola. Na sliki 85 je prikazana sestava lesnega tkiva.

Rast lesa omogoča lesno tkivo kambij, ki se sestoji od lahko deljivih celic, predvsem v radialni smeri. S tem le te povzročajo debelitev lesnih vlaken in vmesnega prostora. Deblo raste v radialni smeri v obliki koncentričnih plasti. Vsaka plast predstavlja letni prirastek - letnico. Zaradi periodičnega delovanja kambija so traheje in traheide v enem delu širše (večja poraba vode spomladi zaradi listanja - pomladanski les) v drugem pa ožje (jesenski les). Meja med letnicama (branika) je vidna s prostim očesom.



Slika 85: Poenostavljeni detajli radialnega prereza mehkega in trdega lesa

Pri tehnični uporabi je treba ločiti trdi in mehki les. Razlikujejo ju naslednje strukturne lastnosti:

- celice mehkega lesa so razporejene v radialnih vrstah, pri trdem lesu pa so bolj naključno razporejene,
- mehki les je veliko bolj homogeno sestavljen kot trdi les,
- trdi les vsebuje radialne strženove trakove različnih debelin, pri mehkem lesu pa so ti manjši in enakomerne velikosti,
- traheje in likova vlakna so značilne celice trdega lesa,
- traheide so značilne celice mehkega lesa ter
- smolni kanali so značilni za mehki les.

LASTNOSTI LESA

Fizikalne lastnosti lesa

Izgled, vonj in okus lesa

Izgled lesa določajo njegova barva, tekstura, lesk in finost.

Barva lesa je naravni ton mehansko obdelane površine suhega lesa. Naše vrste lesa so od rumeno bele do temno rjave barve, pri tropskem lesu pa so barve bolj žive. Barva je odvisna od vrste lesa, gostote strukture stebla, količine različnih primesi, načina obdelave, atmosferskih vplivov, količine vode v lesu, vplivov toplote in dima itd. Barva je pomembna pri določanju vrste znotraj enega rodu (navadni bor - črni bor), pri presoji kakovosti in pri izbiri namembnosti lesa (pohištvo itd.).

Tekstura lesa je vidna slika anatomske strukture mehansko obdelane lesne površine. Je pravilna ali nepravilna. Odvisna je od notranje strukture lesa, oblike in dela debla, načina obdelave itd. Na osnovi strukture se loči vrsta lesa, vrsta obdelave (žagan, rezan, lupljen les), ocenjujejo se tehnične lastnosti lesa in izbira se namembnost lesa.

Lesk lesa je njegova sposobnost odboja svetlobe. Nekatere vrste lesa nimajo naravnega leska (topol, hruška) ali je ta zelo slab (jelka, smreka), pri nekaterih pa je bolj izrazit (hrast, jesen, oreh, bor). Pri eksotičnih vrstah lesa je lesk lahko dokaj izrazit (mahagonij, ebanovina). Odvisen je od anatomske zgradbe lesa (število in gladkost lesnih trakov), vključkov, preseka in vpadnega kota svetlobe. Masti in olja zmanjšujejo naravni lesk, vendar se ga z obdelavo površin doseči tudi pri lesu brez naravnega leska. Naravni lesk omogoča mikroskopsko določanje vrste in ima estetski pomen.

Finost lesa se nanaša na velikost, razporeditev in potek vzdolžnih elementov lesne strukture ter na strukturo in pravilnost razporeditve letnic. Lahko je mera za homogenost strukture in obdelovalnost lesa.

Vonj lesa je značilen za vsako vrsto. Sama lesna snov je pri normalni temperaturi brez vonja, vonj lesa pa je odvisen od vključkov in produktov procesa razpadanja. Prijeten vonj imajo na pr. bor, macesen in smreka, so pa tudi vrste lesa z neugodnim vonjem. Lahko je pomemben pri določanju uporabe lesa (različna embalaža).

Okus lesa je značilen za mnoge vrste, vendar ga je težko definirati. Eksotične vrste lesa se odlikujejo z okusom po popru, trpkem, sladkastem, grenkem okusu itd.

Gostota lesa

Les je porozen, ker je zgrajen iz trdnih celičnih membran in fine mreže por. Pri obravnavanju mase prostorninske enote lesa ločimo maso prostorninske enote lesa kot poroznega telesa (gostota lesa) in maso prostorninske enote lesne snovi iz katere so zgrajene lesne celice (specifična masa ali gostota lesne snovi).

Specifična masa lesne snovi, ki jo v glavnem tvorita celuloza in lignin, znaša v povprečju 1500 kg/m^3 (od 1460 do 1560 kg/m^3).

Prostorninska masa (gostota) lesa je odvisna od deleža vode v lesu. Gostota standardno suhega lesa je enaka masi njegove prostorninske enote po sušenju na temperaturi (103±3)°C do konstantne mase. Nominalna gostota lesa je masa suhe lesne snovi v prostorninski enoti lesa pri njegovi 40% vlažnosti.

Preglednica 30: Prostorninske lastnosti lesa

Vrsta lesa	Nominalna gostota (kg/m^3)	Računska gostota (kg/m^3)	Poroznost (%) les : pore : ostalo
smreka	450	600	25 : 74 : 1
bor	490	600	22 : 75 : 3
hrast	650	800	45 : 55
bukev	670	800	45 : 55

Gostota standardno suhega lesa znaša, odvisno od vrste, od 50 do 1400 kg/m^3. Pri naših vrstah lesa je razpon nekoliko manjši in sicer od 300 do 1000 kg/m^3. Gostota lesa ni enaka po celotni notranjosti debla, saj je pomladanski les lažji od jesenskega in je zaradi tega masa lesa odvisna tudi od gostote letnic. V preglednici 30 so prikazane prostorninske lastnosti nekaterih pri nas najbolj pogosto uporabljanih vrst lesa. Računska masa lesa velja za 15 - 20 % vlažen les. Zaradi velikega raztrosa vrednosti nominalne mase lesa, se pri računu konstrukcij upoštevajo računske mase, ki so zaradi varnosti nekoliko višje od dejanskih, laboratorijsko ugotovljenih povprečnih vrednosti nominalne mase lesa.

Vlažnost lesa

Vlažnost lesa je odvisna od količine vode, ki je prisotna v lesni masi bodisi kot prosta bodisi kot vezana voda. Prosta kapilarna voda se neovirano pretaka vzdolž in med lesnimi celicami. Vezana voda je sestavni del celičnih membran in vlaken ali pa je kemično vezana v lesni snovi. Prisotnost vode močno vpliva na kakovost lesa, saj vpliva na njegove mehanske lastnosti in prostorninske spremembe. Vlažnost lesa se lahko spreminja tudi zaradi tehnoloških postopkov pri njegovi predelavi v konstrukcijske elemente in druge izdelke. Odstotek vlage (n) se določa z laboratorijskimi metodami ali s posebnimi napravami - vlagomeri (delujejo na principu električne prevodnosti lesne mase). Izražen je kot razmerje med prostorninsko maso vlažnega lesa (G_v) in prostorninsko maso standardno suhega lesa (G_s):

$$n = \frac{G_V - G_S}{G_S} 100 \quad [\%]$$

Vlažnost lesa se lahko zmanjša ali z naravnim sušenjem na zraku ali umetnim sušenjem v sušilnicah. Po JUS standardih se ločijo naslednje stopnje vlažnosti lesa:

- prepojen (zasičen) les > 35%
- surov les 25 - 35%
- pol surov les 22 - 25%
- transportno suh les 18 - 22%
- zračno suh les 12 - 18%

- normalno suh les 12%
- prisiljeno posušen les 6 - 12%

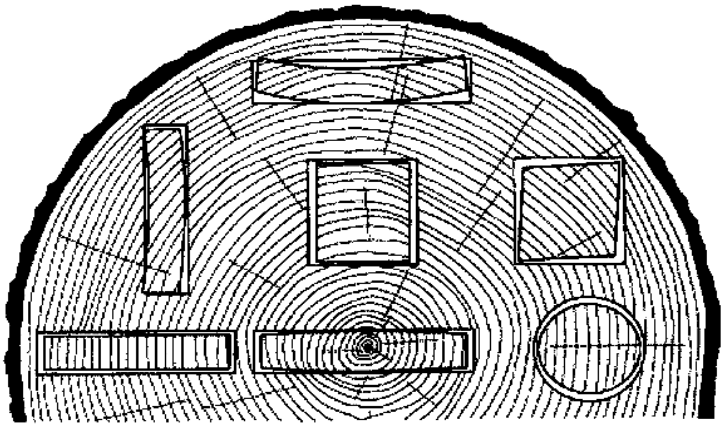
Dopustne napetosti lesa v konstrukcijah so določene za les 15% vlažnosti. Pri bistveno drugačni vlažnosti je potrebno upoštevati popravljene dopustne napetosti.

Higroskopnost lesa je posledica velike afinitete vode do celuloze in velike notranje površine lesa. Površina notranjih celičnih votlin v 1 cm^3 lesa znaša 1000 cm^2, površina vlaken pa znaša 2.106 cm^2/g lesa. V vlažnem okolju les neprekinjeno vpija in izpareva vodo v odvisnosti od vlažnosti okolja. Zaradi tega se stalno spreminjajo izmere in prostornina lesa. Les nabreka in se krči ("deluje"). V stadiju zasičenosti les vsebuje maksimalno količino vezane vode in samo vezano vodo, celične votline pa so prazne oz. napolnjene z zrakom. Ko se vlaga spušča pod zasičeno količino, se lesu spreminjajo izmere, prostornina, fizikalne in mehanske lastnosti, v glavnem nespremenjene pa ostanejo, ko vlaga naraste nad zasičeno količino.

Krčenje in nabrekanje lesa

Krčenje in nabrekanje lesa je posledica sušenja lesa in vpijanja vode med stanjem zasičenosti vlaken in stanjem standardne suhosti lesa. Les deluje neenako v treh smereh - vzdolžno, radialno prečno in tangencialno prečno (slika 86). Linearne spremembe v treh smereh se kažejo kot prostorninsko delovanje lesa.

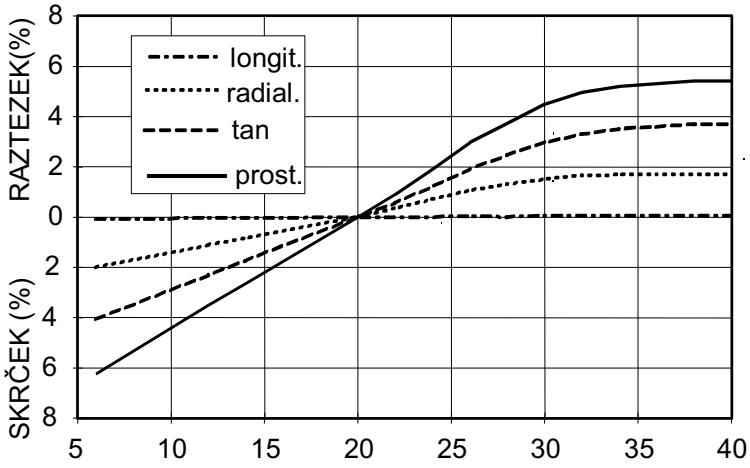
Krčenje nastaja pri sušenju lesa. Ta najprej zgublja prosto vodo. S tem se zmanjšuje njegova gostota. Z nadaljnjim sušenjem les izgublja tudi vezano vodo (vlažnost pod 22 - 35%) in lesno tkivo se zbije, kar povzroča zmanjšanje prostornine lesa. Zaradi neenakomernega sušenja in krčenja se znotraj lesa povečujejo notranje napetosti, ki se sproščajo z nastankom razpok.



Slika 86: Značilne deformacije lesa zaradi krčenja

Nabrekanje je pojav, ki je nasproten krčenju. Les povečuje prostornino zaradi vpijanja vlage. Proces se ustavi po nasičenju lesnih vlaken z vodo, ko les preneha "delovati". Pri nadaljnjem dovajanju vode se bo povečevala le gostota lesa. Podobno kot pri krčenju so največje spremembe v tangencialni prečni smeri, v radialni so približno dvakrat manjše, v vzdolžni pa zanemarljive v

primerjavi z ostalima dvema. Pri projektiranju lesenih konstrukcij je treba upoštevati nabrekanje zlasti pri izvedbi lesenih oblog (tangencialni raztezki povzročajo dvigovanje parketa, uklon opažev itd.)



Slika 87: Diagrama krčenja in nabrekanja lesa

Na sliki 87 sta prikazana diagrama krčenja in raztegovanja mehkega in trdega gradbenega lesa v treh smereh (Kujundžič, 1989). Linearna krčenja v treh pravokotnih smereh označujemo z β_l , β_r in β_t , linearna nabrekanja z α_l , α_r in α_t , ustrezni prostorninski spremembi pa z α_v in β_v. Pojavijo se velike notranje napetosti in kot posledica le teh nastanejo deformacije in razpoke (slika 12-4).

$$\alpha_v = ((1 + \alpha_l)\cdot(1 + \alpha_r)\cdot(1 + \alpha_t)) - 1 \qquad \beta_v = 1 - ((1 - \beta_l)\cdot(1 - \beta_r)\cdot(1 - \beta_t))$$

Preglednica 31: Koeficienti spremembe dolžine in prostornine pri spremembi vlažnosti za 1%

Vrsta lesa	Smer			Sprememba prostornine (%)
	vzdolžna (%)	radialna (%)	transv. (%)	
jelka	0,001	0,038	0,076	0,117
smreka	0,003	0,036	0,078	0,120
bor	0,004	0,040	0,077	0,124
bukev	0,003	0,058	0,118	0,176
hrast	0,004	0,040	0,078	0,126

Vrednosti linearnih raztezkov, ki so prikazane na sliki 87 se lahko razlikujejo pri enakih vrstah lesa. Nekateri avtorji podajajo vrednosti, ki so od dva-krat do tri-krat višje. Na prikazanih diagramih so predvsem pomembne oblike krivulj, ki pa so značilne za vse podobne vrste lesa, ne glede na vrednosti linearnih raztezkov.

V preglednici 31 so prikazani koeficienti spremembe dolžine in prostornine lesa pri spremembi vlažnosti za 1%, kot so bili dobljeni na osnovi eksperimentalnih preiskav (Kujundžič, 1989).

Termične lastnosti lesa

Les slabo prevaja toploto, pod vplivom temperaturnih sprememb se razmeroma malo deformira, ima pa razmeroma veliko kaloričnost.

Koeficient toplotne prevodnosti je odvisen od strukture, vrste, prostorninske mase, smeri vlaken, temperature in vlažnosti lesa. Porozen in lahek les slabše prevaja toploto kot zbit in težak les. Povprečna vrednost koeficienta na sobni temperaturi (20°C) znaša v vzdolžni smeri med 0,191 in 0,284 kJ/m°C, v prečni radialni smeri med 0,104 in 0,151 kJ/m°C ter v prečni tangencialni smeri med 0,090 in 0,140 kJ/m°C. Pri povečanju vlage za 1% se prevodnost poveča za približno 1,25%. Les je toplotni izolator, kar pokaže tudi primerjava z ostalimi materiali. Tako ima za primerjavo aluminij koeficient toplotne prevodnosti okoli 174 kJ/m°C, železo 41 kJ/m°C, marmor 22 kJ/m°C, opeka in steklo 0,6 kJ/m°C, cement 0,25 kJ/m°C in pesek 0,06 kJ/m°C.

Koeficient temperaturnega raztezka je odvisen od vrste lesa, prostorninske mase, smeri vlaken in vlažnosti ter od temperature v okolici lesa. Ta lastnost je pomembna pri tolmačenju poškodb lesa zaradi naglih temperaturnih sprememb in pri obravnavanju požarne odpornosti lesenih konstrukcij.

V temperaturnem območju med -50°C in +50°C znaša koeficient v vzdolžni smeri α_l med $0{,}25 \cdot 10^{-5}$ in $1{,}1 \cdot 10^{-5}$, v prečni radialni smeri α_r med $1{,}6 \cdot 10^{-5}$ in $3{,}5 \cdot 10^{-5}$ in v prečni tangencionalni smeri α_t med $2{,}4 \cdot 10^{-5}$ in $7{,}5 \cdot 10^{-5}$.

Pri dimenzioniranju in analizi lesenih konstrukcij običajno upoštevamo naslednje vrednosti koeficienta: $\alpha_l = 0{,}5 \cdot 10^{-5}$ za listavce in $\alpha_l = 0{,}3 \cdot 10^{-5}$ za iglavce ter $\alpha_r = \alpha_t = 5 \cdot 10^{-5}$ za obe vrsti lesa.

Kaloričnost lesa je količina toplote, ki jo pri izgorevanju sprosti enota lesne mase od trenutka, ko zagori, do ohladitve na temperaturo kondenzacije vodne pare. Pri listavcih znaša približno 17 MJ/kg, pri iglavcih pa približno 19 MJ/kg.

Hitrost izgorevanja po globini lesa znaša pri hrastu okoli 0,3 mm/min pri ostalih vrstah lesa pa okoli 0,6 mm/min.

Požarna odpornost lesa

Gorenje gradiv pogojujejo in spremljajo naslednji pojavi:

- vnetljivost,
- intenzivnost gorenja in sposobnost širjenja plamena,
- zadimljenost,
- izločanje strupenih snovi,
- naknadno tlenje,
- pokanje in deformiranje gradiva zaradi notranjih napetosti in
- spreminjanje agregatnega stanja med požarom.

Nekateri izmed naštetih parametrov niso značilni za gorenje lesa. Pri gorenju lesa se ne razvija veliko strupenih snovi, ne nastajajo razpoke in deformacije ter agregatno stanje ostaja nespremenjeno. Preostale zgoraj naštete lastnosti, pa so slabost lesa. Te so posledica zgradbe in sestavin lesa, saj je to porozen, organski material, ki oksidira pri vseh temperaturah in pri tem spreminja barvo.

Zelo vlažen les (nad 30%) je praktično nevnetljiv. Lažje vnetljiv od težkega in zbitega lesa je lahek in porozen les.

Požarna odpornost je ne glede na njegovo vrsto odvisna od tega, koliko časa je izpostavljen visokim temperaturam. Približne vrednosti vnetljivosti lesa pri vlažnosti 15% in določeni temperaturi okolice so prikazane v preglednici 32 (Kujundžič, 1989).

Preglednica 32: Vnetljivost lesa

Temperatura (°C)	**200**	**250**	**300**	**400**
Čas vnetja (min)	25	16	6	2,5

Obnašanje lesa med požarom ponazarja odziv lesa na različne temperature.

Pri segrevanju lesa do 100°C izpareva voda in les se suši. Tudi pri zunanji temperaturi nad 100°C temperatura na površini in v notranjosti lesa ne preseže te meje, vse dokler ne izpari vsa voda.

Med 100°C in 275°C iz lesa izhajajo plini, ki vsebujejo okoli 70% negorljivega CO_2 in 30% CO ter nekaj destilatov na osnovi kislin in alkohola. Les se obarva rjavkasto.

Pri 275°C reakcija postaja eksotermična z razvojem toplote in bogatim razvojem plinov. Struktura plinov se spreminja, hitro se zmanjšuje delež CO_2 in povečuje prisotnost ogljikovodikov. Les se obarva temno rjavo.

Nad 350°C se zmanjša količina plinov, a so skoraj vsi vnetljivi. Ogljikovodiki nadomeščajo večino CO_2, izloča pa se tudi vodik, ki skupaj z ostalimi plini ustvarja zelo vnetljivo mešanico.

Nad 450°C se iz površinskih delov lesa naglo in v veliki količini izločajo večinoma vnetljivi plini. Ker so bogati z ogljikovodiki in vodikom, je ob prisotnosti kisika iz zraka gorenje zelo intenzivno. Les se dodatno ogreva po globini, kar povzroča nova izločanja plinov, gorenje pa postaja progresivno. Površina lesa se prekrije z ostankom gorenja - lesnim ogljem.

Gorenje se vzdržuje vse dokler je v okolici kisik in dokler se s sproščeno toploto iz lesa vzdržuje zadosti visoka temperatura površine lesa. Ker pa les po globini slabo prevaja toploto in ker je plast lesenega oglja na površini toplotni izolator ter se pri požarih kisik lahko hitro izrabi, je možna samougasitev lesa. Do te pogosteje pride pri kosih lesa velikih izmer.

Pri vrednotenju požarne odpornosti konstrukcijskega elementa iz lesa, ki se meri s časovnimi enotami, se upoštevajo sledeči parametri:

- višina temperature na nesegrevani površini,
- pojav razpok v elementu,
- prodor plamena,
- nosilnost in
- deformabilnost.

Izkušnje kažejo, da imajo lesene konstrukcije požarno odpornost v razponu med 20 in 70 minutami. V primerjavi z nezaščiteno jekleno konstrukcijo enake

nosilnosti je les v očitni prednosti. Izmed mnogih dokazov je dokaj ilustrativen primer preiskav v laboratoriju CSTB v Parizu, kjer so preskušali centrično obtežen lesen in jeklen steber. Pri navpični obtežbi 100 kN in pri enakih požarnih pogojih, je lesen steber iz trdega lesa prereza 15/15 cm in višine 230 cm zdržal 52 minut, jeklen steber iz profila HN 100 mm višine 250 cm pa le 10 min. Tako obnašanje jeklenega stebra je posledica dobre toplotne prevodnosti kovine, majhnega prereza zaradi velike nosilnosti osnovnega materiala in velikega vpliva povišanih temperatur na mehanske lastnosti jekla.

Lesu, ki je izpostavljen povišanim temperaturam, se prav tako znižajo mehanske lastnosti. Pri 100°C se natezna trdnost v smeri vlaken zniža za okoli 10%, upogibna trdnost za okoli 30% , tlačna trdnost v smeri vlaken za okoli 50% in moduli elastičnosti od 30 do 35%.

Požarna odpornost elementov lesenih konstrukcij se poveča s povečanjem dimenzij prereza za določen odstotek nad izmerami, ki so izračunane pri dimenzioniranju konstrukcije na predvideno statično in dinamično obtežbo, in z uporabo različnih zaščitnih oblog, premazov (površinska zaščita) in impregnacij (globinska zaščita).

Za kemično zaščito se izbirajo take snovi, ki razpadajo pri razmeroma nizkih požarnih temperaturah in skupaj z ostanki gorenja lesa ustvarjajo zaščitno plast, ki ovira izločanje plinov in prodiranje toplote v notranjost lesa. Te snovi morajo biti trajne, odporne na vlago, ne smejo izparevati ali hlapeti, med požarom pa se ne smejo spreminjati v toksične pline. Nekatere izmed snovi, ki se uporabljajo v praksi so: boraks, borova kislina, diamonijev fosfat (agresivno deluje na kovine), amonijev sulfat, cinkov klorid, amonijev klorid itd.

Električne lastnosti

Električne lastnosti so pomembne pri predelavi in obdelavi lesa ter omogočajo določanje vlažnosti s higrometri.

Električna prevodnost povsem suhega lesa je izredno nizka - les je izolator. Sorazmerna je gostoti in vlažnosti lesa, vzdolž vlaken pa je dvakrat večja kot v prečnih smereh.

Akustične lastnosti

Les je izredno akustičen material in se zato uporablja za obloge v prostorih, kjer je potrebno zagotoviti njihovo akustičnost (koncertne dvorane). Hitrost širjenja zvoka vzdolž vlaken (od 3.200 m/s do 5.200 m/s pri vlažnosti 5 - 7%) se ne razlikuje veliko od hitrosti širjenja zvoka v kovinah. V prečni smeri se zvok širi približno trikrat počasneje. Širjenje zvoka ovirajo tako nepravilnosti in poškodbe v lesu kakor tudi nehomogena sestava. Vodljivost zvoka je lastnost, ki omogoča akustično oceno kakovosti in zdravosti lesa. Zdrav les se na udarec odziva z jasnim in kratkim zvokom, trhel les z zamolklim in kratkim zvokom, votel les pa z zamolklim in dolgim zvokom.

Optične lastnosti

Sončna svetloba ne prodira globoko v les - manj kot 1 mm v globino. Zato osončen les sivi le slab milimeter globoko. Redkejša beljava bolj prepušča

svetlobo kot gostejša črnjava. Prepustnost povečujeta vlaga in smole. Les v odvisnosti od svoje gostote dobro prepušča Röntgenske žarke.

Mehanske lastnosti

Osnovne mehanske lastnosti so elastičnost, trdnost in trdota, odpornost na obrabo in lezenje. Izrazito so odvisne od obravnavane smeri, fizikalnih lastnosti, kakovosti in nepravilnosti v strukturi.

Modul elastičnosti

Modul elastičnosti v smeri vlaken znaša od 3.000 do 25.000 MPa, v radialni prečni smeri od 4 do 17 % in v prečni tangencialni smeri od 4 do 2,5% modula elastičnosti v vzdolžni smeri. Modul v vzdolžni smeri je pomembna lastnost pri dimenzioniranju in analizi lesenih konstrukcij iz masivnega lesa, modul v prečni smeri pa pri konstrukcijah iz vezanih lesenih plošč. Pri projektiranju in analizi lesenih konstrukcij se upoštevajo predpisane vrednosti modulov elastičnosti: za iglavce je predpisan modul vzporedno z vlakni 10.000 MPa in pravokotno na vlakna 300 MPa. Za listavce sta ta dva modula 12.500 MPa in 500 MPa.

Modul je različen tudi pri smereh obremenjevanja. Največji je pri natezni, manjši pri tlačni in najmanjši pri strižni obremenitvi: $E_n > E_{tl} > E_s$. Dinamični modul je od statičnega nekoliko večji, v povprečju za približno 5%.

Strižni moduli v posameznih ravninah znašajo med 0,5 in 9% modula elastičnosti v vzdolžni smeri.

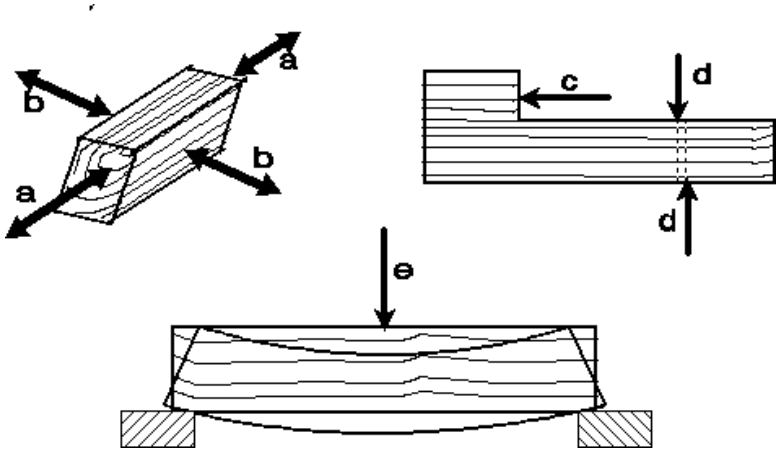
Trdnost lesa

Natezna trdnost lesa v smeri vlaken znaša od 10 do 225 MPa in je bistveno večja od trdnosti prečno na vlakna. Pri iglavcih je natezna trdnost pravokotno na vlakna od 2,5% do 5% in pri listavcih od 4% do 10% trdnosti v smeri vlaken. Na zgornjem delu slike 12-7(a) je prikazana odvisnost specifičnih deformacij od vzdolžne natezne obremenitve za les povprečnih lastnosti.

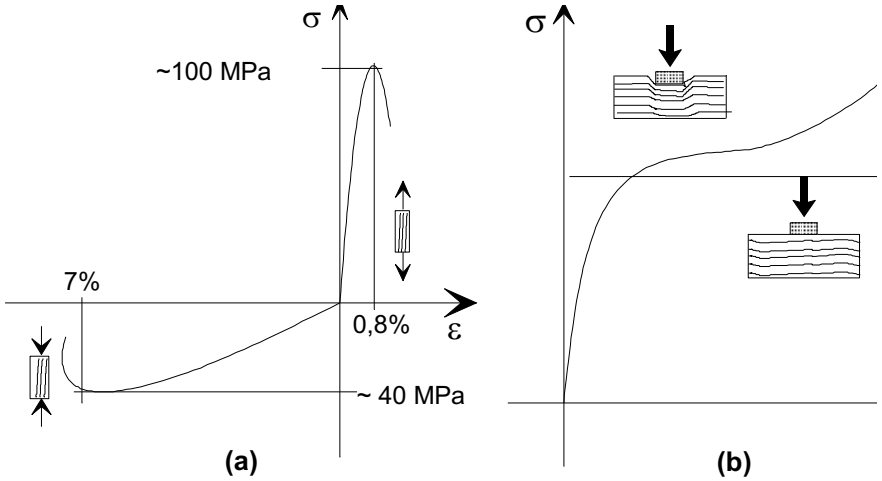
Tlačna trdnost lesa v smeri vlaken znaša od 10 do 110 MPa in je nekajkrat (od 3 do 10 krat) večja od trdnosti prečno na vlakna. Na spodnjem delu slike 12-7(a) je prikazana odvisnost specifičnih deformacij od vzdolžne tlačne obremenitve za les povprečnih lastnosti. Na sliki 12-7(b) je prikazan diagram odvisnosti specifičnih deformacij lesa pod tlačno obremenitvijo prečno na vlakna. Zaradi značilne strukture lesa, ki ima prazne prostore znotraj vlaken, se pri določeni obremenitvi ti prostori stisnejo, les se pod obtežbo stisne in tako zbit prevzema rastočo obremenitev.

Upogibna trdnost se preizkuša pravokotno na smer vlaken in tangencialno na letnice (slika 88 (e)). Pri pomembnejših vrstah lesa znaša od 9,5 do 246 MPa.

Strižna trdnost vzporedno z vlakni (slika 88(c)) je pri različnih vrst lesa v mejah od 1 do 15 MPa. Prečno na vlakna (slika 88(d)) je strižna trdnost nekajkrat večja od strižne trdnosti v smeri vlaken.



Slika 88: Obremenitve lesa: natezna in tlačna vzdolž (a) in prečno na vlakna (b), strižna vzdolž (c) in prečno na vlakna (d) ter upogibna (e)



Slika 89: Odvisnost specifičnih deformacij lesa od osne obremenitve v smeri vlaken (a) in od tlačne obremenitve prečno na vlakna (b)

Vpliv dinamične in trajne obtežbe

Les dobro prenaša kratkotrajne nasprotno usmerjene ponavljajoče se (ciklične) obremenitve brez hitrih pojavov utrujanja. Dolgotrajne dinamične in tudi statične obremenitve zmanjšujejo njegovo nosilnost in togost. Trdnost, zlasti upogibna, se pri trajnih obremenitvah znižuje proporcionalno z logaritmom časa trajanja obremenitve. Nekatere raziskave so pokazale, da se nosilnost lesa pri trajnih obremenitvah zniža tudi do 40% glede na nosilnost kratkotrajno obremenjenega lesa. Iz tega sledi, da se leseni elementi, ki so trajno obremenjeni do njihove 60% nosilnosti lahko po dovolj dolgem času porušijo zaradi tolikšne stalne obtežbe. Pojav je posledica reoloških lastnosti lesa, ki so odvisne od zgradbe celičnih membran.

Pod trajno obremenitvijo se deformacije lesa povečujejo zaradi pojava tečenja. Deformacije pri stalni vlažnosti so proporcionalne deformacijam pri trenutni obtežbi, razmerje med njima pa se imenuje koeficient tečenja.

Trdota

Trdota se določa z vtiskanjem jeklene kroglice premera 11,28 mm (površina vodoravne projekcije odtisa znaša 1 cm^2). Mejne vrednosti trdote so od 8 do 197 MPa. V vzdolžni smeri je les mehkejši kot v smeri prečno na vlakna.

Les se klasificira v šest trdotnih stopenj: zelo mehak, mehak, srednje trd, trd, zelo trd in koščeno trd. Zelo mehke vrste lesa, ki jih uporabljamo pri nas, (smreka, lipa, bor) imajo trdoto do 35 MPa. Trdi les (hrast, javor, bukev) ima trdoto od 65 do 100 MPa, koščeno trd eksotičen les (ebanovina) pa nad 150 MPa.

Odpornost na obrabo

Odpornost na obrabo je sposobnost lesa, da se upira površinskim mehanskim spremembam pri delovanju obtežbe in drugih zunanjih vplivov. Ta lastnost je povezana s trdoto, a ji ni istovetna. Odvisna je od vrste, strukture, specifične mase, smeri vlaken, vlažnosti, načinu obdelave površine itd.

Kakovost lesa

Kakovost lesa se izraža s koeficientom kakovosti, ki je razmerje med trdnostjo in prostorninsko maso lesa. Višje razmerje označuje večjo primernost lesa za konstrukcijske namene. Zanimivo je, da je koeficient kakovosti konstrukcijskega lesa (pri upogibni in vzdolžni natezni trdnosti) višji od koeficienta kakovosti jekla.

V jugoslovanskih predpisih je konstrukcijski les razdeljen v tri kategorije: I. - zelo nosilen, II. - običajno nosilen in III. - manj nosilen les. Kvaliteta lesa, ki ga uporabljamo v konstrukcijske namene, mora biti vidno označena. Zaradi ekonomičnosti gradnje, lahko les različnih kategorij uporabljamo na sledeč način:

I. kategorija: uporablja se v izjemnih primerih ali na krajših odsekih, ki so lokalno močno obremenjeni.

II. kategorija: uporablja se v vseh konstrukcijskih elementih razen v primerih, ko je za uporabo primeren tudi les III. kategorije.

III. kategorija: uporablja se tam, kjer slabša kakovost ne povzroča škodljivih posledic, kjer so elementi zaradi konstrukcijskih razlogov močno predimenzionirani in pri pomožnih ter začasnih konstrukcijah.

Dovoljene napetosti lesa, ki jih določajo predpisi za lesene konstrukcije, so različne za različne stopnje kakovosti lesa.

V predpisih Eurocode 5, ki bodo osnova naših novih predpisov, je kakovost lesa klasificirana na nekoliko drugačen način, kot je to opisano v nadaljevanju.

Napake v lesu in poškodbe lesa

Pojem napake lesa je relativen. Pojavi, ki so fiziološko normalni (ukrivljenost debla, neenakomerna rast, grčavost), za uporabnika pomenijo napako, ki zmanjšuje mehanske lastnosti ali uporabnost lesa. Včasih pa se "napake" lahko

uporabijo kot določena želena lastnost lesa (ukrivljenost, estetska vrednost grč).

Napake so lahko majhne (strženasti madeži, smolni žepki, sledi insektov) ali velike (grče, razpoke, zvitost). Po nastanku so lahko posledica rasti lesa, posledica delovanja insektov ali drugih škodljivcev, bolezni in posledica obdelave lesa.

Naravne napake

Naravne napake v lesu vplivajo na čistost, zakrivljenost in jedrnost lesa. Čist je tisti del debla, ki nima vej. Pri iglavcih je praviloma več čistega lesa kot pri listavcih. Zakrivljenost debla se meri kot višina loka na sredini opazovanega odseka. Jedrnost debla je večja, če je njegova oblika bližja obliki idealnega valja. Prečni prerez debla je pravilen, če se ne razlikuje preveč od opisanega kroga (razlika med pravokotnima premeroma je pri pravilnih prerezih manjša od 10%). Na pravilnost vpliva tudi ekscentričnost jedra prereza (manj od 10% povprečnega prereza debla pri pravilnih prerezih). Pomembna je tudi smer poteka vzdolžnih vlaken v primerjavi s potekom osi. Pri povsem pravilnih deblih vlakna potekajo vzporedno z osjo debla.

Grče so sestavni del vsakega lesa. To so izhodišča živih ali deli mrtvih vej, ki jih obdajajo letnice. Ločimo jih po nastanku, vraščenosti, zraščenosti, velikosti, obliki, zdravosti in konsistenci. Zraščene (žive) grče ne izpadajo za razliko od nezraščenih (mrtvih). So lahko zdrave ali trhle.

Smolni žepki so podolgovate votlinice, ki so zapolnjene s smolo znotraj ene letnice. Potekajo vzporedno z mejo letnice.

Reakcijski les je tkivo, ki nastane na nasprotnih straneh ekscentričnega prečnega prereza debla. Na pritisnjeni strani je les temnejši, na nategnjeni strani pa svetlejši od povprečne barve prereza. Pritisnjeni les vsebuje več lignina in manj celuloze, nategnjeni les pa več celuloze in mineralnih snovi ter manj lignina in hemiceluloze kot navaden les.

Obkrožljivost je odstopanje plasti lesa vzdolž mej med letnicami in je delna ali polna. Zmanjšuje mehanske lastnosti in izkoristek debla.

Razpokanost lahko poteka ali iz jedra navzven, kjer je najširša, proti zunanjim plastem ali pa od lupine navznoter. Prva vrsta razpok je pogosta v podnožju starih debel, druga vrsta pa nastane zaradi velikih temperaturnih sprememb.

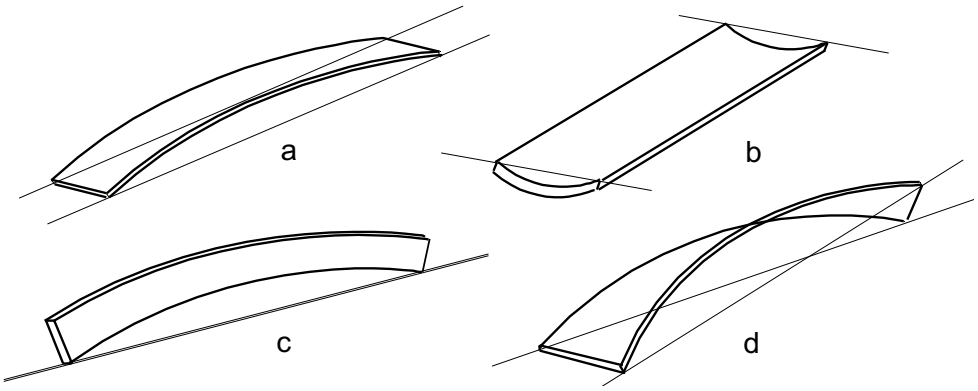
Napake nastale pri obdelavi lesa

Med sušenjem lesa nastane vrsta napak, kot so površinske razpoke, čelne razpoke, notranje razpoke, zvijanje itd.

Površinske razpoke nastajajo v začetnem stadiju sušenja in se kasneje lahko zaprejo. Niso škodljive, ker so plitve in se odstranijo z nadaljnjo obdelavo lesa.

Čelne razpoke nastajajo pri ostrih režimih sušenja bodisi zaradi notranjih razpok bodisi zaradi nepravilnosti v deblu. Potekajo od periferije proti sredini debla ali sredini obdelanega lesenega elementa. Zmanjšujejo mehanske lastnosti lesa in njegovo trajnost, saj po razpokah lahko prodira vlaga in škodljivi mikroorganizmi.

Zvijanje je posledica nepravilnega poteka vlaken vzdolž debla in glede na te lastnosti neustreznega načina sušenja. Na sliki 90 so prikazane najbolj pogoste oblike zvijanja lesenih elementov.



Slika 90: Najbolj pogoste oblike zvijanja lesenih elementov: usločenost (a), koritavost (b), sabljavost (c) in zavitost (d)

Površinske napake so vidne v obliki reliefnosti površine (pozni les v letnicah je višji od zgodnjega), kosmatosti površine in trskavost površine. Prva vrsta napake nastane pri površinski obdelavi vlažnega lesa, druga nastane pri obdelavi lesa, v katerem je manj parenhimskega tkiva, tretja pa pri obdelavi zelo suhega lesa z neustreznim (topim) orodjem.

Druge vrste napak in poškodb

Barvne napake so posledica delovanja insektov (rjavi strženovi madeži), nepravilnega procesa rasti v obdobjih izredno hladnih zim (dvojna beljava pri hrastu, nepravilni in rdeči stržen pri bukvi), zaradi vdora kisika in delovanja glivic od skorje proti sredi debla (preperelost). Prodor različnih vrst glivic v vlažen les povzroča tudi barvne spremembe pri iglavcih. Deli lesene strukture se obarvajo v modro, zeleno ali rjavo barvo, vendar so te spremembe večinoma lokalnega značaja.

Resnejše poškodbe lesa in vpliv na njegove lastnosti povzročajo glivice, ki poleg barvnih sprememb spreminjajo tudi konsistenco lesa. Pri rjavi gnilobi propada predvsem celuloza, lignin pa ostaja nespremenjen, pri beli pa propadajo celuloza, hemiceluloza in lignin.

Insekti povzročajo poškodbe in škodo, ki je v primerjavi z ostalimi vplivi največja. Posamezne vrste insektov iz rodov hroščev, metuljev in kožnokrilcev napadajo živa debla (po večini poškodovana in obolela), neobdelan les, lesne izdelke in vgrajen les. Les uporabljajo za hrano ali prebivanje. Škodo povzročajo z rovi, ki prekinjajo kontinuiteto lesnih vlaken, uničujejo površino in omogočajo prodor zunanjih vplivov v globino lesa. Največjo škodo povzročajo v stadiju ličinke ali v stadiju bube, v posameznih primerih pa tudi kot odrasle žuželke. Med pomembnejše škodljivce sodijo: lesna mravlja, termit, lesna osa, hrošči trdoglavi (lesovrti, kapucinec, parketar), zalubniki (veliki borov lubadar, črni zalubnik, smrekov lubadar, lesovrt), metulji zavrtači itd.

Morski škodljivci napadajo les, ki ga stalno obkroža morska voda ali pa je izpostavljen bibavici. Najbolj pogosti so različni ladijski črvi, lesni rakci in

školjke svedrovke. Slednje so izrazito nevarne, saj lahko v razmeroma kratkem času povsem razrušijo strukturo lesa.

Trajnost lesa

Naravna trajnost lesa je časovno obdobje, v katerem les obdrži svoje naravne lastnosti (strukturo, barvo, mehanske lastnosti). Delovanje agresivnega okolja in škodljivcev zmanjšuje trajnost lesa, zato se uporabljajo različna zaščitna sredstva, ki omejujejo škodljive vplive. Na čistem in suhem zraku ali v vodi je les praktično neomejeno trajen, če je zaščiten pred glivicami in insekti (les iz egipčanskih grobnic je ostal nespremenjen preko 3000 let). Na razpadanje lesa močno vpliva sprememba okolja, kot je to primer pri lesnih elementih v območju, ki je izpostavljeno zaporednemu močenju in sušenju.

PREDELAVA LESA

V gozdu obdelan les

V gozdu se lesna masa podrtega drevja predeluje v industrijski les (tehnični les in les za kemično obdelavo), kurivo in les za oglje. Gradbeni les se loči na obli in tesan les.

Obli les se pridobiva s prečnim razrezom debel in se lahko uporablja neposredno (jambori, jamski les, les za odre, piloti, elektrovodni stebri) ali za nadaljnjo obdelavo (žagan les, furnir, les za železniške pragove). Običaji premeri gradbenega oblega lesa so od 8 do 30 cm in dolžine do 16 m.

Tesan les se s tesanjem izdeluje iz debel. V novejšem času to tehniko obdelave vse bolj zamenjuje žaganje. Tesan les se uporablja v ladjedelništvu, za gradnjo ostrešij, mostov, za železniške pragove itd.

Končno predelan les

Rezan (žagan) les se klasificira po vrstah lesa, po oblikah prečnega prereza, po položaju v deblu, po teksturi (poteku letnic), po vrsti in stopnji predelave, po izmerah, po kakovosti in po namenu. Osnovna oblika za nadaljnji razrez v grede in deske je prizma, ki se dobi z vzdolžnim žaganjem oblega lesa z vzporednima žagama. Standardizirane izmere rezanega lesa so prikazane v preglednici.

Železniški pragovi (navadni, skretnični in mostovni) so posebna vrsta rezanega lesa. Leseni pragovi so trdni, ekonomični, dušijo zvok in vibracije, dinamično so odporni in dobro držijo pritrdilna sredstva. Pragovi se izdelujejo iz izbranega lesa trdne strukture brez poškodb, njihova obstojnost pa se povečuje z impregnacijo. Življenjska doba je odvisna od kakovosti izbranega lesa in vrste impregnacije ter znaša od 6 do 30 let.

Parket je najboljša lesena obloga podov. Izdeluje se v obliki lamel, deščic in plošč iz kakovostnega, trdega lesa. Pri nas je najbolj pogost hrastov, bukov in jesenov parket, manj pogosti pa so orehov, brestov in javorov parket ter parket iz eksotičnih vrst lesa.

Preglednica 33: Standardizirane izmere rezanega lesa

Oblika	Debelina (mm)	Širina (mm)	Izmere prereza (mm)	Dolžina (m)
deska	12, 18, 24, 28, 38	> 80		3,0 - 6,0
ploh	48, 76, 96	> 100		3,0 - 6,0
letev			6/24, 12/38, 12/48, 18/38, 18/48, 24/24, 24/38, 24/48, 8/28, 8/38, 28/48	1,0 - 1,25 2,0 - 2,75 3,0 - 6,0
tramič			38/48, 38/76, 48/48, 48/76, 76/76, 76/100, 100/100	2,0 - 2,75 3,0 - 6,0
tram		> 100	po naročilu	
Standardizirane dolžine rastejo po 25 cm.				

Lepljen žagan les za nosilne konstrukcije je sodobno kompozitno gradivo, ki je sestavljeno iz odbranih lesenih lamel (z vzporednimi vlakni) in dvokomponentnih disperzijskih lepil iz umetnih smol. Tako sestavljeno gradivo ima bolj enakomerne in višje mehanske lastnosti kot sam les. Zaradi tega se lahko izdelajo nosilni elementi poljubnih oblik in velikih razpetin.

Furnir je tanek list lesa (od 0,2 do 10 mm), ki se pridobiva z žaganjem, rezanjem ali lupljenjem (okoli 90% vsega furnirja). Glede uporabe se ločijo vidni (plemeniti) in slepi (podložni) furnirji. Izdelujejo se iz kakovostnega lesa listavcev (hrasta, bukve, oreha, javora, breze, topola, lipe, vrbe) in eksotičnega lesa. Plemenite vrste se izdelujejo v glavnem z žaganjem in rezanjem, podložne pa z lupljenjem. Slednji furnirji se pogosto imenujejo tudi konstrukcijski furnirji, ker se iz njih izdelujejo konstrukcijske vezane plošče.

Furnirske (vezane) plošče so sestavljene iz lihega števila navzkrižno zlepljenih listov iz furnirja tako, da je plošča glede na srednji list povsem simetrična (lepljenje v enakem zaporedju, enaka vrsta lesa, smer vlaken, fizikalne lastnosti, debelina in vlažnost). Navadne plošče debeline 4, 5 in 6 mm so izdelane iz treh listov, 7 mm iz treh ali petih listov, 8, 10 in 12 mm pa iz petih ali iz tudi več listov. Posebne vrste kakovostnih in obstojnih plošč se uporabljajo v ladjedelništvu in letalski industriji.

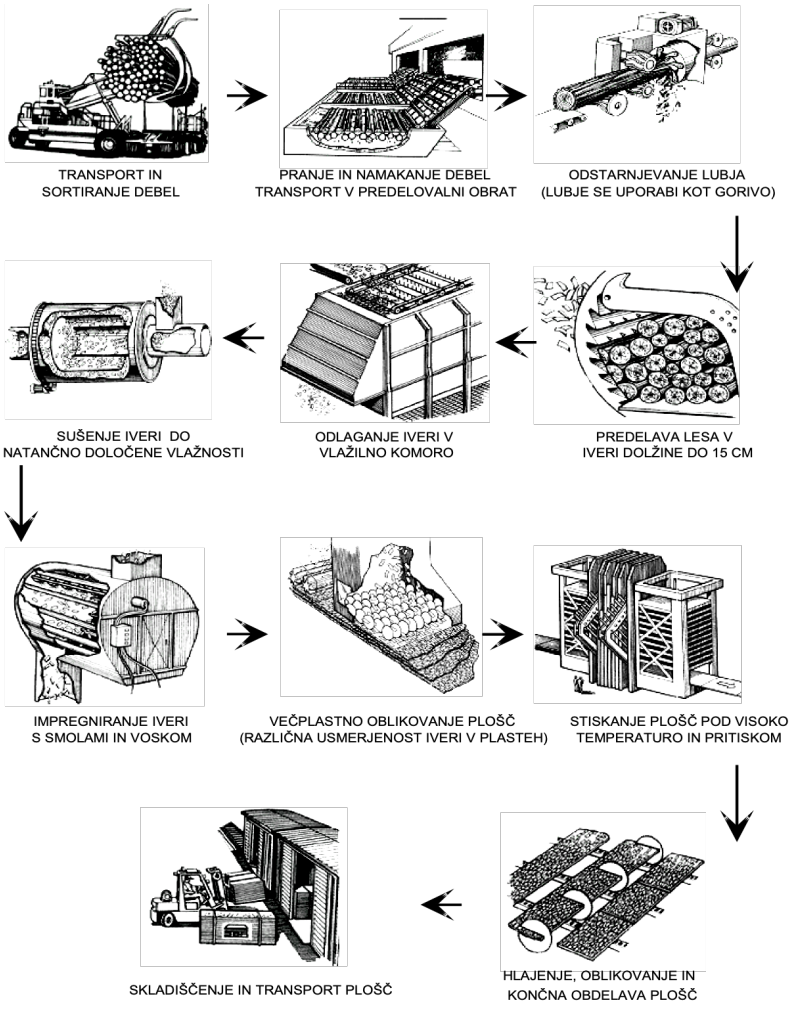
Vezane plošče so obstojne oblike, enakomernih mehanskih lastnosti, upogljive, odporne pri vrtanju in žebljanju ter ekonomične, iz njih pa se lahko izdelujejo ploskovni konstrukcijski elementi velikih površin.

Panelne plošče so sestavljene iz jedra, ki je izdelano ali iz medsebojno zlepljenih letvic ali pokončnih trakov iz obložnega furnirja. Jedro je na obeh straneh obloženo s furnirjem, katerega vlakna potekajo pravokotno na smer letvic. Plošče so debele od 13 do 45 mm. Uporabljajo se za izdelavo pohištva, vrat, oblog, opažnih plošč in povsod tam, kjer se potrebujejo velike ravne ploskve stabilnih izmer in oblik.

Iverne plošče se izdelujejo iz lesnih iveri in drugih ligno-celuloznih snovi ter organskih lepil (večinoma karbamid-formaldehidno lepilo) in katalizatorjev, z zlepljanjem pod pritiskom, pri določeni toploti in vlagi. Izdelujejo se lahke (250 - 400 kg/m^3 - za toplotno in zvočno izolacijo), srednje težke (400 - 800 kg/m^3 - večina proizvodnje) in težke ali trde iverne plošče (800 -1200 kg/m^3). Plošče so lahko eno-plastne ali tri-plastne. Pri slednjih so v sredini bolj grobe in cenejše iverje kot na površinah. Polne plošče so debele od 4 do 30 mm, votle pa od 24

do 50 mm. Površinsko oplemenjevanje plošč povečuje njihovo trdnost, površinsko odpornost in obstojnost ter estetsko vrednost. Oblagajo se s furnirji, folijami, impregniranimi papirji in dekorativnimi ploščami. Uporabljajo se za izdelavo pohištva, predelnih sten, oblog in pri gradnji montažnih hiš.

Plošče iz velikih iveri (OSB plošče). Razvoj ivernih plošč izdelanih iz malih, naključno usmerjenih iveri je v poznih sedemdesetih letih prejšnjega stoletja privedel do novega izdelka – plošč iz velikih usmerjenih iveri. Te so leta 1978 razvili v ZDA in jih na trg poslali pod imenom OSB (Oriented Strand Board). V Severni Ameriki so OSB plošče že skoraj povsem nadomestile večino podobnih plošč (vezane plošče, iverne plošče, panelne plošče), ki se uporabljajo za gradnjo stanovanjskih hiš. V zadnjih letih se te plošče proizvajajo tudi v Evropi in vse bolj uveljavljajo v evropski gradbeni praksi.



Slika 91: Proizvodnja plošč iz velikih iveri

OSB plošče so visokotehnološki produkt, ki je narejen iz večih plasti. V zunanjih plasteh so velike iveri usmerjene v daljši smeri plošče, v notranjih pa v prečni smeri ali naključno. Plasti se medsebojno povezujejo s pomočjo stiskalnic in pri povišani temperaturi. Velike iveri so približno enakih debelin in izmer. Običajno so iveri dolge 150 mm in široke 25 mm (Slika 91)

Trdnost OSB ploščam dajejo lesna vlakna v prepletenih ivereh, ki so povezane s polimerno matrico. Polimeri, ki tvorijo matrico, so odporni na vodo in vrelo

vodeno paro. V Evropi velja standard EN 300:1997, ki obravnava OSB plošče. Določila evropskega standarda se razlikujejo od ameriških in kanadskih standardov, zato so ameriški izdelki za evropski trg prilagojeni evropskemu standardu.

Značilnost lesa kot gradbenega materiala je, da se po vgrajeni količini v svetovnem merilu meri s količino vgrajenega betona, polimerov in kovin skupaj. Značilnost lesa je njegova relativno visoka specifična trdnost. Uporaba lesa v svetu se povečuje tudi zaradi vse večjega uvajanja okvirnih lesenih konstrukcij pri katerih OSB plošče služijo kot strižno nosilne obloge., ki skupaj z okvirom tvorijo potresno odporno konstrukcijo. Nosilnost konstrukcije je odvisna od kakovosti in količine veznih sredstev, ki povezujejo OSB plošče z lesenim okvirom ter temeljno in medetažnimi konstrukcijami. Leta 1980 so v ZDA proizvedli 0,7 10^6 m^3 OSB plošč, leta 2002 pa je ta količina narasla na 19,4 10^6 m^3. Posebna prednost OSB plošč je, da so izdelane iz povsem obnovljivih virov surovin. To so hitro rastoče vrste dreves, ki so kot surovina uporabna po doseganju razmeroma majhnega premera debel.

Lahke gradbene plošče izdelujejo iz lesne volne iglavcev in mineralnega veziva (cement, magnezit, mavec). Debele so od 15 do 100 mm, gostota pa znaša od 360 kg/m^3 (pri najdebelejših) do 570 kg/m^3 (pri najtanjših). Odporne so proti zmrzovanju, ognju, insektom, manj so higroskopične kot les in dobro sodelujejo z ostalimi gradivi. Služijo za izolacijske obloge kot samostojne ali kot "sandwich" plošče (na pr. skupaj s polistirenom - heraklit fasadne plošče), za gradnjo montažnih hiš, predelnih zidov itd.

Vlaknaste plošče (lesonit) izdelujejo iz lesenih vlaken in drugih ligno-celuloznih snovi, ki se zlepijo z medsebojno delujočimi adhezijskimi silami. Z dodatki se povečuje trdnost, odpornost na vlago, ogenj, insekte ali pa se izboljšujejo druge lastnosti. Izdelujejo jih s postopki, ki so podobni postopkom v papirni industriji, le da se pri proizvodnji vlaken ne odstranjuje lignin. Izdelujejo se nestiskane (mehke, izolacijske) in stiskane (trde) plošče. Trde plošče (400 - 1450 kg/m^3) se uporabljajo za izdelavo pohištva, oblaganje zidov, vrat, notranjosti vozil in za podobne namene kot vezane plošče.

LASTNOSTI LESA IN EUROCODE 5

V seriji evropskih modelnih standardov Eurocode je projektiranju lesenih konstrukcij posvečen Eurocode 5. Ta standard upošteva uporabo lesa, ki je predelan v obliko rezanega lesa, lameliranega lesa in različnih lesnih plošč. Tovrstna gradiva so značilno vlaknasta po strukturi, anizotropna po mehanskih lastnostih, občutljiva na spremembe temperature in delovanje vlage ter na trajanje obtežbe. Pri uporabi monolitnega lesa Eurocode 5 priporoča uporabo klasifikacije lesa in trdnostne razrede po standardu EN 338:1995 (Konstrukcijski

les - Trdnostni razredi). Ta klasifikacija vzpodbuja uporabo raznih vrst lesa, ker omogoča projektantom, da brez posebnega poglabljanja v botanične lastnosti lesa, upoštevajo le njihove tehnične lastnosti. Omenjena klasifikacija obsega trdnostne razrede od karakteristične upogibne trdnosti lesa 14 MPa do največjih trdnosti 70 MPa.

Račun lesenih konstrukcij po Eurocode 5 temelji na metodi mejnih stanj. Mejno stanje lesene konstrukcije je stanje, znotraj katerega so izpolnjene zahteve po nosilnosti in uporabnosti (deformabilnosti) lesene konstrukcije oziroma vsakega njenega elementa. Pri številčnem izražanju kriterijev za določanje mejnih stanj imajo pomembno vlogo varnostni količniki. Določitev vrednosti teh količnikov je v pristojnosti posamezne države, ki se odloči za lastne predpise, ki so zasnovani na Eurocodu 5.

Pri dimenzioniranju konstrukcij po mejnih stanjih je posebej pomembno upoštevati lastnosti materialov, ki tvorijo konstrukcijo. V primeru lesa to niso samo mehanske lastnosti temveč tudi vse ostale lastnosti, ki izvirajo iz strukture lesa. To so fizikalne lastnosti lesa, napake in poškodbe, ki izvirajo iz narave lesa in tehnoloških procesov za njegovo obdelavo. Pogoj mejnega stanja nosilnosti izraža zahtevo, da obremenitev ne sme presegati nosilnosti (odpornosti) konstrukcijskega elementa. Odpornost konstrukcijskega elementa je odvisna od njegovih geometrijskih značilnosti in materialnih karakteristik (trdnosti, deformabilnosti). Na osnovi znanih trdnosti lesa se ob upoštevanju predpisanih varnostnih količnikov določijo računske vrednosti obremenitev konstrukcijskih elementov. Celotni varnostni količnik konstrukcije sestavlja več delnih varnostnih količnikov. Eden med njimi je delni varnostni količnik za material, ki v primeru lesa znaša $\gamma_m = 1,3$. Poleg tega količnika se pri določanju računskih vrednosti trdnostnih lastnosti lesa upošteva tudi modifikacijski količnik. Ta upošteva trajanje obtežbe in pogoje okolja pri uporabi lesene konstrukcije. Pri načrtovanju lesene konstrukcije je treba upoštevati vlažnost okolja in na osnovi tega konstrukcijo razporediti v enega izmed treh razredov, ki so odvisni od vlažnosti konstrukcije (≤12%, 12-20% in >20%). Na osnovi predvidenega trajanja obtežbe se je pri projektiranju treba odločiti za upoštevanje stalne obtežbe (nad 10 let), dolgotrajne (do 10 let), srednje dolgotrajne (do 6 mesecev), kratkotrajne (do 1 meseca) in hipne obtežbe. Sneg se lahko, glede na klimatske razmere, upošteva kot srednje dolgotrajna ali kot kratkotrajna obtežba. Modifikacijski količniki so v številčnem razponu od 0,6 za stalno obtežbo do 0,9 za kratkotrajno obtežbo in 1,0 za hipno obtežbo.

V preglednici 34 so prikazane trdnosti, moduli elastičnosti in gostote nekaterih trdnostnih razredov lesa po standardu EN 338:1995. Ta standard obravnava devet razredov topolovine in iglavcev, ki so označeni kot: C14, C16, C18, C22, C24, C27, C30, C35 in C40. Standard obravnava tudi šest razredov listavcev označenih z: D30, D35, D40, D50, D60 in D70. Številčni del oznake označuje karakteristično upogibno trdnost lesa izraženo v MPa.

Preglednica 34: Značilne vrednosti mehanskih lastnosti nekaterih trdnostnih razredov lesa po EN 338:1995

	Topolovina, iglavci				**Listavci**	
	C14	C24	C30	C40	D30	D70
Gostota -karakteristična ρ_k(kg/m^3)	290	350	380	420	530	900
Upogib $f_{m,k}$ (MPa)	**14**	**24**	**30**	**40**	**30**	**70**
Nateg - vzporedno $f_{t,0,k}$ (MPa)	8	14	18	24	18	42

Nateg - pravokotno $f_{t,90,k}$ (MPa)	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,9
Tlak - vzporedno $f_{c,0,k}$ (MPa)	16	21	23	26	23	34
Tlak - pravokotno $f_{t,90,k}$ (MPa)	4,3	5,3	5,7	6,3	8	13,5
Strig $f_{v,k}$ (MPa)	1,7	2,5	3	3,8	3	6
E modul - vzporedno $E_{0,mean}$ (MPa)	7.000	11.000	12.000	14.000	10.000	20.000
E modul - pravokotno $E_{90,mean}$ (MPa)	230	370	400	470	640	1330
G modul G_{mean} (MPa)	440	690	750	880	600	1250

KONOPLJA - VLAKNASTA ENOLETNICA

Konoplja sodi med najstarejše in vsestransko uporabne rastline, kar jih pozna človeštvo. Uporablja jo že 12.000 let. Pred 4000 leti so Kitajci iz nje izdelovali papir. V obdobju jadrnic je njena poraba doživela največji razmah, saj konopljena vlakna izmed vseh naravnih vlaken najdlje zdržijo v slanih morskih razmerah. Cenejša juta in sisal sta kasneje nekoliko izrinila konopljo. Vendar pa se iz konoplje pridelujejo tudi izvlečki, ki so vsestransko uporabni v zdravilstvu in tudi kot mamilo. S temi substancami je zlasti bogata indijska konoplja (kanabis). Zaradi slednjih lastnosti je pridelovanje in uporaba konoplje pod skrbnim nadzorom oblasti v večini razvitih dežel.

V dobi, ko se zavedamo, da zaradi velike industrializacije vse bolj uničujemo ekosisteme, se zanimanje za naravne materiale vse bolj povečuje. Med te sodi tudi konoplja, ki je zanimiva zaradi hitre rasti, velikih pridelkov, kakovosti in vsestranske uporabnosti. Zaradi tega ponuja velike dobičke. Hkrati se z zanimanjem za konopljo veča tudi zanimanje za ostale industrijske rastline - naravne kompozitne materiale kot so: lan, konopljika, velika kopriva, ramija, žitna slama, koruznica, sisal, juta, sirek in ostale. Konoplja daje najmočnejša rastlinska vlakna, zato se ta tudi uporabljajo pri izdelavi tornih elementov za zavore in sklopke ter toplotno celo za izolacijske ploščice na vesoljskih plovilih.

Vsestranskost uporabnosti konoplje je dokazal tudi Levis, ki je naredil prve jeans hlače iz konoplje. konopljena tkanina je štirikrat trdnejša od sedaj uporabljane bombažne tkanine. Prekaša jo tudi po vpojnosti in toplotni kapaciteti ter se dobro pere tudi brez uporabe pralnih praškov. S pomočjo ultrazvoka lahko konopljina vlakna obdelajo do večje finosti, kot so obdelana bombažna vlakna. Zato se konopljina vlakna tudi uporabljajo za izdelavo različnih tekstilnih izdelkov in hkrati za izdelavo stenskih oblog, izolacijskih plošč, žimnic, filtrov, papirja za bankovce in dokumente. Pri Salonitu Anhovo so že pred petnajstimi leti naročili študije o možnostih nadomestitve dolgovlaknastega azbesta s konopljenimi vlakni, ki so dale pozitivne rezultate. Z zamenjavo polovice azbestnih vlaken s konopljenimi se trdnost plošč ne bi bistveno zmanjšala.

Vsa rastlina ali pa samo pazder, ki je ostanek pri pridobivanju vlaken, sta odlični surovini za pridobivanje kakovostne celuloze za izdelavo papirja in kartona. Suha konoplja vsebuje 50% celuloze, ki vsebuje štirikrat manj hemiceluloze in desetkrat manj lignina kot lesna celuloza. Zato se celuloza iz konoplje lahko pridobiva na naravi prijaznejši način. Na enoto površine zraste štirikrat več celuloze iz konoplje kot iz lesa.

Tradicionalna uporaba gline kot gradbenega materiala je bila povezana tudi z uporabo rastlinskih vlaken, ki so služila kot ojačitev. Konopljina vlakna so se pri taki uporabi najbolj obnesla, kar pričajo tudi ostanki armiranih malt iz

mezopotamskih zgradb. Sodobno uporabo konoplje v gradbeno prakso uvaja kar nekaj večjih podjetij v tudi v razvitih deželah. Eno izmed teh je francosko podjetje "Chenevotte habitat", ki za razmeroma ugodno ceno postavi hišo v celoti narejeno iz naravnih materialov. Pri tej hiši je osnovna konstrukcija lesena, stene pa so narejene iz mešanice konoplje in mineralnih veziv. Konoplja je pripravljena na poseben način. Sesekljana stebla so obdelana s kremenico in železovim oksidom po posebnem patentiranem postopku. Tako obdelana konoplja ima zaščiteno ime "isochanvre". Iz nje se izdeluje malta z apnom in cementom, ki že v 36-ih urah dosega trdnosti, ki so primerljive s trdnostjo običajnega betona. Med strjevanjem malte se ogljik iz konoplje veže s kalcijem iz apna in s tem ustvari trdno strukturo. Ta pojav je bil znan že v starem Egiptu pred 4000 leti. Malte pripravljene z "isochanvrom" so vsestranski vezni, obložni in izolacijski material. Z njim se da graditi konstrukcije, ki so lažje, trajnejše in cenejše od betonskih, imajo pa ustrezno trdnost. Poleg naštetega pa so materiali pripravljeni na osnovi konoplje bolj prijazni za okolje, saj se tudi lažje reciklirajo in na sploh razgrajujejo po preteku življenjske dobe objekta. Dokaz za povečano zanimanje za konopljo je tudi veliko število patentov na temo predelave konoplje, ki so prijavljeni v zadnjih letih. Za naslednja desetletja napovedujejo še večje zanimanje, ki bo vzpodbudilo tako kmetijstvo kot tudi ostale gospodarske dejavnosti, med katere sodi tudi industrija gradbenih materialov.

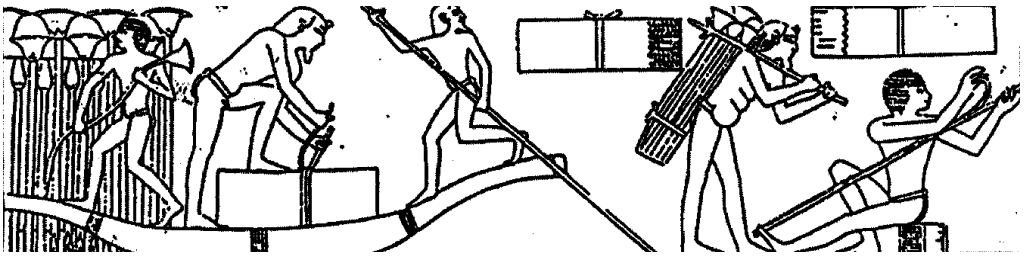
PAPIR

Papir je splet bolj ali manj čistih celuloznih vlaknin, pridobljenih iz lesnih vlaken ali vlaken enoletnih rastlin, s kemično, mehansko in termično obdelavo ali kombinacijo le-teh. Glede na namen in zahtevane značilnosti papirja so vlaknom dodana polnila, pigmenti, kleja in druga kemijska pomožna sredstva. Papir je značilni predstavnik kompozitnih materialov narejenih v osnovi iz naravnih vlaken, ki so obdana z matrico iz mešanice umetnih in naravnih materialov anorganskega in organskega izvora.

Sodobne civilizacije so tesno povezane s papirjem kljub hitremu razvoju informacijske tehnologije, ki uporablja tudi druge medije za zapis informacij. Pogosto pa se ne zavedamo, da obstaja kakovostna razlika med posameznimi vrstami papirja. Razliko med posameznimi vrstami papirja opredeljujejo lastnosti, kot so: kemijska stabilnost, fizikalne in mehanske lastnosti, optična obstojnost in odpornost na različne vplive, ki povzročajo staranje in propadanje papirja. Dobro poznavanje lastnosti papirja in način njegovega izdelovanja kažejo tudi skozi mnoga stoletja izredno dobro ohranjeni papirji, na katerih je shranjena kulturna dediščina v sliki in pismu. Tako je na primer papir Dalmatinove Biblije, tiskane leta 1584 še vedno prožen in bel. Zaradi zanemarjanja znanj o izdelavi in uporabljanju papirja so mlajši dokumenti v veliko slabšem stanju, kot omenjena knjiga.

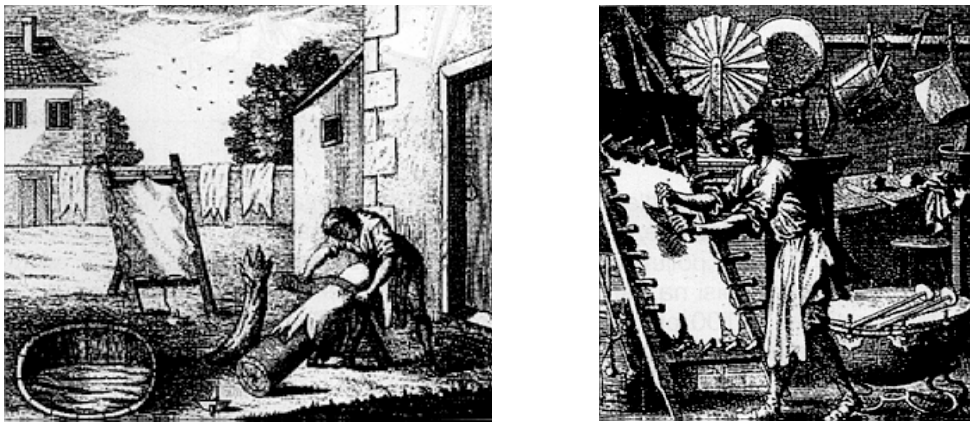
Razvoj civilizacij je slonel na zapisu. Prvi zapisi so nastali na keramičnih podlagah, kasnejši pa na podlagah, ki so narejene iz naravnih polimernih materialov. Značilni predstavniki le-teh so papirus, pergament in papir.

Papirus so v starem Egiptu izdelovali iz stržena istoimenske rastline. Pole papirusa so izdelovali iz vzdolžno in prečno položenih sploščenih stebel rastline. Njen sok je deloval kot vezivo med sploščenimi trakovi. Pole so sušili, površinsko gladili in tako pripravili za pisanje. Zvitki papirusa so nastali s spajanjem več pol v dolg trak. Najstarejši zapiski na papirusu so stari približno 5000 let. Papirus je bil najbolj razširjena pisna podloga staroveških mediteranskih kultur.



Slika 92: Priprava in izdelava papirusa v starem Egiptu

V prvih stoletjih našega štetja se je zaradi ostrejših podnebnih razmer v srednji in severni Evropi pojavila trpežnejša in trajnejša pisna podloga - pergament. **Pergament** je koža, ki je očiščena grobih ostankov mesa in maščob, obdelana v apneni kopeli, osušena in dodatno površinsko obdelana med enakomernim napenjanjem na sušilnem okvirju. Tako obdelana koža ima drugačno strukturo in lastnosti, kot jih ima usnje, ki je s stroji obdelana koža.



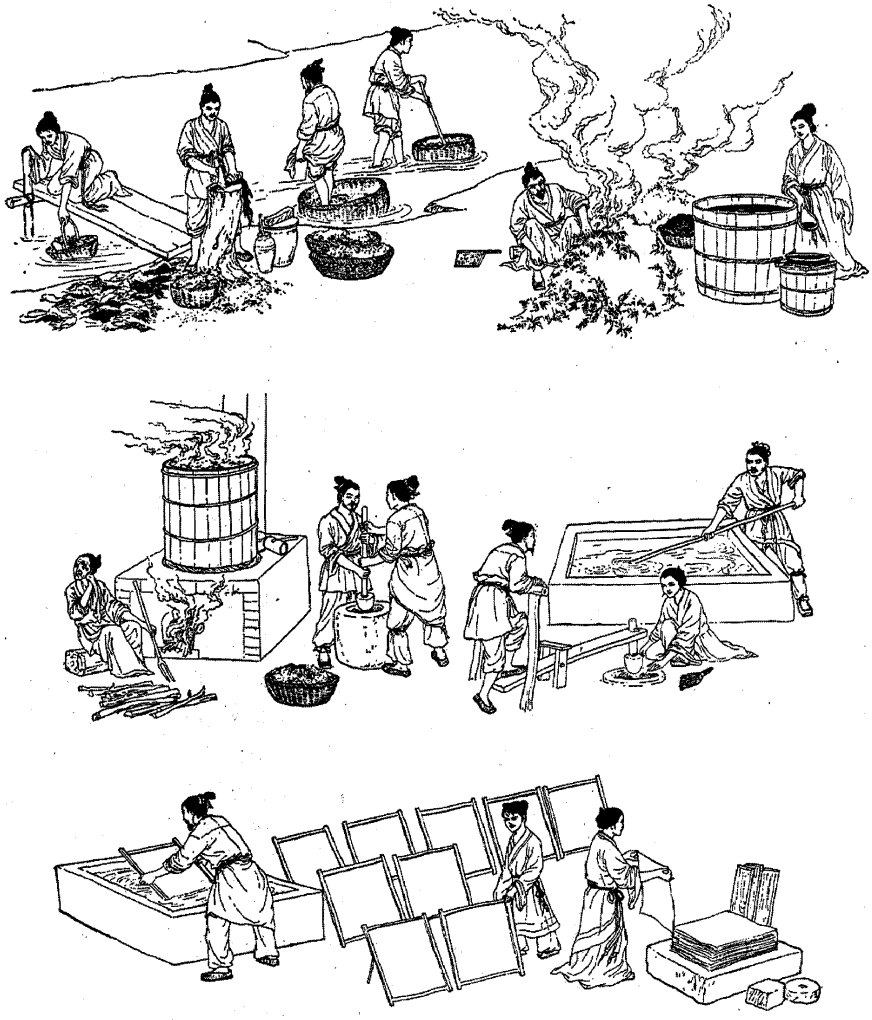
Slika 93: Priprava in izdelovanje pergamenta v srednjem veku v Evropi

Papir je verjetno tudi dobil ime po papirusu, vendar se tehnologiji izdelave papirja in papirusnih pol bistveno razlikujeta. Skupen jima je le rastlinski izvor surovine. Način izdelave papirja so iznašli na Kitajskem v začetku drugega stoletja. V Španijo so izdelavo papirja prenesli Arabci v 12. stoletju, v Italiji pa se ta pojavi v 13. stoletju in od tod se razširi po celi Evropi.

Obrt izdelave papirja zacveti v Evropi po Gutenbergovi iznajdbi tiska v drugi polovici 15. stoletja. Od 16. stoletja dalje je papir skoraj povsem izrinil pergament in tako postal prevladujoča pisna podlaga vsem grafičnim izdelkom.

Evropsko ročno izdelovanje papirja se je razlikovalo od kitajskega tudi zaradi uporabe vodne sile kot vira energije in po označevanju vrste in kakovosti papirja z vodnimi znaki. Prvotno so v Evropi kot osnovni surovini za izdelavo papirja uporabljali lanene in konopljene stare krpe, od 17. stoletja dalje pa so uporabljali tudi bombažne. Stare krpe so sortirali, dobro očistili, obelili in mehansko razvlaknili. Iz vodne susupenzije vlaken so mojstri s sitom izdelali vlakninske pole. Dodali so polnila ($CaCO_3$) in površinsko impregnacijo (živalski klej in škrob) ter papir zgladili do ustrezne kakovosti. Tako s dobili kemijsko zelo stabilen papir. Izdelan je bil iz visokokakovostnih celuloznih vlaknin, kalcijev karbonat pa je dodal veliko alkalno zalogo, ki v primeru kislih produktov razkrajanja deluje kot nevtralizator. Klej in škrob ne vplivata na staranje, če papir ni izpostavljen vlagi in s tem tudi plesni.

V Sloveniji tradicija izdelave papirja sega v 16. stoletje. Nasproti gradu v Fužinah pri Ljubljani je 1579 začel delati prvi papirni mlin. Deloval je štirinajst let, količina izdelanega papirja pa ni bila velika. Večina papirja, ki so ga uporabljali na današnjem teritoriju Slovenije, je prišla iz beneške republike in nemških dežel. V drugi polovici 18. stoletja je poraba papirja zaradi širjenja pismenosti močno narasla, kar je privedlo do industrijske proizvodnje papirja. Leta 1760 so na Holandskem iznašli prve stroje (holanderji) za mehansko obdelavo vlaken. Prvi papirni stroj je leta 1799 v Franciji izdelal Robert in s tem uvedel industrijsko proizvodnjo papirja. Stroj je imel dva valja in neskončno sito, proizvodnja papirja pa je potekala v kemijsko nevtralnem okolju. Po tej iznajdbi se je z industrijskimi postopki povečevalo število različnih vrst industrijsko izdelanega papirja, katerega lastnosti in kakovost so bile odvisne tako od postopkov proizvodnje kot od vrste uporabljenih surovin. S sodobnimi tehnologijami se papir izdeluje iz celuloze, ki je dobljena iz lesa in ostalih rastlin. Zaradi dolžine vlaken je les iglavcev (razen zelo smolnatega bora) najbolj primeren, poseben pomen pa ima tudi uporaba recikliranih vlaken.



Slika 94: Priprava in ročno izdelovanje papirja na Kitajskem

Leta 1994 so v celem svetu porabili okoli 250 milijonov ton papirja in kartona, od tega v Ameriki okoli 50%, v Evropi okoli 30%, ostalo pa večinoma v azijskih deželah. Sodobno papirništvo se razvija v smeri proizvodnje papirjev čim manjše mase, s čim večjim deležem recikliranih vlaken, povečane uporabe vlaknin visokega izkoristka, povečane uporabe polnil in premaznih pigmentov v papirju, zmanjšanja beljenja s klorom in znižanja porabe sveže vode.

Reciklirane vlaknine so se kot surovinska osnova za izdelavo papirja pojavile s povečanjem zahtev za ohranjanje okolja in uvedbo to-zadevne zakonodaje. V Evropi se v zadnjem obdobju uporablja okrog 45% recikliranih vlaken. Reciklirani papirji tako sodijo v popolnoma novo zvrst grafičnih papirjev. Pri tem pa se je treba zavedati problema trajnosti recikliranih papirjev in njihove primernosti za različno uporabo. Del papirja ima omejen čas uporabe in kmalu postane odpad. Odpadni papir vsebuje poleg vlaken tudi sestavine, ki predstavljajo določeno onesnaženje (barve, laki, lepila, trdni delci). Zato je pri reciklaži potrebno sortirati odpadni papir. Reciklirani papir se uporablja za izdelke s krajšo dobo uporabe. To so različne vrste embalaž, papir za industrijsko uporabo (kartonski opaži v gradbeništvu), higienski papir, časopisni papir in tiskarski papir za druge vrste grafičnih izdelkov krajše uporabne dobe.

Trajnost in obstojnost papirja je odvisna od številnih reakcij med sestavinami papirja in vplivi okolja. Staranje papirja se odraža v spremembi mehanskih lastnosti, kemijske obstojnosti in spremembi optičnih lastnosti. Trajnost se nanaša na kemijsko obstojnost sestavin papirja. Trajen je papir, ki v daljšem času ne spremeni barve in prožnosti. Obstojnost papirja se nanaša na spremembo fizikalnih in mehanskih lastnosti. Papir je obstojen, če prenese pogosto uporabo. Papir, ki ga v gradbeništvu uporabljamo za pripravo različne dokumentacije, bi moral biti trajen in obstojen. To še posebej velja za dokumente (načrte, zapise), ki se uporabljajo na gradbiščih v različnih vremenskih pogojih.

Osnovni vzroki za staranje papirja so kombinacija notranjih in zunanjih dejavnikov. V glavnem so ti posledica neustrezne surovinske sestave in tehnologije izdelave papirja, vplivov pri postopkih pisanja in tiskanja ter vplivov onesnaženega okolja, delovanja svetlobe, mikroorganizmov in ostalih škodljivcev. Vendar pa se da izdelati tudi trajno obstojne papirje, ki so obstojni tudi več stoletij. Sodobni mednarodni standardi predpisujejo kakovost trajnejših papirjev ter njihovo trajnost in odpornost. V Sloveniji velja standard SIST/ISO 9706:1996, ki določa zahteve za trajnost dokumentnega papirja. Na Inštitutu za celulozo in papir so že leta 1991 skupaj z restavratorsko delavnico Arhiva Republike Slovenije razvili postopek izdelave trajnejših vrst papirja, ki ustrezajo omenjenemu standardu. Taki papirji so primerni za dokumentacijo, katera se uporablja več kot deset let, ustrezno shranjena pa ima zelo dolgo življenjsko dobo. Vendar pa do sedaj nobena od slovenskih papirnic še ni vpeljala proizvodnje takega papirja.

V gradbeništvu je poraba papirja v največji meri namenjena izdelavi različne dokumentacije. Papirji za izdelavo originalov načrtov so prosojni, za izdelavo kopij posebej kemično obdelani, za izdelavo risb pa so trši. Razvoj računalniške obdelave podatkov in izdelave dokumentov s pomočjo naprav za tako imenovano namizno založništvo je zahteval tudi razvoj primernih vrst papirja. Kljub shranjevanju podatkov na druge vrste medijev, je še vedno za hranjenje dokumentov papir osnovno sredstvo in njegova poraba ne upada.

V gradbeništvu se trši karton, ki je obdelan s polimernimi prevlekami in impregnacijo, uporablja za izdelavo opažev in embalažo. Mnogi gradbeni materiali (cement, apno, mavec) se embalirajo v večplastne papirnate vreče iz posebej odpornih vrst papirja (natron papir). Papirno satovje se uporablja kot polnilo vratnih kril. Stene se oblagajo s papirnatimi tapetami, ki so lahko površinsko obdelane tako, da predstavljajo vidno oblogo sten ali pa tako, da se jih prekrije z različnimi opleski. Tapete so lahko obdelane tako, da so odporne na vodo in druge vplive okolja, lahko pa so tudi različno potiskane. Posebne vrste papirja so osnova hidroizolacijskih trakov. Pri izdelavi teh trakov se papir impregnira z olji ali bitumni in zlaga v več plasti, ki so medsebojno zlepljene z bitumni ali katrani. Papir je lahko tudi nosilec različnih vrst oblog narejenih iz mavca, ki je dodatno ojačen s celuloznimi ali drugimi polimernimi vlakni. Večina naštetih vrst papirja se izdeluje iz recikliranih vlaken. Papir, ki se uporablja v gradbeništvu mora imeti dobre mehanske lastnosti in odpornost na vplive, ki ga lahko poškodujejo v predvidenem času uporabe.

VPRAŠANJA

1. Kaj je les in iz katerih spojin je sestavljen?
2. Skicirajte in pojasnite sestavo lesne celice in spremembe, ki nastajajo z njenim odmiranjem.
3. Kaj tvori strukturo lesa in kakšna je vloga posameznih delov strukture?
4. Skicirajte prečni prerez in radialni izsek debla ter pojasnite značilnosti prereza debla.
5. Skicirajte poenostavljene detajle radialnega prereza mehkega in trdega lesa ter pojasnite razliko med trahejo in traheido ter vlogo likovih vlaken, parenhimskega tkiva in pikenj.
6. Pojasnite razliko med trdim in mehkim lesom.
7. Naštejte fizikalne lastnosti lesa in na kratko pojasnite njihov pomen.
8. Pojasnite vpliv porozne strukture lesa na njegovo gostoto in prostorninsko maso.
9. Pojasnite vpliv vlažnosti lesa na njegove lastnosti. Posebej obravnavajte vpliv vlažnosti na dopustne obremenitve lesa.
10. Kaj povzroča krčenje in nabrekanje lesa in kakšen je vpliv teh pojavov na uporabnost lesa?
11. Naštejte, kateri pojavi pogojujejo in spremljajo gorenje gradiv in kateri izmed teh so značilni za gorenje lesa.
12. Opišite do kakšnih sprememb lesa pride med gorenjem in pri katerih temperaturah nastajajo te spremembe.
13. Katere parametre upoštevamo pri vrednotenju požarne odpornosti konstrukcijskega elementa narejenega iz lesa? Primerjajte požarno odpornost lesenih konstrukcij v primerjavi z jeklenimi?
14. Kaj moramo upoštevati pri mehanskih lastnostih lesa? S pomočjo σ - ε diagramov pojasnite razlike med obnašanjem lesa pri tlačnih in nateznih obremenitvah.
15. Pojasnite vpliv dinamične in trajajoče obremenitve na obnašanje lesa.
16. Katere razrede kakovosti konstrukcijskega lesa poznate in za katere namene uporabljamo les posameznega kakovostnega razreda?
17. Naštejte in opišite vzroke ter značilnosti napak in poškodb v lesu. Kako le-te vplivajo na trajnost lesa?
18. Naštejte in na kratko opišite značilnosti osnovnih produktov industrijske obdelave lesa.
19. Naštejte in opišite lastnosti vseh vrst plošč, ki jih izdelujejo iz lesa in lesnih ostankov.
20. Navedite značilnosti industrijske rastline konoplje in njeno uporabnost v gradbeništvu.
21. Pojasnite razliko med papirusom, pergamentom in papirjem.

22. Kaj sestavlja papir in kateri so osnovni vzroki staranja papirja?
23. Pojasnite pojma trajnost in obstojnost papirja.
24. Opišite uporabo papirja v gradbeništvu.

13

LEPILNI, TESNILNI IN ZAŠČITNI MATERIALI

UVOD

Lepila, tesnilni materiali in materiali za površinsko zaščito drugih gradiv predstavljajo eno pomembnejših skupin materialov, ki omogočajo povezovanje, zaščito in končno obdelavo ostalih gradiv in njihovih sklopov. Uporabljajo se tudi za izdelavo različnih vrst kompozitnih gradiv, kjer zagotavljajo ustrezen prenos obremenitev med matričnim materialom in dodanim, ojačitvenim materialom. Povezovanje z lepili ni sodobna iznajdba. Tradicionalna lepila so naravni polimeri živalskega ali rastlinskega izvora. Z iznajdbo termoplastnih in duroplastnih smol se je spremenila tehnika lepljenja in ob enem zelo razširila tudi na področje konstrukcijskih gradiv. Obstajajo lepila, ki so trdnejša od nekaterih kovin. Zato so ponekod zamenjala postopke lotanja ali kovičenja kovinskih materialov. Novejša eno ali večkomponentna lepila hitro strjujejo in dosegajo visoke trdnosti v kratkem času. Premazi, ki so izdelani iz umetnih polimerov služijo kot dobra zaščita različnih gradiv pred zunanjimi agresivnimi vplivi in pred obrabo, ob enem pa omogočajo doseganje različnih estetskih učinkov.

LEPILA

Teorija lepljenja

Lepljenje je tehnika povezovanja predmetov in konstrukcijskih elementov, ki bo v prihodnosti vse bolj nadomeščala ostale, tradicionalne tehnike povezovanja. Lepila so snovi, ki lahko medsebojno povežejo predmete narejene iz različnih gradiv (lepljenci) s kombinacijo lepljenja na stične ploskve (adhezija) in svoje notranje trdnosti (kohezija), ne da bi spremenila lastnosti in strukturo zlepljenih gradiv. Kakovost lepljenega stika je odvisna tako od trdnosti lepila kot od trdnosti stika med lepilom in lepljencem.

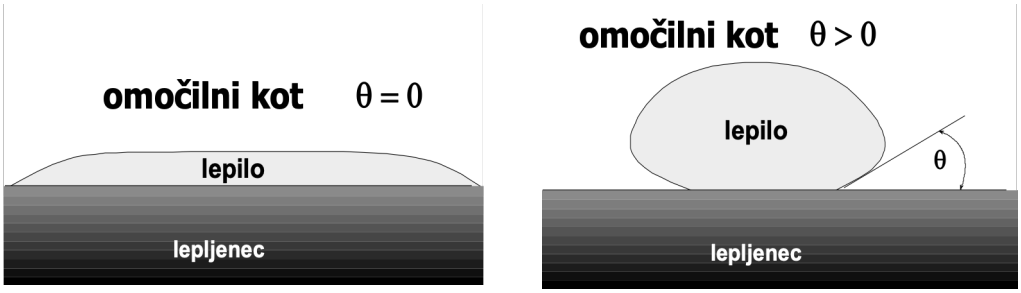
Lastnosti lepil vplivajo na njihovo uporabnost. Med te sodita lepljivost in viskoznost. **Lepljivost** lepila je značilnost, ki opredeljuje sprijemnost med lepilom in površino lepljenca, z **viskoznostjo** pa opredeljujemo stopnjo utekočinjenosti lepila. Gostota lepil je sorazmerna njihovi viskoznosti. Pri nekaterih vrstah lepil se zlepljenost stika lahko doseže le s pritiskom. Pomembna lastnost lepila je tudi čas skladiščenja. Nekatera lepila se po razmeroma kratkem času skladiščenja tako spremenijo, da se njihova lepilna sposobnost bistveno zmanjša.

Pri lepljenju moramo poznati tudi lastnosti lepil kot so: odprti čas, delovni čas in čas otrditve. **Odprti čas** je enak času od nanosa lepila do združitve

lepljencev in pritiska na njih. **Delovni čas** se nanaša na uporabnost lepila po tem, ko se ga izpostavi vplivu okolja. Pri dvokomponentnih umetnih lepilih je ta čas enak času, v kateremu je zmes komponent še vedno uporabna za lepljenje. **Čas otrditve** je enak času, ki preteče od nanosa lepila do njegove popolne strditve in trdne povezave lepljencev. V času otrditve se odvija polimerizacija, s katero se polimerne verige navzkrižno povežejo v trdno snov.

Obstajata dve teoriji lepljenja. Po eni je lepljenje posledica mehanskega povezovanja lepila in lepljenca. Po nanosu lepilo zapolni površinske neravnine in odprte pore na površini lepljencev in ju mehansko poveže. V prid tej teoriji so metode lepljenja, pri katerih se trdnejši stik med lepljenci doseže s kontroliranim ustvarjanjem hrapavosti površin. Druga teorija predpostavlja povezovanje na osnovi delovanja fizikalnih Van der Waalsovih vezi med molekulami lepila in molekulami lepljenca. Dejansko je proces lepljenja verjetno kombinacija obeh mehanizmov povezovanja.

Naloga lepila je, da popolnoma omoči površine lepljencev ter pri temu iztisne ves zrak in prazne prostore, ki bi lahko nastali med lepljencema po zlepljanju. V primeru, ko so sile med lepilom in lepljencem večje od sil med molekulami lepila, se lepilo razlije po površini lepljenca (slika 95(a)). V idealnih razmerah naj bi bile sile med molekulami v lepilu enake silam med lepilom in površino lepljenca. Z drugimi besedami povedano, pri idealnih razmerah so kohezijske sile v lepilu enake adhezijskim silam med lepilom in površino lepljenca.



Slika 95: Omakanje površine lepljenca

Površine lepljencev morajo biti ustrezno pripravljene pred lepljenjem. To pomeni, da morajo biti čiste in brez prisotnosti snovi, ki ovirajo omakanje. Nepopolno omakanje (slika 95(b)) ni samo posledica lastnosti , temveč tudi posledica pripravljenosti površine lepljenca. Trdni delci in ostale vrste nečistoč ali plinskih mehurčkov, ki so ujete v lepilo ali na površino med lepilom in lepljencem, predstavljajo oslabitev lepljenega spoja.

Lepljeni spoji imajo določene slabosti v primerjavi z varjenimi, lotanimi in mehanskimi spoji. Eden izmed teh je zahtevnost priprave površine lepljenca. Druga slabost je občutljivost procesa nege stika v času strjevanja. Nekatere vrste lepljenih spojev je potrebno tlačno obremeniti in/ali vzdrževati povišano temperaturo okolja (največ do 150ºC) ter s tem sprožiti ali pospešiti proces polimerizacije lepila.

Lepljeni spoji imajo tudi mnoge prednosti v primerjavi z ostalimi načini spajanja. Pri kakovostnem lepljenem stiku se obremenitve prenašajo enakomerno po celotnem stiku in ne lokalno kot pri mnogih drugih vrstah stikov. Z lepili se lahko povezujejo medsebojno materiali z različnimi

lastnostmi, kot sta na primer steklo in guma. Lepljeni stiki so odporni na ponavljajoče se obremenitve (utrujanje). Pogosto služijo tudi kot električni izolatorji ali kot zapore za vlago. Dodatna prednost lepljenja je, da se z njim lahko povezujejo zelo tanke plasti materiala, kar ni mogoče doseči z ostalimi načini povezovanja.

Vrste lepil

Lepila se lahko razvrščajo glede na njihovo sestavo in izvor v: naravna lepila (organska in anorganska) ter umetna lepila. Umetna lepila so v glavnem polimernega izvora in so zato ali termoplastna lepila ali duroplastna lepila.

Naravna lepila

Lepila organskega izvora

Lepila živalskega izvora (kleji) imajo proteinsko osnovo in se izdelujejo iz klavničnih ostankov (kosti, parklji, roževina). Sodijo med najstarejša znana lepila. Po sestavi so običajno organski polimeri v koloidni obliki, ki izhajajo iz kolagena. Kolagen je protein, ki se nahaja v koži, mišičnem tkivu in kosteh. Kleji se dobijo v obliki ploščic ali zrn. Pred uporabo se raztopijo v vroči vodi (do 65°C). Na lepljence se nanašajo kot pasta ali kot emulzija. Po izhlapevanju vode se strdijo in povežejo lepljence. Ta lepila niso vodo odporna in so tudi občutljiva na propadanje zaradi delovanja plesni, glivic in insektov.

Lepila rastlinskega izvora se pogosto uporabljajo za lepljenje znamk, kuvert in papirnatih nalepk. Osnovna surovina za izdelavo teh lepil je moka tapioka, ki je raztopljena v kavstični sodi. Enako se uporablja tudi koruzni ali krompirjev škrob. Taka lepila so cenena in razpadajo zaradi atmosferskih vplivov. Običajno so sestavljena iz škroba, vode in ojačitve (drugo lepilo, guma, smola). Ta lepila se lahko uporabljajo tudi v obliki paste za lepljenje papirnatih tapet, okraskov, kartonskih škatel in trakov. Boljša rastlinska lepila se uporabljajo tudi za lepljenje lesa (pohištvo, vezane plošče nižje trdnosti). Ko se strdijo, so dokaj močna toda zelo občutljiva na vlago, plesen in glivice.

Kazeinska lepila so narejena iz posušene mlečne maščobe, apna in kemikalij. Iz ene tone mleka se lahko pridobi približno 30 kg kazeina. Kazeinska lepila se uporabljajo za lepljenje lesa v pohištveni industriji (les na les). Občutljiva so na delovanje plesni in glivic, kot vsa ostala naravna organska lepila. Ta lepila so dražja od rastlinskih, imajo pa podobne lastnosti. Pogosto se uporabljajo tudi za lepljenje cigaret.

Sojina lepila se proizvajajo iz ostanka sojinih zrn, iz katerih se je izcedilo olje. Osušena razmaščena soja se meša z apnom, kavstično sodo, natrijevim silikatom in drugimi primesi. Taka lepila so poceni in delno vodo odporna. Uporabljajo se za proizvodnjo lesenih vezanih plošč srednje kakovosti.

Albuminska lepila se izdelujejo iz posušene živalske krvi in različnih dodatkov. Albumin je protein, ki povzroča strjevanje krvi. Ta lepila so zelo odporna na vodo vendar občutljiva na delovanje plesni in glivic. Visoka trdnost in trajnost lepljenih stikov pri vezanih lesenih ploščah se doseže z lepljenjem pri povišanih temperaturah (okoli 77°C).

Lepila anorganskega izvora

Natrij silikatna lepila hitro vežejo in se zato uporabljajo v papirništvu in proizvodnji embalaže. Lepljenje papirja mora biti prilagojeno njegovim lastnostim. Značilnost večine papirjev je, da niso odporni na trganje, vlago in višjo temperaturo, zato so lahko tudi lastnosti lepil, ki se uporabljajo za lepljenje papirja, podobne lastnostim samega papirja.

Lepila iz umetnih snovi

Termoplastna lepila

Termoplastna lepila se izdelujejo iz celuloze, akrilov in polivinilov. Polimeri so raztopljeni v hlapljivem raztopilu, ki po nanosu lepila izhlapi in s tem omogoči njegovo strjevanje. Pri tem se lepilna masa skrči za približno 30%. Krčenje povzroča pojav notranjih napetosti v strjenem lepilu, ki so lahko problematične, če so v stiku ostale zračne pore ali nezapolnjena mesta. Primer tovrstnih lepil so bele polivinil acetatne smole, ki so v vsakdanji rabi.

Polikloroprenska lepila (neopren) so najbolj pogosto uporabljana termoplastna lepila. Pripravljena so v tekoči obliki in se uporabljajo v kombinaciji s polnilom, ki povečuje trdnost in služi kot pospeševalec strjevanja. Polnilo in tekoče lepilo se mešata pred uporabo, pri tem pa se lahko doda tudi aktivator, ki omogoča strjevanje lepila pri sobni temperaturi.

Polivinil acetatna lepila se uporabljajo za povezovanje poroznih in neporoznih materialov (kovina, steklo, les). Uporabljajo se tudi za izdelavo lepilnih trakov na papirnati osnovi ali na celofanski osnovi.

Akrilna lepila se uporabljajo v tekočem stanju za lepljenje akrilnih izdelkov, kot je Plexiglas. Značilnost etil akrilnih lepil je lepljenje s pritiskom, prožnost in lepljivost v svežem stanju.

Poleg zgoraj naštetih lepil, ki se uporabljajo pri sobnih temperaturah, obstajajo tudi lepila, ki se pred uporabo segrejejo do določene temperature. Sestavljena so iz mešanice termoplastičnih polimerov. Ko so segreta, se nanesejo na površino enega od lepljencev, na katerega se pritisne drugi lepljenec. Toplo lepilo se sprime z obema lepljencema, nakar se po ohladitvi strdi. Temperaturno območje uporabnosti takih lepil je odvisno od temperature njihovega mehčanja. Med tovrstna lepila sodijo tudi tista, ki so narejena na osnovi asfalta, ki se lahko dodatno modificira še z drugimi termoplasti.

Duroplastna lepila

Duroplastna lepila sestavljajo polimerne smole: epoksidi, melamini, fenoli ali uree. Po segrevanju in pod pritiskom polimerizirajo in tvorijo mrežaste strukture, ki so močno sprijete s površino lepljenca ter imajo visoko trdnost.

Epoksidna lepila sodijo med najdražja lepila, a so zelo zanesljiva in imajo mnoge dobre lastnosti. Sodijo med lepila, ki se strjujejo s kemično reakcijo. Odlikuje jih visoka trdnost, odporna so na obrabo in delovanje vode, imajo nizko vizkosnost, nizko stopnjo krčenja in dobro omakajo površino lepljenca, tudi če gre za zahtevne materiale. Ker se zelo malo krčijo, jih lahko uporabljajo kot polnila ali kot lepilno osnovo. Trdnost stika ni odvisna od debeline lepilne plasti. Epoksidna lepila so ena izmed najboljših in se zato

uporabljajo tudi za povezovanje elementov v konstrukcijskih sistemih. Medsebojno lahko povezujejo praktično vse vrste konstrukcijskih materialov (beton, jeklo, steklo, keramike, les). Pogosto se uporabljajo v dvokomponentni obliki.

Fenolne smole se kombinirajo s formaldehidom in delno polimerizirajo v obliki kot duroplastno lepilo. Pod pritiskom in povišano temperaturo se ustvari stik s površino lepljenca, nakar se dokonča polimerizacija. Fenolne smole se dobavljajo v obliki prahu, tekočine ali tankega filma. Pri nekaterih tekočih smolah je potreben katalizator, večina teh lepil pa se lahko uporablja pri sobni temperaturi. Uporabljajo se za lepljenje abrazivnih materialov (korund) na brusilne papirje in trakove. Znana lepila, ki so narejena na osnovi fenolnih smol so fenol-formaldehidna lepila in resorcinol-formaldehidna lepila.

Urea-formaldehidna lepila so šibkejša od fenolnih lepil. Njihova prednost je krajši čas strjevanja in nižje temperature, pri katerih se lahko strjujejo. Topna so v vodi in zelo trajna v zaščitenem okolju. Pri močni vlagi okolja hitro razpadajo, če pa se jim doda škrob, postanejo vodo odporna.

Melamin-formaldehidna lepila strjujejo le pod pritiskom in v segretem stanju. So bolj odporna kot urea lepila, a manj kot fenolna lepila. So razmeroma draga. Pogosto se kombinirajo z urea lepili pri proizvodnji lesenih lepljenih plošč.

Polimerne zlitine so kombinacija dveh ali več termoplastov, duroplastov in elastomerov. Na tak način se lahko dobijo najbolj kakovostna lepila, ki pa so ob tem tudi zelo draga. V to skupino sodijo modificirani epoksidi. Nanašajo se v raztopljeni obliki. Strjujejo se pod pritiskom in povišano temperaturo, lahko pa strjujejo tudi pod pritiskom na sobni temperaturi, če se jim doda katalizator.

Cianoakrilatna lepila se pogosto prodajajo pod imenom "superlepila", ker zelo hitro strjujejo zaradi adsorbcije vlage iz lepljencev. Pri reakciji z vodo nastaja karbon dioksid. Zelo hitro se lepijo na kožo in je zato pri njihovi uporabi potrebna velika previdnost. Nekaj kapljic takih lepil lahko zelo hitro zlepi različne neporozne materiale (steklo, guma, kovina). Ta lepila v splošnem niso primerna za lepljenje poroznih materialov (les, tekstil, keramika). Stiki so trajni in trdni. Najmočnejša lepila iz te skupine so cianoakrilatni estri, ki so po svojih lastnostih in sprijemno trdnostjo primerljivi z epoksidi.

Cementi

Elastomerni cementi so mešanice surove gume in kemičnega raztopila (benzen npr.). Mešanica je viskozna tekočina, ki se uporablja za trajno cementiranje gumijastih materialov ali za časovno omejeno cementiranje papirjev ali tekstilov. Z gumijastimi cementi na osnovi lateksa se povezujejo vlaknasti materiali in tkanine. Uporabljajo se v čevljarstvu. Naravni gumijasti cementi imajo veliko adhezijsko in kohezijsko trdnost ter začetno lepljivost in trdnost. So vodoodporni, vendar se po določenem času razgradijo.

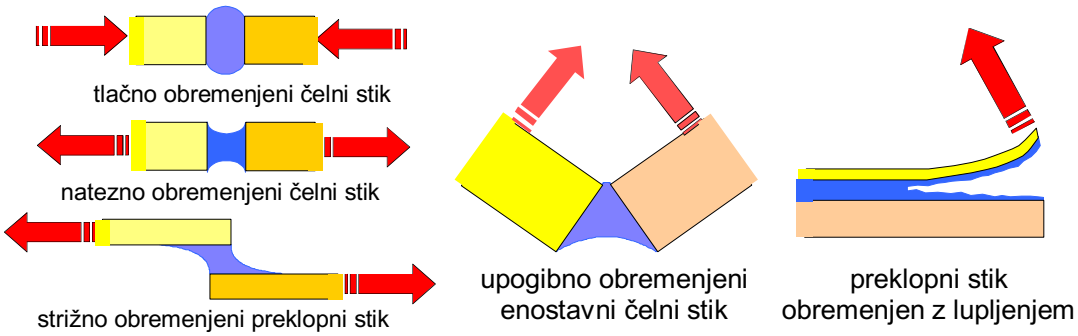
Piroksilinski cementi so sestavljeni iz celuloidnih delcev raztopljenih v kemičnih raztopilih (eter). Uporabljajo se tako za vsakdanje potrebe kot tudi v čevljarstvu. Trdijo po izhlapevanju raztopila.

Magnezijevi cementi so mešanice magnezijevega oksida (MgO) in magnezijevega klorida ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$). Po strjevanju nastane kameninasta masa.

Uporablja se za povezovanje organskih materialov in za popravilo keramičnih materialov.

Lastnosti lepljenih stikov

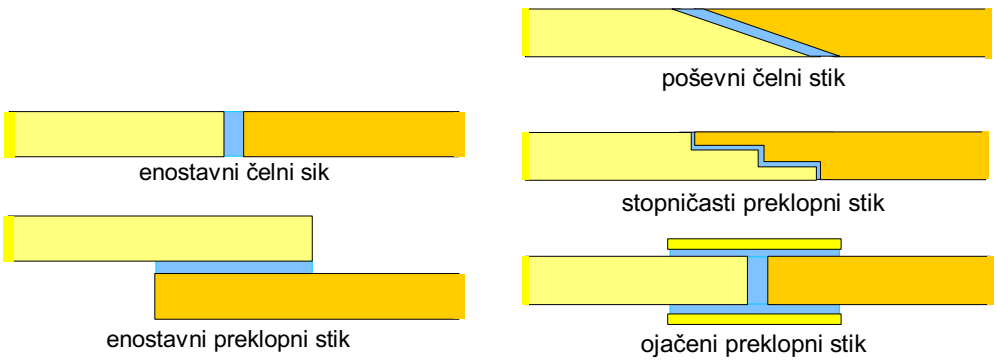
Pri oblikovanju lepljenih stikov je predvsem treba upoštevati načine njihovih obremenitev. Enostavni stiki so lahko obremenjeni na nateg, tlak, strig, upogib in lupljenje (slika 96). Lupljenje nastopi, ko je eden izmed lepljencev bistveno bolj prožen od drugega.



Slika 96: Osnovne vrste obremenitev enostavnih lepljenih stikov

Lokalna koncentracija obremenitev okoli začetnih razpok ali vključkov povzroča nastanek novih razpok in njihovo širjenje vse do porušitve. Pravilno izveden lepljeni stik mora imeti čim manj notranjih razpok, vključkov in por. Poleg tega mora biti zasnovan tako, da pri obtežbah ne nastanejo koncentrirane napetosti in da se morebitne začetne razpoke ne morejo hitro širiti. Natezne razpoke hitreje nastajajo pri upogibno obremenjenih stikih, posebno občutljivi pa so stiki, pri katerih pride do obremenitev zaradi lupljenja.

Na sliki 97 je prikazano nekaj običajnih izvedb stikov. Enostavni čelni stik je občutljiv na upogib še posebno takrat, ko se lepljenca medsebojno zamakneta. Pri enostavnem preklopnem stiku se je treba izogibati uporabi podajnih lepil, ker se pri tem obremenitve neenakomerno razporedijo po stiku, kar privede do lokalnih koncentracij napetosti. Pri poševnem čelnem stiku se nevarnost zamika lepljencev pri upogibu nekoliko zmanjša, zato je tak stik odpornejši od enostavnega čelnega stika. Pri stopničastem preklopnem stiku so kombinirane dobre lastnosti preklopnih in čelnih stikov. Upogibno odporen lepljen stik se da doseči z dodatno ojačitvijo čelnega stika.



Slika 97: Oblike enostavnejših lepljenih stikov

Pri lepljenju je treba upoštevati optimalno debelino plasti lepila, ki je odvisna od njegove vrste in sestave. Splošno velja, da optimalne debeline preklopnih stikov znašajo od 50 do 250 µm, vendar so te debeline lahko občutno večje, kot je to primer pri lepljenju z epoksidnimi maltami. Pri lepljenju je treba nanašati čim tanjše plasti lepila in se s tem izogniti nastanku praznin.

Pri strižnem obremenjevanju preklopnega stika se napetosti koncentrirajo le na dolžini nekaj deset milimetrov od roba lepljenca. Zato je trdnost stika med lepilom in površino lepljenca neposredno odvisna od širine stika, manj pa je odvisna od njegove dolžine.

Trdnost stika med lepilnim trakom in površino lepljenca je odvisna od lepljivosti lepila, ki prekriva lepilni trak. Ta lepila morajo imeti trajno lepljivost, hkrati pa morajo biti odstranljiva brez povzročitve poškodb ali sprememb na površini lepljenca. Taki stiki ne prenašajo velikih obremenitev, njihova trajnost pa je časovno omejena. Lepilni trakovi so posebej občutljivi na obremenitve, ki nastanejo pri lupljenju.

TESNILNI MATERIALI

Tesnilni materiali se uporabljajo za zapolnitev in tesnitev dilatacij v zgradbah in ostalih konstrukcijah. Tesnilni material mora biti trajen ter odporen na delovanje vode, plinov, temperaturnih sprememb, plesni, glivic in ostalih fizikalnih ter kemičnih vplivov. Zatesnjen stik mora biti do določene mere odporen tudi na spremembo dolžine dilatacije in premike povezanih delov konstrukcije. Tesnilne materiale lahko razporedimo v štiri skupine: tesnilne malte, kite, bitumenske tesnilne mase in polimerne tesnilne mase.

Pri izbiri tesnilnega materiala je treba upoštevati sledeče:

- širino dilatacije, ki jo je treba zapolniti,
- pričakovane premike v območju dilatacije,
- lastnosti površin, ki bodo povezane s tesnilno maso,
- stopnjo potrebne obrabne odpornosti stika,
- pogostost in raven vzdrževanja objekta v katerem je dilatacija,
- zahtevano življenjsko dobo zapolnjenega stika,
- postopke za izvedbo tesnjenja, ki so na voljo,
- temperaturno območje, kateremu bo izpostavljena dilatacija.

Tradicionalni načini tesnjenja (malte, kiti) ne zagotavljajo popolno zrakotesnost in vodotesnost. Vendar pa se manjše količine pronicajoče vode absorbirajo v tesnilnem materialu in kasneje izhlapijo. Sodobnejši povsem neporozni materiali (bitumni, polimerne mase) zagotavljajo boljšo tesnost, vendar pa so v določenih primerih manj odporni na vplive okolja kot klasični materiali. Nekatere lastnosti tradicionalnih in sodobnejših tesnilnih materialov so primerjane in prikazane v preglednici 35.

Preglednica 35: Primerjava lastnosti in uporabnosti tesnilnih materialov

Vrsta mase	Vgradnja	Čas strjevanja	Stanje v uporabi	Obrabna odpornost	Max. razt. (%)	Življenjska doba (leta)	Cenovni indeks
Cementna malta	ročno	1-3 dni	krhko	dobra	0	1-50	0,01
Kit na osnovi lanenega olja	ročno	6 tednov	plastično	dokaj dobra	0-1	5-20	0,5
Vroče liti bitumen	vlivanje	ohladitev	plastično	dokaj dobra	10-15	20-50	1
Oljni mastiksi	pištola	1-3 dni	plastično	slaba	5-10	5-10	1,25
Akril/butil	pištola	20-180 dni	plastično-elastično	dokaj dobra	10-15	10-15	1,5
Polisulfid	pištola	1-3 tedne	elastično-plastično	dobra	20	25	5
Silikon	pištola	1-7 dni	Elastično	dobra	25	25	7

Mineralne malte

Mineralne malte (cementne, apnene, mavčne) so krhke in se zato lahko uporabljajo le v primerih, ko se zatesnjeni stiki ne spreminjajo s časom. Tipičen primer njihove uporabe je fugiranje opečnih in kamnitih zidov. Uporabljajo se tudi za pritrjevanje in delno tesnitev slemenjakov ali drugih vrst keramične kritine (skrilji) ter dimnikov pod kovinskimi obrobami. Duktilnost tesnilnih malt se lahko poveča s polimerno modifikacijo, krčenje pa zmanjša z dodajanjem vlaknaste armature.

Kiti

Kiti se največ uporabljajo za tesnitev stekel po vgradnji v okenske okvire. Narejeni so tako, da lahko prenašajo upogibne obremenitve, zapolnijo praznine in tesnijo pred vdorom vode in zraka. Običajne vrste kitov so narejene iz rastlinskega olja (laneno olje) in iz polnila (kreda). Površina kitov se strdi zaradi oksidacije. Strjevanje poteka približno štiri do osem tednov. V lesenih okvirih poteka strjevanje hitreje, ker les srka olje iz kita. Zaradi nevarnosti izsušitve kita je treba pred kitanjem premazati les z ustreznim premazom. Vendar pa premaz ne sme povsem ovirati procesa izločevanja olja iz kita in s tem tudi procesa njegovega strjevanja. Po strditvi je kite potrebno površinsko zaščititi pred pretirano površinsko oksidacijo. Ta lahko pri nezaščitenih kitih povzroči močne razpoke in razpadanje kita.

Mastiks tesnilne mase

Mastiks tesnilne mase sodijo med trajno plastične duktilne materiale, pri katerih se strdi le tanka površinska plast. Zato so primerne za tesnitev stikov, pri katerih se spreminja širina in v območju katerih nastopajo premiki. Ena njihovih značilnosti je dobra oprijemljivost z večino ostalih materialov. Mastiksne mase so lahko narejene iz bitumnov, rastlinskih olj ali umetnih polimerov.

V nizkogradnjah se pogosto uporabljajo bitumenski mastiksi, ki pa so lahko tudi modificirani z dodatkom gume ali z drugimi polimeri. Večinoma se uporabljajo za tesnitev vodoravnih stikov. Segreti mastiksi se vlivajo v fuge. Strjujejo se z ohladitvijo. Pri zelo nizkih temperaturah se njihova duktilnost , zato pokajo. So razmeroma poceni in so zato uporabni za zapolnjevanje dolgih dilatacij.

Mastiksi so lahko pripravljeni tudi iz mešanic rastlinskih olj in smol z dodatkom polnil in vlaken. V nekaj dneh po vgradnji se na površini zaradi oksidacije ustvari gibka skorja. Strjevanje poteka še nekaj let od vgradnje. Življenjska doba znaša približno 10 let, trajnost pa lahko zmanjša predčasna izsušitev mastiksa, kar se pokaže kot močno razpokanje. Taki stiki so občutljivi na mehansko obrabo. So razmeroma poceni in se uporabljajo za tesnitev v objektih visokogradnje. Na trgu se dobijo tudi v obliki impregniranih trakov, ki se uporabljajo pri izvedbi kritin. Zaradi podaljšanja življenjske dobe so taki trakovi prekriti tudi z zaščitno aluminijevo folijo.

Polimerne tesnilne mase

Sodobne polimerne tesnilne mase so sestavljene iz polisulfidov, silikonov, poliuretanov, butila, poliizobutena, akrilnih gum in polikloroprena. Življenjska doba teh polimerov je od 10 do 25 let. Njihova prednost je večja odpornost na zunanje vplive in na deformacije ter premike v območju stikov.

Skoraj vsi elastomeri so uporabni za izdelavo tesnilnih mas. Polisulfidi in silikoni so zelo odporni tako na nizke temperature okolja kot na ostale vplive okolja. Uretani so odporni na nizke temperature, akrili, butil in kloropreni so pa odporni na različne vplive okolja. Iz preglednice 36 je razvidna uporabnost različnih polimerov za izdelavo lepil in tesnilnih mas.

Preglednica 36: Polimeri, ki se uporabljajo kot lepila in tesnilne mase

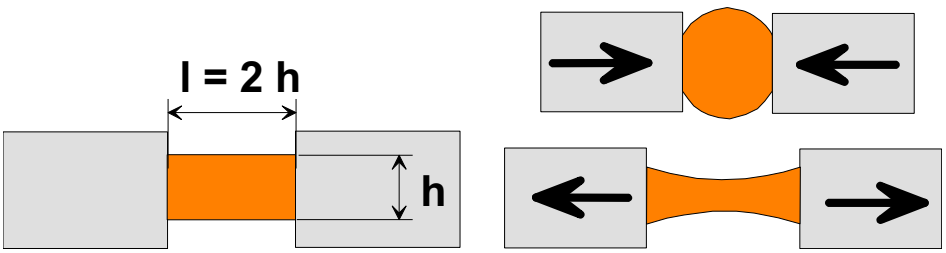
Polimer	Prednosti	Pomankljivosti	Uporabnost
Akril	UV stabilnost	toplotna odpornost	steklo, plastike
Celuloze	raztopljivost	cena, vlaga	koža, papir, les
Cianoakrilat	hitro vezanje, dober stik tudi pri težko lepljivih plastikah	cena	"super" lepilo
Epoksi	raznolikost, trdnost, kemična odpornost na raztopila	cena, lupilna odpornost	stiki visoke trdnosti
Olefini	prožnost, enostavna uporaba, cena	lezenje, toplotna odpornost	laminati, vezave knjig, embalaža
Fenoli	cena, odpornost na toploto in vremenske vplive	krhkost	vezane plošče, brusni kamni
Poliamidi	prožnost, odpornost	cena	lepljenje pločevink

Poliestri	na olja in vodo prožnost	cena, omejena sprijemnost	folije, plastike, čevlji
Polisulfidi	odpornost na vremenske in temperaturne spremembe	trdnost	elastomerna lepila, tesnila
Poliuretani	raznolikost	občutljivost pri uporabi, toplotna odpornost	lepljenje različnih materialov
Guma	visoka lepljivost	trdnost	lepilni trakovi, splošna raba
Silikon	temperaturni razpon	cena, trdnost	tesnilne mase, lepilni trakovi
Urea	cena, temperatura strjevanja	občutljivost na vlago	vezane plošče, pohištvo
Vinili	raznolikost	občutljivost na vlago	splošna uporaba, pohištvo, čevlji

Pri polisulfidnih masah se večja učinkovitost doseže pri dvokomponentni mešanici, ki polimerizira po vgradnji ob pomoči vlage iz okolja. Le ta pomaga tudi pri strjevanju silikonskih mas. Poliuretanske mase se lahko vgrajujejo kot eno ali dvokomponentne mešanice. Površine, ki jih tesnimo, morajo biti čiste in ustrezno pripravljene, s predpremazi pa se učinkovitost tesnitve še poveča.

Izvedba stikov

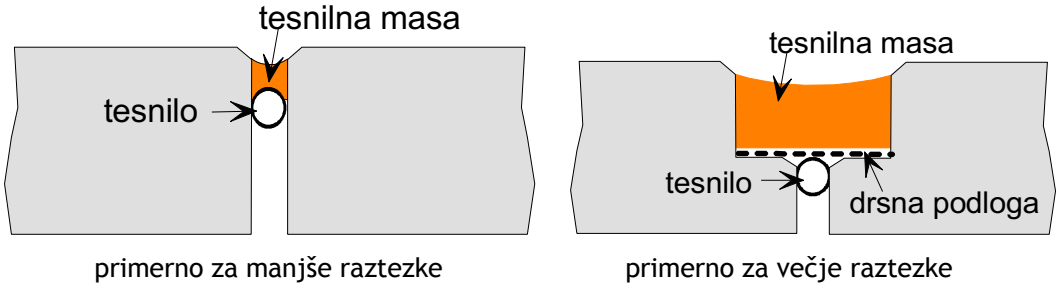
Pri izvedbi stikov je treba upoštevati osnovne lastnosti tesnilnih mas in določene zakonitosti povezane z njihovim obnašanjem med delovanjem dilatacij. Osnovna zahteva je, da prostornina tesnilnega material ostane enaka ves čas delovanja dilatacije. Zato njihove deformacije v prečni smeri ne smejo biti ovirane, saj se tesnilna plast prilagaja spremembam širine dilatacije s spremembo svoje oblike, kot je to razvidno iz slike 98.



Slika 98: Sprememba oblike tesnilne plasti med delovanjem dilatacije

Optimalne razmere se dosežejo pri debelini tesnila, ki je približno enaka dvojni širini dilatacije. Pri tem se tesnilo prilepi na sosednji material le vzdolž obeh čelnih ploskev. Tesnilo mora biti odporno na vdor vode. Debelina tesnila je odvisna od vrste tesnilnega materiala. Običajno je debeline vsaj 10 mm in širine vsaj 20 mm. Pri uporabi tesnilnih mas je treba predvideti velikost spremembe širine dilatacije, ki jo tesnilo zapira. Mnoge tesnilne mase prenesejo celo do 50% spremembe začetne dolžine, vendar nekatere le, če je ta sprememba počasna. Pri večjih spremembah dolžine je lahko prekoračena tako trdnost tesnilne mase kot tudi trdnost stika med tesnilno maso in podlago. Z izbiro širine dilatacijske fuge se prilagodimo velikosti pričakovanih raztezkov ali skrčkov v območju dilatacije. Robove dilatacije je treba primerno obdelati in s tem preprečiti krušenje ostrih robov. Pod tesnilno maso se položi tudi

tesnilni trak, ki je izdelan iz penastih polimerov, gume ali podobnih materialov, ki so dovolj podajni, da ne preprečijo deformacije tesnilne mase. Deformacije tesnilne mase se omogočijo tudi s podlaganjem folije narejene iz materiala, ki se ne zlepi s tesnilno maso. (slika 99).



Slika 99: Primera tesnenja fuge pri različnih pričakovanih raztezkih

PREMAZI IN DRUGE VRSTE POVRŠINSKIH ZAŠČIT

Materiali so med uporabo izdelkov in objektov izpostavljeni vplivom, ki povzročajo njihovo propadanje in s tem omejujejo njihovo življenjsko dobo. Ta se lahko podaljša z ustrezno zaščito odprtih površin izdelkov in objektov. Večina gradiv se lahko površinsko zaščiti s premazi ali drugimi vrstami zaščitnih plasti. Vloga premazov in zaščitnih plasti je varovanje materialov pred agresivnimi vplivi okolja, pred sevanji, pred spremembami temperature in pred obrabo. Zaščitne plasti in premazi so lahko kovinski, keramični ali polimerni materiali, najpogosteje pa so to sestavljeni, kompozitni materiali. Med najbolj razširjene sodobne kompozitne premaze sodijo polimerni kompoziti, sledijo pa jim kovinske prevleke.

Lastnosti zaščitnih plasti niso odvisne samo od lastnosti materiala, iz katerega so sestavljeni, temveč tudi od materiala, ki ga ščitijo, in od tehnologij nanosa zaščitnih plasti.

Polimerni premazi

Prvotni namen premazov in barv je bil estetskega značaja, kasneje z uvajanjem jeklenih konstrukcij pa so premazi dobili pomembno vlogo pri podaljšanju življenjske dobe konstrukcij. Z razvojem tehnologij za proizvodnjo polimerov se je pred približno 50 leti začela naglo povečevati uporaba kakovostnih premazov in lepil v industriji ter gradbeništvu. Osnovna sestavina večine današnjih organskih premazov je ali eden izmed polimerov ali mešanica večih polimerov. Njihove osnovne naloge so:

- zaščita materialov pred korozijo, vremenskimi in ostalimi vplivi,
- povečanje vidnosti z odbojem svetlobe ali luminiscenco,
- ustvarjanje termalne, električne ali akustične izolacije,
- izboljšanje izgleda površine materiala,
- povečanje tržne zanimivosti izdelka,
- zvišanje varnosti zaradi povečanja vidljivosti in opozarjanja uporabnikov (cestne oznake, prometni znaki),

- kamuflažni učinki,
- identificiranje oseb in predmetov (barvno kodiranje).

Organski premazi vsebujejo:
- vezivo,
- barvilo ali pigment,
- raztopila in dodatke za reguliranje viskoznosti ter
- ostale dodatke, ki stabilizirajo, zavirajo strjevanje in uravnavajo kemične in fizikalne lastnosti premazov.

Premazi se medsebojno razlikujejo po transportnem sredstvu, ki omogoča njihov nanos na ustrezno pripravljeno površino iz določenega materiala. Premaze lahko razdelimo v naslednje skupine: barve, emajle, lake in firneže. Med sabo se razlikujejo po vrsti transportnega sredstva. Transportno sredstvo je tista sestavina premaza, ki omogoča, da se celoten premaz razporedi po površini na katero ga nanašamo. **Barve** so mešanica veziva in pigmenta, ki se strdi s procesom zamreženja polimernih verig. **Emajli** so mešanice barve in firneža. Strjujejo se z zamreženjem polimerov, pri tem pa ima kisik iz atmosfere vlogo agensa. **Laki** vsebujejo vezivo, ki je raztopljeno v raztopilu. Strjujejo se med izhlapevanjem raztopila in s tem ustvarjajo termoplastni film. **Firneži** ne vsebujejo pigmenta. Po strjevanju tvorijo termoplastni film.

Sestava polimernih premazov

Organske premaze običajno sestavljajo transportno sredstvo, pigmenti in sušilci ter ostali dodatki, ki omogočajo uporabo premazov za različne namene. **Pigmenti** so drobnozrnati delci, ki običajno dajejo premazu barvitost. Ti lahko vplivajo tudi na druge lastnosti premaza podobno kot dodano sredstvo pri kompozitnih materialih. **Transportno sredstvo** je tekoča komponenta premaza, ki vsebuje vezivo. **Vezivo** je običajno tekoči polimer, ki prekriva površino, ter zadržuje pigment in ostale dodatke med nanašanjem premaza. Na premazani površini ustvarja tenak film, ki je po sušenju čvrsti nosilec pigmenta. Transportno sredstvo vsebuje tudi **razredčila**, ki omogočajo lažji nanos premaza na neko površino. Vezivo zagotavlja dobro povezanost premaza s površino (adhezija) in zagotavlja trdnost samega premaza (kohezija) v svežem in strjenem stanju. Veziva vsebujejo naravna olja, polimere in različne vrste naravnih ali umetnih smol.

Z dodajanjem pigmentov se uravnavajo fizikalne, včasih pa tudi kemične lastnosti premazov. Z njimi se dosega barvitost, protikorozijska zaščita, sijajnost in mehkost premaza. Rdeči in modri svinčeni pigmenti ter cinkovi in svinčeni kromati se uporabljajo kot zadrževalci rje. Pigmenti se ne raztapljajo v raztopilih. Stopnja sijajnosti in gladkosti površine premaza se uravnava s prostorninskim razmerjem med transportnim sredstvom in pigmentom ter z velikostjo zrn pigmenta. Pigmenti lahko pomagajo tako pri prekrivanju nepravilnosti v podlagi ali v samem premazu kakor tudi pri vsrkavanju (absorpciji) toplote in svetlobe. Izgled in prekrivnost premaza je v veliki meri odvisna od njegove sposobnosti absorpcije in odboja svetlobe. Pigmenti lahko s časom kemično reagirajo s snovmi iz okolja, pri tem razpadajo in tako premazi izgubljajo svoj svež izgled (lak na starejših avtomobilih). Zato je treba tudi premaze dodatno vzdrževati (čiščenje površin premazov) in jih ščititi z odstranljivimi premazi (voski) v primerih izpostavljenosti agresivnim okoljem.

Transportno sredstvo je pogosto sestavljeno iz **rastlinskih olj** (lanena olja, palmova olja) , ki so po sestavi nenasičene mastne kisline. Te kisline se adicijsko polimerizirajo v stiku s kisikom iz ozračja. S prekomernim nadaljevanjem oksidacije se transportno sredstvo in s tem tudi premaz razgrajuje s fragmentacijo polimernih molekul.

Naravne smole tudi lahko služijo kot transportno sredstvo. Večina teh smol je rastlinskega porekla razen šelaka, ki je živalskega izvora. Sestavljene so iz nenasičenih kislin, ki lahko oksidirajo in polimerizirajo ob prisotnosti osnovnih organskih spojin. Transportno sredstvo je lahko sestavljeno tudi iz **umetnih smol**, ki se uporabljajo kot samostojne snovi ali v kombinaciji z naravnimi smolami. Z izjemo šelaka in lakov, smole trdijo z oksidacijo in/ali polimerizacijo. Šelak in laki trdijo z hlapenjem raztopil.

Transportno sredstvo lahko vsebuje: raztopila, razredčila in redčila. Aktivna **raztopila** se uporabljajo za raztapljanje veziva in znižanja viskoznosti premaza. **Razredčila** se uporabljajo za redčenje raztopila in s tem povečanja količine premaza. **Redčila** se uporabljajo za povečanje količine premaza brez znižanja učinkovitosti raztopine. Redčila, ki se pogosto uporabljajo pri organskih premazih, so alkoholi, petrolejska raztopila, katranski derivati in terpentin.

Poleg naštetih sestavin premazov se v majhnih količinah uporabljajo tudi dodatki, s katerimi se poudarjajo ali omejujejo določene lastnosti premazov.

Dodatki vplivajo na kemične in fizikalne lastnosti premazov. Glavne skupine dodatkov so:

- agensi, ki preprečujejo prezgoden nastanek skorje med skladiščenjem,
- biocidi in fungicidi,
- katalizatorji,
- agensi za zlitje sestavin v vodotopnih premazih,
- dodatki proti penjenju,
- trdilci,
- zaviralci strjevanja,
- regulatorji tekočega stanja,
- stabilizatorji premazov pri zmrzovanju in tajanju,
- pigmenti,
- plastifikatorji,
- stabilizatorji in
- redčila.

Dodatki, ki preprečujejo strjevanje površine premaza v času skladiščenja, ustvarjajo tekočo zaščitno plast na odprti površini in jo s tem varujejo pred vplivi okolja.

Biocidi in fungicidi ovirajo razvoj mikroorganizmov v premazu. Ti se lahko razvijejo ob prisotnosti kisika in vode pri temperaturah od 22°C do 38°C. Mikroorganizmi lahko povzročijo trganje polimernih verig v času shranjevanja premazov. Biocidi preprečujejo rast mikroorganizmov v mokrem okolju, fungicidi pa v suhem okolju.

Katalizatorji pomagajo pri zamreženju polimerov v premazu, s tem da znižujejo potrebo po energiji za ta proces.

Agensi za zlitje se dodajajo premazom, pri katerih je voda transportno sredstvo. Omogočajo boljše medsebojno povezovanje sestavin premaza po izhlapevanju vode.

Dodatki proti penjenju preprečujejo nastajanje pene na površini premaza zaradi povečanja njegove površinske napetosti. Mehurčki, ki bi lahko nastali na površini, puščajo po sušenju odprte pore, ki vplivajo na izgled in trajnost premaza.

Trdilci so običajno milnati dodatki, ki se dobijo z nadomeščanjem vodikovih atomov v nekaterih organskih snoveh z atomi svinca, mangana, kobalta, železa, cinka ali kalcija. Te snovi delujejo kot katalizatorji polimerizacije in/ali oksidacije. Ti dodatki niso učinkoviti pri premazih, ki se strjujejo zaradi izhlapevanja transportnega sredstva.

Zaviralci strjevanja uravnavajo viskoznost premaza in povečujejo sijajnost njegove površine. Običajni zaviralci so barijev sulfat, diatomejska silika, gips, kaolin in kalcijev karbonat. Slednji povečuje sijajnost površine, diatomejska silika pa jo zmanjšuje.

Regulatorji tekočega stanja omogočajo kontrolo viskoznosti premaza. Zato se dodajajo premazom, ki se jih nanaša s čopiči in valjarji. Taki premazi se nanašajo z lahkoto, a so dovolj viskozni, da po nanašanju ne tečejo.

Dodatki, ki varujejo premaz pri zmrzovanju in tajanju, se običajno dodajajo premazom, pri katerih je transportno sredstvo voda. Ti dodatki znižujejo zmrzišče vode in s tem omogočajo delo tudi pri nižjih temperaturah okolja.

Pigmenti se dodajajo zaradi doseganja želene barvitosti in drugih vizualnih učinkov. Lahko se kombinirajo z različnimi prahi in luskinami ter tako še dodatno spremenijo izgled premaza. V tako imenovanih kovinskih barvah se uporabljajo kovinske luskice.

Plastifikatorji povečujejo podajnost oz. plastičnost premazov, ki se zaradi tega ne poškodujejo pri deformiranju podlage.

Premazi, katerim so dodani stabilizatorji, postanejo bolj odporni na toploto, kemične vplive in ultravijolično sevanje. Pogosto se uporabljajo za zaščito pred določenim vplivom okolja ali uporabo premazanega objekta.

Redčila se uporabljajo za zniževanje viskoznosti in povečanje sposobnosti enakomernega razlivanja premaza po površini.

Bela barva za zunanje površine zgradb je običajno sestavljena iz 60% pigmenta in 40% transportnega sredstva (odstotki mase). Pigment je običajno sestavljen iz 15% titanijevega dioksida, 50% osvinčenega cinkovega oksida (35% svinca) in 35% magnezijevega silikata. Transportno sredstvo je sestavljeno iz 67% lanenega olja in 33% mineralnih špiritov.

Črni emajl je tipično sestavljen iz 21% pigmenta in 79% transportnega sredstva. Pigment je sestavljen iz 24% oglenih saj in 76% silikatov in kremena.

Transportno sredstvo je sestavljeno iz 10% smol, 12% rastlinskih olj in 78% mineralnih špiritov.

Premazi na osnovi vode

Osnovna značilnost premazov na osnovi vode je, da voda služi kot transportno sredstvo in kot redčilo. Ti premazi običajno nimajo močnega vonja, niso vnetljivi, hitro se sušijo, enostavno jih je odstraniti in se uporabljajo predvsem v notranjih prostorih. Vezivo pri teh premazih je običajno kombinacija olj in smol. Premazi na osnovi vode so občutljivi na zmrzovanje in povišane temperature.

V uporabi sta predvsem dve vrsti premazov na osnovi vode: oljne emulzije in lateksne emulzije. Oljne emulzijah so suspenzije vode in veziva sestavljenega iz olj in smol. Lateksne emulzije so disperzije, pri katerih so v vodi razpršene smole v obliki drobnih kroglic. Po izhlapevanju vode se kroglice smole povežejo in tvorijo čvrst film. Tako nastali premaz ni občutljiv na ogenj in se lahko čisti z vodo. Smole, ki se uporabljajo v takih premazih so akrili, butadien-stireni in vinili. Uporabljajo se lahko za prekrivanje tako zunanjih kot notranjih površin zgradb. Polivinil acetatni lateksi so cenejši od akrilnih, imajo sposobnost prepuščanja hlapov ("dihanje") in zato se premazane površine ne rosijo.

Lateks je disperzija polimera v vodi. Posebni vrsti lateksa sta organisol in plastisol. Organisol se sestoji iz delcev polimera, ki je razpršen v organskem topilu, plastisol pa se sestoji iz delcev polimera, ki je razpršen v plastifikatorju.

Firneži

Firneži so podobni barvam, le da ne vsebujejo pigmenta. Vlogo veziva imajo umetne ali naravne smole. Različne smole se kombinirajo zaradi doseganja želenih fizikalnih ali kemičnih učinkov. Umetne smole v firnežih so alkidi, epoksidi, melamini, fenoli, silikoni in uree. Pogosto se ime firneža nanaša na smolo, ki je uporabljena za vezivo (alkidni firneži, melaminski firneži itd.). Smole se raztopijo v sušilnih naravnih oljih rastlinskega ali živalskega izvora (sojino, koruzno, bombažno, ribje olje), ki so bila delno oksidirana ali polimerizirana pri visokih temperaturah. Mešanici se dodatno razredči z raztopili. Firnež je torej premaz, narejen na osnovi olj. Premaz se strdi, ko olja oksidirajo v stiku z zrakom in ko raztopila izhlapijo. Gladkost in sijajnost firnežev je odvisna od količinskega razmerja smol in olj v transportnem sredstvu. Ti premazi se uporabljajo za zunanjo zaščito lesa in za notranje dekoracije.

Firneže pogosto zamenjujejo s šelaki. Šelaki so dragocene naravne smole, ki jih izločajo žuželke (azijska lakova ušica). Smole se razredčijo z alkoholom. Šelakov premaz se lahko tudi odstrani z alkoholom.

Emajli

Emajli so mešanice firnežev in pigmenta. Emajli narejeni na osnovi umetnih smol vse bolj nadomeščajo emajle narejene na osnovi naravnih smol. Umetni emajli imajo po strditvi s polimerizacijo zelo gladko površino. Emajli se lahko

trdijo na zraku ali pa v pečeh. Obstaja več vrst emajlov, katerih ime se nanaša na vrsto umetne smole, iz katere so narejeni.

Akrilni emajli imajo zelo obstojno barvo celo pri povišanih temperaturah. Alkidni emajli imajo obstojno barvo in svetlost površine, ob enem pa so tudi odporni na vlago in kemične vplive. Epoksidni emajli običajno strjujejo v pečeh na povišanih temperaturah (pečenje) in so prožni ter odporni na kemične vplive. Fenolni emajli so sicer krhki, toda odporni na olja, vodo in kemikalije. Silikonski emajli so odporni na povišane temperature. Z dodajanjem silikonskih smol ostalim smolam se na splošno dosega višja temperaturna odpornost emajla. Uretanski emajli so posebej odporni na obrabo, vinilni emajli pa na vlago.

Laki

Laki so na splošno raztopine celuloznih smol v hlapljivih organskih raztopilih. Laki so sestavljeni iz polimerov visoke molekularne mase, ki po izhlapevanju raztopila tvorijo trden premaz. Kakovost in ostale lastnosti premaza se lahko spreminjajo z dodajanjem plastifikatorjev in različnih smol. Odpornost na vlago in kemične vplive se poveča z dodajanjem akrilnih smol. Butadien-stiren se dodaja zaradi izboljšanja sprijemnosti laka s podlago in zaradi zvišanja njegove odpornosti na vlago in kemične vplive. Toplotna odpornost lakov se poveča z dodajanjem celuloznega acetata. Vinilne smole povečajo odpornost na olja in na obrabo. Visoko odporni laki za avtomobile so narejeni na osnovi celuloznega nitrata.

Barve

Barve so narejene na osnovi različnih naravnih in umetnih smol. Ena izmed osnovnih vrst smol za pripravo barv je alkidna smola. Alkidi se lahko uporabljajo v kombinaciji z alkoholi, različnimi olji in mastnimi kislinami. Z alkidnimi smolami se lahko izboljšajo tudi lastnosti drugih vrst premazov. Uporabljajo se mešanice alkidov z butadien-stirenom, akrili, fenoli in polivinil acetatom. Z mešanjem različnih smol se dosegajo dobre sprijemne lastnosti barv ter njihova prožnost in vodoodpornost. Splošno uporabljane aerosolne barve so narejene iz mešanic alkidov in sušilnih olj. Alkidne barve z višjim odstotkom olj (okoli 60%) se uporabljajo za površine, ki so izpostavljene vlagi (plovila, zunanje površine stavb), tiste z manjšo količino olj (do 40%) pa za manj izpostavljene površine (pohištvo, notranji premazi). Alkidne barve so občutljive na delovanje ultra-vijoličnih žarkov, ki vplivajo na svežino njihove barve in gladkost površine.

Akrilne barve se uporabljajo v avtomobilski industriji, ker so bolj odporne na zunanje vplive in zato lahko dalj časa ohranijo svežino površine. Te barve imajo dobre prekrivne lastnosti in prekriti površini nudijo dobro zaščito ob razmeroma nizki ceni.

Bitumenske barve so narejene iz lesnega katrana, ki je raztopljen v mineralnih špiritih. So praktično neporozne in zato nepropustne za vlago in pline. Imajo pa to slabo lastnost, da se pod vplivom sončne toplote in svetlobe krčijo ter razpokajo.

Epoksidne barve se dobro prilegajo na površino in so odporne na mnoga raztopila in čistilna sredstva. Na površino jih lahko nanašamo brez predhodnega

premaza. Odlikuje jih prožnost, odpornost na obrabo, odpornost na povišano temperaturo okolja in temperaturo premazane površine (do 150ºC). Zato se veliko uporabljajo za zaščito strojev in ostale industrijske opreme.

Celuloznonitratne barve se hitro sušijo. Etil celulozne barve sodijo med najbolj prožne barve in so tudi odporne na kisline in luge.

Fenolne barve so zelo trajne ter odporne na kemikalije in temperaturo. Pogosto se uporabljajo kot dvokomponentne barve, ki se strjujejo z oksidacijo. Zaradi velike kemične odpornosti se uporabljajo za premazovanje površin različnih industrijskih posod in rezervoarjev.

Uretanske barve in emajli sodijo med najbolj kakovostne premaze. Izredno dobro se sprimejo s površino in jo ščitijo pred obrabo, vlago in kemikalijami. So pa občutljive na ultravioletno svetlobo, ki jih razkraja. Poliuretanske barve se strjujejo ob pomoči katalizatorja in zato sodijo v zvrst dvokomponentnih premazov. Pri kemični reakciji sodeluje vlaga iz okolja, oksidacija uretanskih olj pa poteka s pomočjo kisika iz zraka. Te barve se uporabljajo za visokokakovostne premaze in med ostalim tudi v pohištveni industriji.

Anorganske prevleke

Značilnost anorganskih prevlek je, da pri nanosu na neko površino reagirajo z osnovnim materialom in s tem postanejo del same površine. Osnovne vrste anorganskih prevlek so: anodna zaščita, kromiranje, silikoniziranje, oksidacija in fosfatizacija.

Z **anodno oksidacijo** se material na ščiteni površini pretvori v oksid z oddajanjem elektronov. Kovinski izdelki se potapljajo v elektrolitsko kopel (borova, kromova, oksalna ali žveplova kislina). Posode z elektrolitom, v katere se potapljajo kovinski predmeti, imajo svinčeno zaščitno prevleko. Ta deluje kot katoda (-). Elektrolit postane anoda (+). Električni tok deluje z napetostjo od 12 do 24 V. Najpogosteje se uporablja žveplova kislina v koncentraciji od 15 do 25%. Z oksalno in borovo kislino se dosegajo posebni efekti na kovinski površini. Oksalna kislina na kovinski površini ustvarja rumenkasti sijaj. Borova kislina se uporablja za zaščito dielektičnih folij za električne kondenzatorje, ker ima anodni film izredno dielektrično trdnost. Oksidirana plast na površini kovinskih predmetov je debela okoli 0,13 mm. Pri znižanih temperaturah se lahko dosežejo debelejše plasti oksida (do 0,25 mm). Debelino plasti omejujeta narava samega procesa in temperatura elektrolita. Ostali parametri, ki vplivajo na kakovost in lastnosti zaščitne plasti, so lastnosti kovine, iz katere je narejen ščiteni izdelek, vrsta elektrolita, električna napetost, koncentracija elektrolita in trajanje procesa. S časom trajanja procesa se kontrolira debelina prevleke. Proces traja je običajno 30 minut. Z dodatki elektrolitu se lahko doseže različna barva zaščite. Z anodnim procesom se običajno ščitijo izdelki iz aluminijevih zlitin, magnezijevih zlitin, cinka in jekla.

Kromiranje je proces nanašanja tankih zaščitnih prevlek iz kroma. Uporablja se za protikorozijsko zaščito železovih kovin. Izdelki se segrevajo v zaprtih komorah, v katerih se nahajata krom in vodik. Kovinski predmet absorbira okoli 30% kroma do globine 0,01 - 0,13 mm pod površino. Kromirane površine so odporne na korozijo, obrabo in delno tudi na manjše koncentracije kislin.

Silikoniziranje je postopek, ki je v osnovi podoben kromiranju, le da se v komori namesto kroma in vodika nahajata silicijev karbid in klor. Debeline zaščitne plasti znašajo okoli 2,5 mm.

Oksidne prevleke ščitijo kovino pred korozijo. Nastanejo pri izpostavljanju kovine oksidirajočim plinom ali kopelim pri povišani temperaturi. Običajne oksidne prevleke so črni oksid, dikromatne prevleke in temnosive prevleke ("gun-metal").

Fosfatne prevleke nastanejo s potapljanjem ali škropljenjem kovinskega izdelka z žveplovim ali manganovim oksidom. Manganske prevleke imajo značilno zeleno barvo. Fosfatna zaščita se uporablja pri železovih kovinah, aluminijevih zlitinah, kositrnih in cinkovih izdelkih.

Katodna zaščita površin

Katodna zaščita površin kovinskih predmetov se dosega s potapljanjem predmeta v elektrolit, ki vsebuje snov za površinsko zaščito predmeta. Pri tem predmet postane katoda (-), kopel ali druga elektroda pa služi kot anoda (+). Ko steče tok, se material iz anode nalaga na katodi. S katodno zaščito se oblagajo izdelki iz kadmija, kroma, bakra, svinca, niklja, kositra, cinka in žlahtnih kovin. Na ta način se lahko ščitijo tudi predmeti iz železovih kovin. S katodno prevleko se izboljša izgled predmeta, ustvarja se protikorozijska zaščita in povečuje se odpornost na obrabo.

Prevleke iz niklja se običajno nanašajo na jeklene površine in s tem se jeklo učinkovito ščiti pred korozijo. Z nikljem se lahko prevlečejo predmeti iz aluminijevih zlitin in bakra. Prevleke iz kadmija so strupene, zato se ne smejo uporabljati za predmete, ki lahko pridejo v stik s hrano. Krom se uporablja za protikorozijske prevleke jekla in aluminija, ki so trde in zato odporne na obrabo. Pogosto se kromova prevleka uporablja kot zaključna plast v večplastni zaščiti površin, ki so pred tem zaščitene s plastjo niklja, bakra ali medenine. Medeninaste prevleke imajo dekorativno in protikorozijsko vlogo. Pogosto se po poliranju dodatno zaščitijo z organskimi prevlekami.

Kositer ni strupen in se zato uporablja za zaščito pločevink za shranjevanje živilskih izdelkov. Včasih se kombinira z bakrom, nikljem in cinkom.

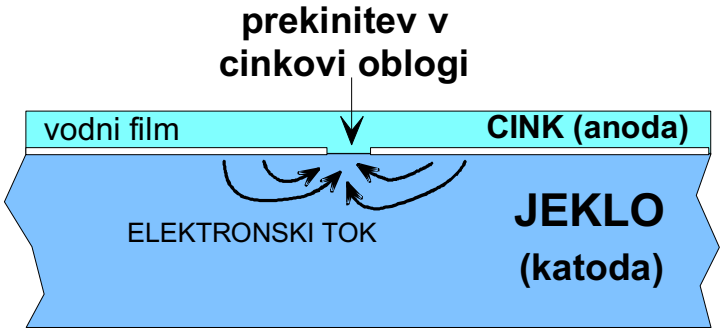
Katodna zaščita se uporablja tudi v elektroindustriji za zaščito kontaktnih elementov pred oksidacijo in korozijo zaradi kemičnih vplivov.

Potapljanje, galvanizacija in pršenje

Nekatere kovinske in nekovinske prevleke ter polimerni zaščitni premazi se nanašajo s postopki, kot so potapljanje, izdelava tankih prevlek in pršenje. S temi postopki se nanašajo aluminij, svinec, kositer in cink ter keramični materiali (stekla, keramične glazure).

Hladno potapljanje je proces, pri katerem zaščitni material na površini nekega kovinskega izdelka zamenja vrhnjo tanko plast osnovnega materiala. Ta proces je možen v primeru, ko je elektrokemični potencial osnovne kovine višji od potenciala zaščitne kovine. Nikelj se pogosto uporablja za hladno potapljanje jekla in aluminija.

Vroče potapljanje je proces, pri katerem se nek izdelek potopi v kopel iz zaščitnega materiala. Ko gre za kovine, mora potopljeni material imeti višje tališče od zaščitnega materiala. Jekleni ali bakreni izdelki se lahko potapljajo v staljeni aluminij, svinec ali kositer. Galvanizirano jeklo je jeklo, ki je prekrito s cinkom s postopkom toplega potapljanja ali s katodnim postopkom. Cinkova prevleka ščiti jeklo pred korozijo. V vlažnem okolju cinkova prevleka oksidira in spremeni barvo iz značilne modrosrebrne v belo. V vlažnem okolju se cinkova prevleka obnaša kot anoda, jeklo pa kot katoda. Zato se tudi poškodbe v cinkovi prevleki same zaščitijo s cinkom zaradi procesa naravne galvanizacije, kot je to prikazano na sliki 100.



Slika 100: Proces naravne zaščite prekinitve v cinkovi prevleki jekla

Izdelava **trdih prevlek** je postopek, s katerim se na del nekega kovinskega izdelka navari zaščita iz trše kovine. Dodani material je ponavadi visoko legirano jeklo ali zlitine, ki vsebujejo kobalt in nikelj. Na ta način se izdelujejo konice različnih orodij, ki imajo visoko odpornost na obrabo in korozijo. Material se lahko dodaja lokalno ali na večji površini. Nekateri izdelki so lahko narejeni iz mehkega, duktilnega jekla, ki je oblečeno s tršim legiranim jeklom. Pri takih izdelkih so združene dobre lastnosti obeh vrst jekel - trdnost ter duktilnost mehkega jekla in trdota ter korozijska odpornost legiranega jekla (večplastne kuhinjske posode).

Pri **fluidnem postopku** se segreti predmeti potapljajo v posodo, v kateri je zaščitna snov. Običajno je to termoplast (PVC). Polimerni material je v obliki granul različnih barv. V posodo se vpihava zrak pod pritiskom tako, da se polimer enakomerno razlije po segreti površini izdelka. Površine izdelkov so predhodno ustrezno obdelane s peskanjem zato, da se doseže boljša sprijemnost s polimerno prevleko. Na tak način se lahko prevlečejo vsi izdelki, ki se lahko segrejejo.

Pršenje kovin je postopek nanašanja drobnih kovinskih delcev s pomočjo stisnjenega zraka. Drobci kovine se na površini, na katero jih nanašajo, sploščijo in nalagajo v obliki drobnih lusk. Učinek prekrivanja je večji, če je površina hrapava, zato se ta predhodno obdela s peskanjem ali s kakim drugim podobnim postopkom. Debelina takih prevlek običajno ne presega 0,13 mm. Kovinski predmeti se lahko po pršenju toplotno obdelajo tako, da se kovinske luske stalijo in povežejo v gosto zaščitno plast.

Vakuumsko prekrivanje je proces, pri katerem se na površino nekega izdelka v vakuumu nanaša tanka plast uparjene kovine. V vakuumu imajo kovinske pare visok parni pritisk in nizko vrelišče. Na tak način se z aluminijem ali cinkom prekriva kondenzatorski papir. S tem postopkom se tudi nanašajo kovinske prevleke na izdelke iz polimerov.

Steklasto emajliranje je postopek, s katerim se nanaša steklo na kovinsko podlago. Žaroodpornim steklenim kroglicam se dodajajo kemikalije, pigmenti in kaolin. Po nanosu na površino se izdelek peče in pri tem se ustvari tanka steklasta plast, ki je dobro sprijeta s kovinsko površino. Taka prevleka je odporna na toploto, obrabo in kemikalije.

VPRAŠANJA

1. Pojasnite, kaj je to lepljenje in kako se povežeta lepilo in lepljenec.
2. Pojasnite pojme: lepljivost, viskoznost lepila, odprti čas, delovni čas in čas otrditve lepila.
3. Opišite idealne razmere pri lepljenju.
4. Katere so prednosti in katere pomankljivosti povezovanja z lepljenjem v primerjavi z ostalimi načini povezovanja gradiv?
5. Naštejte vrste naravnih lepil in navedite osnovne značilnosti vsake izmed skupin.
6. Opišite lastnosti lepil živalskega izvora in lepil rastlinskega izvora.
7. Naštejte vrste lepil iz umetnih snovi in navedite glavne značilnosti posameznih skupin.
8. Naštejte vrste termoplastnih lepil in opišite njihove značilnosti.
9. Naštejte vrste duroplastnih lepil in opišite njihove značilnosti.
10. Pojasnite probleme, ki so povezani z oblikovanjem lepljenih stikov.

11. Skicirajte in pojasnite lastnosti enostavnejših vrst lepljenih stikov.
12. Kakšna je vloga in kakšne so zahtevane lastnosti tesnilnih materialov?
13. Kaj je treba upoštevati pri izbiri tesnilnega materiala?
14. Pojasnite razliko med uporabo mineralnih malt in kitov pri tesnenju stikov in razliko med lastnostmi tako zatesnjenih stikov.
15. Kaj so to mastiks tesnilne mase in za katere namene se uporabljajo?
16. Pojasnite prednosti in pomankljivosti polimernih tesnilnih mas.
17. Kaj je treba upoštevati pri načrtovanju in izvedbi tesnenja stikov?
18. navedite vrste polimernih premazov poznate in njihove osnovne naloge?
19. Kaj sestavlja polimerne premaze in kakšna je vloga posamezne sestojine?
20. Naštejte vrste dodatkov in njihov vpliv na lastnosti polimernih premazov.
21. Opišite vrste in lastnosti premazov na osnovi vode.
22. Opišite lastnosti firnežev in pojasnite razliko med firneži in šelakom.
23. Kaj so to emajli in kaj laki?
24. Opišite lastnosti osnovnih vrst barv glede na vrste smol, ki se uporabljajo kot vezivno v transportnem sredstvu.
25. Naštejte vrste anorganskih prevlek in opišite, kako se izvajajo.
26. Pojasnite razliko med katodno in anodno zaščito kovin.
27. Pojasnite razliko med zaščito s hladnim in vročim potapljanjem.
28. Kaj je to fluidni postopek nanašanja premazov in kaj so trde prevleke.
29. Kako se izvaja zaščita s pršenjem in kako z vakumskim postopkom.

PRESKUŠANJE GRADIV

SPLOŠNE LASTNOSTI PREISKAV

Preskušanje gradiv obsega postopke, s katerimi se ugotavljajo njihove fizikalne in kemične lastnosti. Preučevanje in poznavanje lastnosti gradiv je predpogoj za uspešno snovanje konstrukcij, izgradnjo objektov in spremljanje njihovega obnašanja v vsej življenjski dobi.

Metode preskušanja so odvisne od namena preiskav in vrste gradiv. V določenih primerih so enake metodam preskušanja konstrukcijskih elementov (na pr. neporušne metode). Posamezne metode so se razvile v samostojne znanstvene discipline (holografija, tenzometrija itd.).

Preglednica 37: Raztros (v) rezultatov preiskav gradiv

SKUPINA GRADIV	RAZTROS (v)
keramika	5 do 10 %
opeka	8 do 15 %
beton	5 do 15 %
kamen	8 do 20 %
les	8 do 20 %
kovine	2 do 5 %
polimeri	2 do 4 %

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}}\ (\%), \quad \bar{x} = \frac{\sum_i^n x_i}{n}, \qquad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\bar{x} - x_i)^2}{n}} \tag{14-1}$$

Preskušanje gradiv običajno pojmujemo kot preskušanje tehničnih materialov, ki se v graditeljstvu uporabljajo kot surovine, polizdelki ali končni izdelki. Postopki se standardizirajo, kar omogoča primerjavo enakovrstnih gradiv različnega porekla in proizvajalca. Veliko število in raznovrstnost gradiv narekuje nastanek velikega števila predpisov in standardov. Razvoj znanosti in tehnologij pogojuje tekoče dopolnjevanje in spreminjanje standardov, vendar je lahko pri nekaterih postopkih za ugotavljanje lastnostih gradiv veljavnost vsebine standardov daljnosežna (deset in več let). Predpisi in standardi vplivajo na ekonomičnost proizvodnje, porabe in uporabe gradiv. Nastanek novih gradiv narekuje razvoj novih postopkov in metod preskušanja. Poseben problem je vzpostavljanje povezav med lastnostmi, ki se jih da ugotoviti le pri delovanju kratkotrajnih vplivov, in lastnostmi, ki pridejo do izraza le pri dolgotrajnih vplivih. Življenjska doba zgradb je od 50 do 100 let, prometnic in energetskih objektov od 30 do 50 let, posamezne vrste materialov pa preskušajo šele nekaj deset let ali celo manj.

Za gradiva, ki sodijo v skupino keramik in naravnih polimernih kompozitov (les), je značilen velik raztros rezultatov preskušanja. V preglednici 37 je prikazano nekaj primerov raztrosa rezultatov preiskav. Raztros je izražen s koeficientom variacije standardnega odklona. Pri gradivih z večjim raztrosom je potrebno

preskusiti večje število vzorcev. Raztros lastnosti, ki je posledica narave gradiva, se upošteva tudi pri njihovi uporabi v konstrukcijskih elementi in to z velikostjo varnostnega količnika.

Namen preskušanja

Preskušanje gradiv se glede na uporabo rezultatov preiskav deli na:

- predhodne preiskave,
- kontrolne preiskave in
- znanstvene preiskave in raziskave.

Gradiva se preskušajo v začasnih laboratorijih na gradbiščih ali v posebnih, stalnih laboratorijih, ki delujejo v okviru inštitutov, gradbenih podjetij in tovarn za izdelavo gradbenih materialov. Začasni laboratoriji, ki so postavljeni na velikih gradbiščih, so pogosto ozko specializirani za potrebe velikega objekta (pregrada, avtocesta, betonarna) in za velike količine preiskav samo določenega, manjšega števila vrst gradiv. V takih laboratorijih se z enostavnejšimi in hitrimi postopki spremlja gradnja in zagotavlja kakovost vgrajenih gradiv. Končne preiskave se izvajajo v laboratorijih neodvisnih institucij.

Laboratorij pri betonarni je primer specializiranega laboratorija, ki dnevno spremlja in kontrolira izdelek betonarne - beton. V takem laboratoriju kontrolirajo vhodna gradiva (voda, gramoz, cement, dodatki, konsistenca sveže betonske mešanice) in pripravljajo standardizirane vzorce za preiskave v neodvisnih laboratorijih (kocke). S hitrimi preiskavami se lahko ugotovi ali je neko vhodno gradivo dvomljive kakovosti (cement na pr.), sum pa se potrdi ali zavrže v laboratoriju neodvisne institucije.

Predhodne preiskave

Namen predhodnih preiskav je spoznavanje gradiv, iz katerih želimo zgraditi objekt. Na izbiro gradiv za posamezni objekt vplivajo različni pogoji, izmed katerih je kakovost na prvem mestu. Poleg kakovosti so zelo pomembne tudi možnosti transporta, shranjevanja, dobavljiva količina, ekološke posledice uporabe izbranih gradiv itd.

Načrt predhodnih preiskav vsebuje seznam gradiv in njihovih lastnosti, ki jih je treba preizkusiti. Sestavni del načrta je tudi analiza možni surovinskih virov. Pri kompozitnih gradivih (beton na pr.) se je treba odločiti, katere kombinacije sestavin bomo preskusili. Načrtovanje predhodnih preiskav običajno ne povzroča težav, razen v primerih velikega možnega števila kombinacij sestavnih komponent gradiv (značilno za načrtovanje betona v surovinsko neznanem okolju - Rusija, Irak itd.). V takih primerih se na osnovi prvih preiskav izločijo neustrezne kombinacije in sestavni materiali, ki ne ustrezajo zahtevanim kriterijem. V nekaj začetnih preizkusih se lahko število kombinacij zelo zniža, kar omogoča hitrejše nadaljevanje predhodnih preiskav.

Kontrolne preiskave

Namen kontrolnih preiskav je ugotavljanje kakovosti proizvedenih gradiv. Večinoma jih izvajamo s standardiziranimi napravami in inštrumenti ter s standardiziranimi postopki. Te preiskave so najbolj množične, rutinske, izvaja

pa jih ustrezno tehnično izurjeno osebje. Sodobne preizkusne naprave so avtomatizirane tako, da se meritve obremenitev in deformacij beležijo in obdelujejo avtomatično. S tem je možnost napake zaradi človeškega količnika močno zmanjšana.

V gradbeništvu se vgrajujejo ogromne količine gradiv. Potreben je stalen nadzor načina uporabe gradiv in sprotna kontrola njihovih lastnosti. Sled velikega števila potrebnih preizkusov se ti morajo opravljati tudi v laboratorijih, ki delujejo neposredno na gradbišču.

Kontrolne preiskave spremljajo gradnjo, pogosto pa jih je treba opraviti tudi po zaključku gradnje. Nekatera gradiva se preskušajo pri različnih starostih (preskušanje sveže mešanice betona in otrdelega betona). Pri nekaterih objektih (vodne pregrade) se gradiva kontrolirajo tudi po daljšem času zaradi spremljanja spremembe njihovih lastnosti (obraba, korozija, staranje). Take preiskave so še zlasti pomembne pri snovanju prenove, sanacije ali spremembe namembnosti objekta.

Pri kontrolnih preiskavah je pomembna "ponovljivost" rezultatov preiskav, to je njihova zanesljivost in nespremenljivost pri ponovnih preiskavah istih gradiv. Postopki preiskav morajo biti taki, da ne vplivajo na povečanje raztrosa rezultatov preiskav. Na rezultate preizkusov lahko vplivajo različni vplivi, kot so hitrost obremenjevanja preizkušanca, ekscentričnost obtežbe, način vnosa obremenitve, temperatura preizkušanca in okolja, različni vplivi okolja itd. Nadvse je pomembna natančnost preizkusnih naprav in inštrumentov, ki morajo biti redno kontrolirani in stalno umerjeni. Ravno tako je zelo pomembna izurjenost osebja in njihovo vestno opravljanje preskusov. Posebni standardi (serija standardov SIST EN 45001 do 45012) predpisujejo pogoje za opravljanje preskusov in zadevajo tako laboratorije in opremo kot tudi osebje.

Vpliv načina preizkušanja na raztros rezultatov (preiskave sveže mešanice betona - ista mešanica, več odvzetih vzorcev) se lahko loči le pri nekaterih vrstah preiskav, kar pa žal ni tako v večni primerov. V primerih, ko se lahko loči standardna deviacija postopka (σ_1) in lastnosti gradiva (σ_2), se standardna deviacija preizkusa določi z izrazom:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \qquad (14\text{-}2)$$

Znanstvene preiskave in raziskave

Znanstvene preiskave omogočajo spoznavanje temeljnih lastnosti gradiv in njihovo soodvisnost (na pr. proces hidratizacije cementa, vpliv mineralnih sestavin na proces vezanja, vpliv strukture gradiva na njegove fizikalne lastnosti). Poleg standardiziranih postopkov se zelo uporabljajo nestandardizirani postopki in pripomočki, ki pa po določenem razvoju lahko postanejo osnova za standardizirane postopke in pripomočke. Tovrstne raziskave praviloma vodijo visoko kvalificirani raziskovalci. Znanstvene preiskave so običajno dolgotrajne, zahtevajo posebno in dragoceno opremo, včasih pa se lahko kljub visokim stroškom končajo tudi neuspešno.

Posebne vrste preiskav so usmerjene k reševanju praktičnih problemov ali razvoju standardnih preiskav gradiv (aplikativne znanstvene raziskave), razvoju novih ali modificiranih vrst gradiv, tehnologij, njihovega pridobivanja, proizvodnje in uporabe.

Porušne in neporušne preiskave

Preglednica 38: Pregled postopkov za določanje lastnosti gradiv

Lastnost gradiva	Vrsta preiskave		
	neporušna	delno porušna	porušna
Gostota (porozno gradivo)	✓		
Gostota (neporozno gradivo)			✓
Vlažnost	✓		
Vpojnost	✓		
Poroznost - absolutna			✓
Poroznost - navidezna	✓		
Toplotna prevodnost	✓		
Toplotna kapacitivnost	✓		
Kapilarni dvig	✓		
Akustične lastnosti	✓		
Elastični moduli	✓		
Plastične lastnosti			✓
Statična trdnost			✓
Udarna trdnost			✓
Meja utrujanja			✓
Udarna žilavost			✓
Zmrzlinska odpornost			✓
Obraba zaradi trenja		✓	
Erozija		✓	
Trdota		✓	
Korozija (z elektr. potencialom)	✓		

Mehanske lastnosti gradiv (trdnost, trdota, elastičnost, plastičnost) lahko v veliki večini primerov preskušamo s preiskavami, ki bistveno spremenijo lastnosti preskušancev. To so porušne preiskave, ki so nujne tudi pri preiskavah nekaterih drugih lastnosti gradiv, kot so požarna odpornost, zmrzlinska odpornost, vsebnost različnih primesi itd. Gradivo je včasih potrebno zdrobiti in ga kemično preskusiti. Iz konstrukcijskih elementov se vzorci odvzemajo tako, da se ne spremeni odpornost konstrukcije (vrtanje standardiziranih valjev iz betonskih elementov, odvzem delov kovinskih konstrukcij). Odvzem vzorcev je včasih zelo zahteven zaradi lokalnih razmer v konstrukciji (gosto položena armatura itd.).

Mnoge fizikalne lastnosti se preskušajo z neporušnimi metodami oz. postopki, pri katerih se lastnosti preskušancev bistveno ne spremenijo. Gostota materiala se ugotavlja s tehtanjem in merjenjem prostornine preskušanca, hitrost širjenja zvoka se meri pri vzbujanju visokofrekvenčnih vibracij (v območju nizkih napetosti) itd.

Pri mnogih lastnostih gradiv se da povezati rezultate porušnih in neporušnih preiskav. Pri tem se porušne metode uporabljajo v omejenem obsegu in kot pomoč pri kalibraciji neporušnih metod. Na tak način lahko z neporušnimi metodami posredno spoznamo lastnosti velikega števila preskušancev, ne da bi jih porušili, ker porušimo samo reprezentančne vzorce.

Obstajajo tudi delno porušne metode, pri katerih se doseže določena stopnja poškodovanosti vzorca v večjem konstrukcijskem elementu. Ta stopnja

poškodovanosti je taka, da ne povzroča bistvenega znižanja odpornosti in uporabnosti konstrukcijskega elementa.

Statične in dinamične preiskave

Glede na hitrost obremenjevanja preskušancev ločimo statične in dinamične preskuse. Pri statičnih preiskavah se obtežba, ki deluje na preskušance, počasi spreminja s časom. Pri dinamičnih preiskavah se obtežba med preiskavo hitro spreminja. Preiskave mehanskih lastnosti ni mogoče opraviti brez sprememb obtežbe, vendar se omejuje hitrost njene spremembe. Dinamične in statične preiskave je težko natančno razmejiti. Ločevanje preiskav na statične in dinamične je posledica dejstva, da se pri hitrem obremenjevanju ista gradiva obnašajo bistveno drugače kot pri počasnem obremenjevanju. Pri hitrem obremenjevanju se nekateri materiali odzivajo kot krhki, pri počasnem pa kot duktilni (parafin pri sobni temperaturi). To zlasti velja za elastoplastična gradiva (mehka jekla, nekatere vrste polimerov). Za vsako gradivo je določljiva "časovna meja obremenjevanja", pri kateri se spremenijo njihove lastnosti zaradi hitrejšega oz. počasnejšega obremenjevanja. Obstaja tudi mejni čas, ki deli dinamično in statično obremenjevanje posameznega materiala. Zaradi tega je pri nekaterih statičnih preskusih predpisana največja hitrost obremenjevanja (na pr. 0,5 MPa/s pri preskusu trdnosti betona), ali pa čas stopnjevanja obtežbe od ničelne vrednosti do porušne obtežbe (na pr. 15 s pri preskusu trdote kovin z vtiskanjem kroglice). Ko elastoplastični materiali preidejo mejo elastičnosti se obnašajo delno kot viskozne tekočine. V določenem času se razvijajo plastične deformacije, nato pa se ponovno vzpostavi ravnovesno stanje (utrditev). Zato so rezultati preiskav odvisni od hitrosti obremenjevanja preskušanca.

Preiskave se ločijo tudi po številu ponovitev obremenitve (enkratne ali ponovljene obremenitve) pri statičnih in pri dinamičnih preskusih. Natezni porušni preskus mehanskih lastnosti materiala s počasnim obremenjevanjem sodi med statične preiskave z enkratno obtežbo. Preskus utrujanja materiala z velikokrat ponovljenim obremenjevanjem je lahko dinamičen (visoka frekvenca spremembe obtežb) ali statičen (počasno spreminjanje obtežb). V elastičnem območju odziva preskušancev so razlike odziva na dinamične in statične obremenitve razmeroma majhne. Preizkusi z večkratnim, počasnim ponavljanjem obremenitev se imenujejo tudi kvazidinamični preskusi.

Tehnološke preiskave

S tehnološkimi preiskavami se določajo tiste lastnosti gradiv, ki so pomembne za njihovo praktično uporabo, a jih ne moremo določiti s statično ali z dinamično preiskavo, niti z določanjem fizikalnih lastnosti gradiv. S tehnološkimi preiskavami se simulirajo zunanji vplivi, ki jim je gradivo izpostavljeno v času uporabe.

Primer tehnološke preiskave je preskušanje betona in kamna na delovanje zmrzovanja in tajanja. Podatki, ki se dobijo pri statičnih in dinamičnih preiskavah (tlačna trdnost, upogibna trdnost, vpojnost, gostota itd.), ne zadoščajo za spoznavanje odziva gradiva na večkratno zmrzovanje in tajanje. Neko gradivo ima lahko mnoge dobre lastnosti, ki vplivajo na njegovo obnašanje pri nizkih temperaturah (visoko natezno trdnost, nizko stopnjo vpojnosti), ki pa same po sebi ne zagotavljajo zmrzlinske odpornosti. Le-ta je odvisna tudi od razporeditve por in njihove medsebojne povezanosti. Na osnovi podatkov o

lastnostih gradiva se lahko oceni njegova zmrzlinska odpornost, ki pa se lahko dejansko ugotovi le s preiskavo, ki ponazarja dejansko dogajanje v naravi. Zato je z vodo zasičen vzorec treba večkrat (nekaj desetkrat ali nekaj stokrat) zamrzniti in odtajati. Po cikličnem zmrzovanju in tajanju se s pregledom vzorca ugotavlja stopnja sprememb ali poškodb.

Osnovne značilnosti tehnoloških preiskav so:

- večje število preiskav v primerjavi z ostalimi vrstami preiskav,
- simulirajo se razmere, ki jim je gradivo izpostavljeno v naravi,
- ne določajo se osnovne lastnosti gradiv, temveč lastnosti pri kombiniranih pogojih,
- rezultati se opisujejo z enotami, ki se razlikujejo od enot pri mehanskih preiskavah,
- rezultati se pogosto prikazujejo v opisni obliki, brez uporabe merskih enot (z ugotovitvijo da / ne, z opisom vrste sprememb).

MEHANSKE LASTNOSTI GRADIV

V splošnem obstajata dve osnovni strukturi trdne snovi: kristalična (molekule so v prostoru razporejene po nekem pravilu) in amorfna (molekule so po prostoru nepravilno razporejene). Kristali imajo lahko razporejene molekule tako, da so fizikalne lastnosti materiala v vseh smereh enake (izotropija) ali različne (anizotropija). Lastnosti materiala so lahko različne samo v treh medsebojno pravokotnih smereh (ortotropija). Amorfne strukture so anizotropne.

Struktura gradbenih materialov je zelo nepravilna in sestavljena. Ni gradiva, katerega sestavo bi lahko primerjali s kristalom. Posamezna gradiva so sestavljena iz več drobnih, v prostoru različno orientiranih kristalov (eruptivne kamenine, kovine). Obstajajo tudi gradiva z amorfno strukturo (steklo) in z verižno strukturo (polimeri). Struktura večine gradiv je sestavljena iz vseh mogočih tipov osnovnih struktur, kar je še posebej izrazito pri kompozitnih gradivih.

Značilen predstavnik mešane strukture materiala je beton, ki je kompozitno gradivo. Otrdeli beton sestavljajo cementni kamen, agregat in druga polnila ter pore. V njem so torej kristalne (zrna agregata, cementa) in amorfne strukture (geli) ter sedimentni ostanki (agregat). Enakomerno sestavljeni betoni bi lahko bili skoraj izotropni, kar pa je zaradi raznolikosti tehnologij priprave in vgradnje v praksi težko dosegljivo.

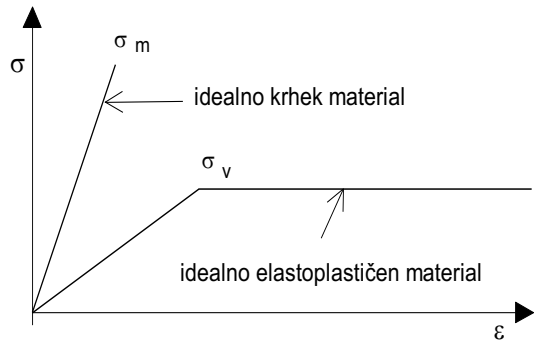
Pri gradivih so odstopanja dejanske strukture od osnovnih tipov struktur izredno velika, kar je tudi eden izmed vzrokov za veliki raztros rezultatov preiskav mehanskih lastnosti gradiv. V strukturi vsakega gradiva so mesta z različnimi mehanskimi lastnostmi. K temu dodatno prispeva poroznost gradiv, saj so stene med porami ponekod izredno tanke in predstavljajo lokalno oslabitev v primerjavi z območji, kjer so stene med porami debelejše.

Fizikalne in mehanske lastnosti gradiv so bolj odvisne od razporeditve različnih delov strukture (kristalov, amorfnih vključkov, sedimentnih delov, por) in njihovih medsebojnih povezav, kot od lastnosti posameznih delov struktur. Napake v osnovnih elementih materiala (v kristalu, amorfni strukturi ali verigi) lahko tudi do 100 krat zmanjšajo njihovo trdnost. To je posledica koncentracije

napetosti okoli defektov ali dislokacij. Ta pojav se ponavlja tudi na mejah med različnimi strukturami, ki sestavljajo gradivo.

Krhki in elastoplastični materiali

Glede na obnašanje materialov pri koncentracijah napetosti ločimo idealno krhke in idealno elastoplastične materiale (slika 101). Dejanska gradiva se obnašajo kot kombinacija obeh, s podarjeno eno izmed obeh lastnosti. Idealno krhki material se deformira samo elastično, porušitev pa nastopi na meji maksimalne napetosti (σ_m). Idealno elastoplastičen material se deformira elastično do meje tečenja (σ_v), dalje pa se deformacije večajo brez vpliva dodatne obremenitve (tečenje). Elastične deformacije so v soodvisnosti z napetostmi, kar je pri linearnoelastičnih materialih izraženo s Hook-ovim zakonom: $\sigma = \mathrm{E}\,\varepsilon$

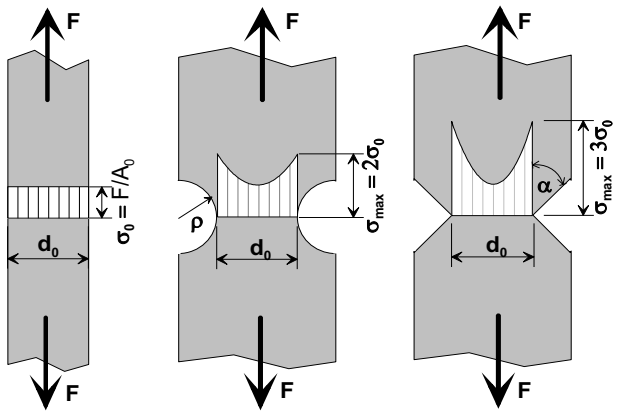


Slika 101: $\sigma - \varepsilon$ diagrama idealno krhkega in idealno elastoplastičnega materiala

Koncentracija napetosti je ilustrirana na primeru natezne obremenitve palice krožnega prereza (slika 102), ki ima lokalne oslabitve prereza. Količnik koncentracije napetosti v materialu, ki se obnaša po Hook-ovem zakonu, je funkcija geometričnih izmer:

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} = f\left(\frac{A}{A_0}, \alpha, \rho\right) \qquad (14\text{-}3)$$

kjer je A/A_0 razmerje površin prečnih prerezov polnega in oslabljenega dela palice, α naklonski kot in ρ polmer zakrivljenosti najožjega dela palice.



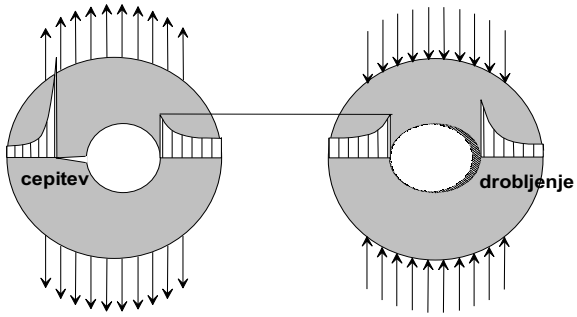
Slika 102: Koncentracija napetosti v zoženem delu natezno obremenjene palice

Razvoj razpok do porušitve v krhkem materialu poteka drugače kot v elastoplastičnem materialu. Različne so tudi napetostne razmere, ki spremljajo razvoj razpok do porušitve.

V krhkem materialu ostane razporeditev napetosti ves čas obremenjevanja enaka. Z večanjem zunanje obtežbe se proporcionalno večajo tudi napetosti do izčrpanja nosilnosti materiala v najbolj obremenjenem vlaknu. Takrat na tem mestu nastopi lokalno rušenje materiala, ki se obnaša kot zareza, pri kateri se poveča koncentracija napetosti zaradi dodatnega zoženja prereza. Pojav porušitve prereza hitro napreduje, tako da krhki lom celotnega prereza nastopi v približno 1/1000 sekunde.

Pri elastoplastičnih materialih ostane razporeditev napetosti enaka le, dokler se ne doseže meja tečenja materiala (σ_v) v najbolj obremenjenem vlaknu. Z nadaljnjim večanjem obtežbe se meja tečenja postopoma dosega tudi v drugih vlaknih proti sredini prereza, dokler se napetosti po celem prerezu ne izenačijo in postanejo enakomerno razporejene po prerezu (vse se izenačijo z mejo tečenja).

Iz opisanega mehanizma porušitve sledi, da zoženja prereza in zareze veliko bolj vplivajo na porušni mehanizem krhkih materialov. Enaka ugotovitev velja tudi v primeru notranjih razpok in napak v kristalni zgradbi, ki so veliko bolj nevarne pri krhkih kot pri elastoplastičnih materialih. Mnoga gradiva so pod različnimi vplivi lahko v krhkem, plastičnem ali elastoplastičnem stanju. Najbolj pogost vpliv, ki pogojuje različna stanja gradiv, je temperatura. Tako so na pr. polimeri pri -20°C krhki, pri sobni temperaturi (+20°C) elastoplastični in pri +80°C plastični. Tlačna trdnost je pri mnogih krhkih gradivih bistveno večja od natezne trdnosti (betoni: tlačna trdnost od 20 do 60 MPa, natezna trdnost od 3 do 6 MPa). Ta pojav je tudi povezan z različnim vplivom notranjih razpok in napak pri tlačnem ter nateznem obremenjevanju.



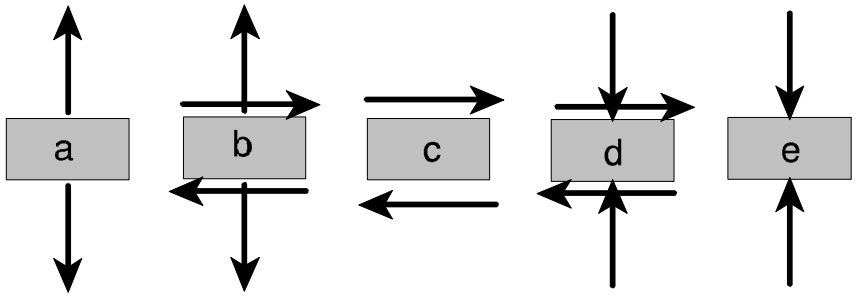
Slika 103: Razporeditev napetosti v prerezu materiala z napako pri natezni in pri tlačni obremenitvi

Mehanske lastnosti materialov se lahko obravnavajo kot strukturno občutljive in strukturno neobčutljive lastnosti. Porušni mehanizmi krhkih materialov so odvisni od vrste obremenitve (natezna, tlačna, upogibna, strižna).

Predpostavimo, da so v nekem materialu z notranjo napako (nepravilno poro), v elastičnem območju napetosti enako razporejene in nasprotnega predznaka. Razmere se spremenijo takrat, ko se na robu pore prekorači meja elastičnosti materiala (slika 103). Pri raztegovanju se na robu pore delci materiala ločujejo in s tem nastaja razpoka. Ta deluje kot zareza, zaradi katere se poveča koncentracija napetosti. Razpoka se širi do končne porušitve prereza. Ta proces

je pri krhkih materialih zelo hiter. Pri tlačnem obremenjevanju se material na robu pore po prekoračitvi tlačne trdnosti drobi. Pora se povečuje zaradi drobljenja materiala na njenem robu, vendar se pri tem koncentracija napetosti ne spremeni bistveno. Končna porušitev nastane po daljšem času kot pri natezni obremenitvi in to zaradi prečnih deformacij materiala.

Različne mehanske lastnosti se po kriteriju strukturne občutljivosti krhkih materialov lahko razporedijo po shematičnem prikazu na sliki 104.



Slika 104: Klasifikacija obremenitev glede na strukturno občutljivost materiala (a - strukturno najbolj občutljiva in e - strukturno najmanj občutljiva obremenitev)

PORUŠNE IN DELNO PORUŠNE PREISKAVE

Standardne preiskave gradiv so večinoma natezni, tlačni, strižni, upogibni in torzijski preskusi vzorcev (epruvet). Pri prvih treh preiskavah je preskušanec enakomerno obremenjen po celotni površini prečnega prereza. Pri tem struktura in homogenost materiala prideta do polnega izraza. Pri upogibnih in torzijskih preiskavah so obremenitve linearno razporejene po prerezu in samo v robnih vlaknih nastopijo ekstremne obremenitve. Kljub temu je za nekatera gradiva bolj enostavno izvesti upogibni preskus (malte, cementne prizme). Žilavost se enostavneje preskuša z udarcem kot z nateznim preskusom. Pri statičnih in dinamičnih preiskavah obravnavamo specifične deformacije (ε), napetosti (σ) in delo porušitve $R = \int_{\ell_0}^{\ell} F d\ell$ oz. specifično porušno delo $r = R/V_0$.

Porušno delo se uporablja kot merilo lastnosti materiala pri dinamičnih preskusih.

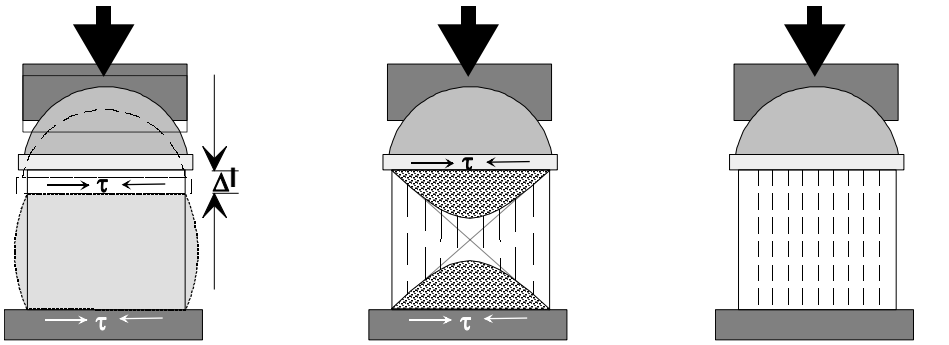
Statične preiskave

Najbolj pogoste statične preiskave so:

- tlačni preskus,
- natezni preskus,
- upogibni preskus,
- preskus žilavosti z upogibom,
- čisti strižni preskus in
- preskusi z dolgotrajnimi obremenitvami.

Tlačni preskus

Preizkušanci so oblikovani kot valji, prizme ali kocke različnih izmer. Izmere so odvisne od sestave in trdnosti gradiva. Kovine in nekatere keramike (kamenine) se preskušajo na kockah z robom 4 - 6 cm, beton na kockah z robom 10 - 20 oz. 30 cm ali na valjih. Razmerja premerov valjev proti njihovi višini znaša pri standardnih preskušancih za beton 1:2.



(a) plastični material (b) krhki material z delovanjem trenja (c) krhki material brez delovanja trenja

Slika 105: Tlačni preskus materiala v obliki kocke ali valja

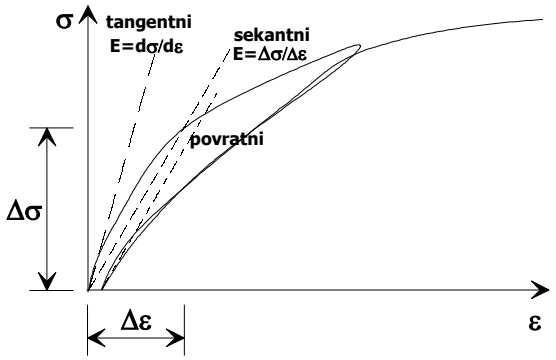
Pri običajnem tlačnem preskusu se napetosti ne porazdelijo enakomerno po dolžini in v prečni smeri preizkušanca, ker na stiku med njim in stiskalnico deluje trenje. To ovira bočno deformiranje vzorca, zato se vzorec iz plastičnega materiala deformira v obliki sodčka (slika 105(a)), vzorec iz krhkega materiala pa se poruši v obliki dveh stožcev oz. piramid (slika 105(b)).

Na mestih, kjer nastopa triosno napetostno stanje material ne razpade. Zato so rezultati preiskav odvisni tudi od oblike preskušanca. Večja kot so območja s triosnimi napetostnimi stanji, večja je odpornost preskušanca. Zato obstajajo razmerja med rezultati, ki so doseženi na različnih oblikah in izmerah preskušancev. Če se stične ploskve namažejo oz. izolirajo, trenja ni, zato so tako ugotovljene trdnosti nižje. Iz rezultatov tlačnega preskusa opravljenega na valjastemu preskušancu (f_V) se da izračunati trdnost (f_K), ki bi jo dosegel isti material, če bi preskušanec imel obliko kocke. $f_K = 1{,}25\ f_V$ (MB < 25), $f_K = 1{,}20\ f_V$ (MB > 25).

Koeficienti za preračunavanje so podani v standardih ali pravilnikih. Pri tlačnem preskusu morata biti obe ravnini vzporedni in obremenjeni navpično. Členek, ki je v glavi stiskalnice omogoča plošči stiskalnice, da se prilagodi manjšemu odstopanju od paralelnosti površin preskušancev. Pri neravninah večjih od 0,05 mm moramo ploskvi preskušanca izravnati z malto, ki je trša od preskušanega materiala. Vzorec moramo centrirati s toleranco pod 1 mm. Raztros rezultatov je odvisen tudi od načina preskušanja.

V diagramih napetost-specifična deformacija se pri mnogih gradivih ločijo mejne vrednosti, ki so analogne mejnim vrednostim pri nateznem preskusu. V primeru neizrazitih mej so predpisani postopki za njihovo določitev. Nekatere materiale se ne da zdrobiti v plastičnem območju. Zaradi večanja tlačnih obremenitev se večajo prečne deformacije, s tem se povečuje površina prečnega prereza in zato zmanjšuje tlačna napetost. Pri krhkih materialih so se običajno beležile le obremenitve in ne tudi deformacije, ki so izredno majhne.

Sodobnejša merilna oprema in stiskalnice s krmiljenimi pomiki omogočajo tudi registracijo majhnih deformacij in s tem boljše spoznavanje lastnosti materialov.



Slika 106: Značilni primeri določanja modula elastičnosti

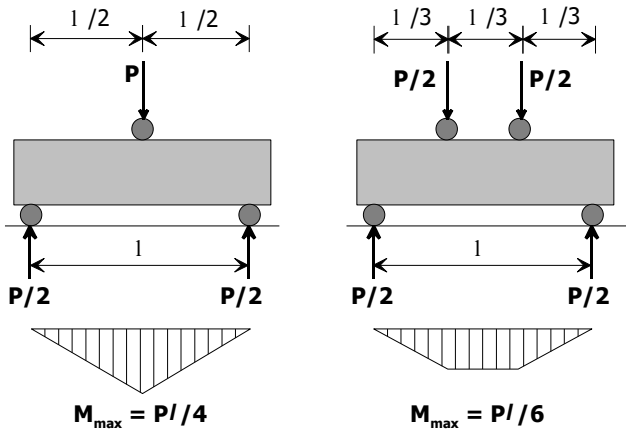
Deformacijski moduli (elastični modul E) se ponavadi določajo na prizmah z razmerjem dolžine proti širini 1:3 ali 1:4. S tako obliko se zagotovi približno enakomerna razporeditev napetosti in deformacij vzdolž preskušanca. Module lahko obravnavamo kot tangentne ($\delta\sigma/\delta\varepsilon$), kot sekantne ($\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$) ali kot povratne po razbremenitvah (slika 106). Pri nekaterih materialih je zaradi stabilizacije krivulje treba obremenjevanje večkrat ponoviti, ker se material šele po tem obnaša stabilno.

Natezni preskus

Uporablja se v glavnem za določanje mehanskih lastnosti kovinskih in vlaknastih materialov, ki v konstrukcijah prenašajo natezne obremenitve. Včasih se pri raziskavah opravljajo tudi natezni preskusi keramičnih materialov z namenom ugotavljanja razmerja med tlačno in natezno trdnostjo pri čistem nategu. Pomemben problem pri izvajanju nateznega preskusa je ustrezna pritrditev preskušancev v čeljusti trgalnega stroja. Čeljusti imajo bodisi navoj v katerega se privije preskušanec (epruveta) ali tako narejeno prijemališče, da se z višanjem natezne obremenitve povečuje sila vpetja preskušanca. Preskušanec se lahko pretrga tik ob čeljusti zaradi prečnih nateznih obremenitev. V izogib temu pojavu je treba preskušance ustrezno obdelati v območju prijemališč in s tem preprečiti koncentracijo napetosti na nepravem mestu. Preskušance lahko obdelamo bodisi z mehansko obdelavo (kovine) ali vlivanjem preskušancev v ustrezen kalup (nekovine). Večino kovinskih preskušancev lahko preskusimo brez predhodne obdelave (okrogli, večkotni, ploščati profili), kar poceni preiskave.

Upogibni preskus

Razmeroma enostaven postopek za preskušanje manjših in srednje velikih preskušancev s postavitvijo v stiskalnico. Obtežba se nanaša preko valjčkov, ki omogočajo natančno delovanje linijske obtežbe v izbranem prerezu. V izogib pretiranim lokalnim obremenitvam mora biti površina preskušanca pod valjčki ravna, pri mehkejših materialih pa uporabimo podložne ploščice. Obtežba lahko deluje na sredini razpetine (tritočkovni test) ali na tretjinah razpetine (štiritočkovni test). Slednja razporeditev povzroča enakomeren upogibni moment v srednji tretjini razpetine preskušanca (slika 107).

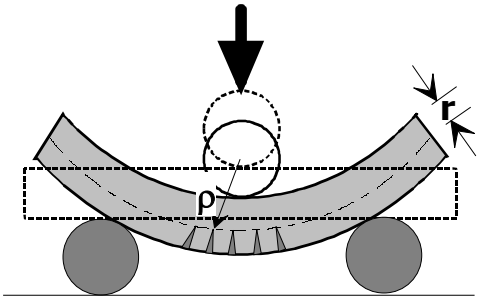


Slika 107: Tritočkovni (a) in štiritočkovni (b) upogibni preskus

Pri prostoležečem preskušancu na zgornjem robu prereza nastopajo maksimalne tlačne, na spodnjem pa maksimalne natezne napetosti. Ničelne napetosti nastopajo v sredinski ravnini nosilca (nevtralna os). Vendar pa v tej ravnini v vodoravni smeri nastopajo tudi strižne napetosti, torej če bi bil preskušanec prerezan v tej ravnini, bi to predstavljalo bistveno oslabitev in zmanjšanje njegove upogibne nosilnosti, četudi v tej ravnini ni ne nateznih ne tlačnih napetosti. Napetosti se običajno računajo s predpostavljeno veljavnostjo Bernoulijeve hipoteze. Ta pove, da so deformacije po višini prereza razporejene linearno. Vendar pa pri mnogih materialih ta teorija ne drži povsem in se zato na osnovi upogibnega preskusa določajo ekvivalentne napetosti, ki se več ali manj razlikujejo od dejanskih. Pri betonu se nevtralna os nekoliko dviguje med preiskavo in s tem se povečuje območje, v katerem delujejo natezne obremenitve (kjer tudi nastajajo razpoke). Zato se na osnovi rezultatov preiskav sklepa, da ima material večjo natezno trdnost od dejanske. Pri vlaknastih materialih je tlačeno območje bolj kritično, ker se vlakna lahko uklonijo. Pri teh materialih se obratno kot pri betonu nevtralna os pomika proti nategnjenem območju in se s tem povečuje tlačeno območje. Zaradi tega je potrebno pazljivo interpretirati rezultate upogibnih preiskav različnih vrst materialov.

Upogibna žilavost

Najbolj pogosto se uporablja kot mera žilavosti betonskega železa. Izvaja se kot tritočkovni upogibni preskus (slika 108) do ukrivljenosti preskušanca, pri kateri se pojavijo razpoke vzdolž natezno obremenjenega robu preskušanca. Pri zelo žilavih materialih se lahko doseže popolno zvijanje okoli trna, preko katerega se nanaša obtežba.



Slika 108: Preskus žilavosti z upogibom

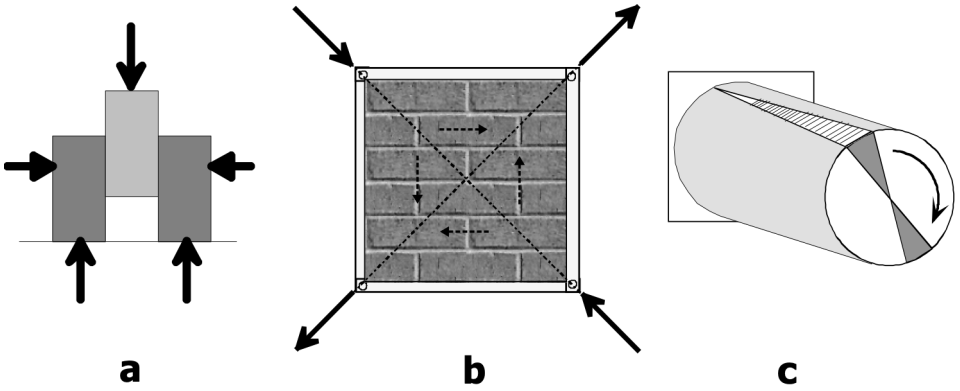
Upogibna žilavost (K) se izraža kot razmerje polmera (r) prečnega prereza palice in polmera (ρ) zakrivljenosti osi. Pri zelo žilavih materialih je ρ enak r in je žilavost 100%.

$$K = r / \rho * 100\ (\%) \qquad (14\text{-}4)$$

Čisti strig

Izvedba preskusa oz. interpretacija rezultatov je dokaj zahtevna. Preskus čistega striga-odreza (slika 109(a)) je preskus razmeroma enostavno izvedljiv, težko pa je izmeriti odvisnost strižne napetosti in strižne deformacije ($\tau - \gamma$ diagram) zaradi običajno hipne porušitve.

Strižne deformacije se da enostavneje meriti pri strižnem preskusu kvadratastega vzorca (slika 109(b)), ki ga vpnemo v togi okvir s tečaji. Preizkus je težko natančno izvesti, saj je izdelava naprave in vpenjanje vzorca izredno zahtevno. Z obteževanjem moramo doseči delovanje napetosti pod kotom 45° na glavno napetost. Iz meritev specifičnih deformacij v diagonalnih smereh lahko izračunamo spremembo kotov vogalov in od tod strižno deformacijo preskušanca v odvisnosti od obremenitve. Tako izmerjene vrednosti lahko prikažemo v diagramu $\tau - \gamma$, ki je analogen diagramu $\sigma - \varepsilon$ pri nateznem ali tlačnem preskusu. Iz $\tau - \gamma$ diagrama lahko določimo tangentni ali sekantni strižni modul G, ki je analogen modulu elastičnosti določenemu iz diagrama $\sigma - \varepsilon$.



Slika 109: Strižne preiskave materiala
(čisti strig (a), strig v napravi s tečaji (b) in strig pri torziji (c))

Tretja možnost za določanja strižne odpornosti materiala je posredni strižni preskus s torzijo. Na ta način preskušamo palice krožnega prereza in cevi (slika 109(c)). Pri polnih palicah se predpostavi linearna razporeditev napetosti od robu proti sredini krožnega prereza, pri ceveh pa enakomerna razporeditev napetosti po razmeroma tanki steni.

Dolgotrajne statične obremenitve

Z meritvijo delujočih obremenitev in deformacij tekom določenega časa preiskujemo reološke lastnosti materiala (spremembe lastnosti materiala tekom časa). Te so:

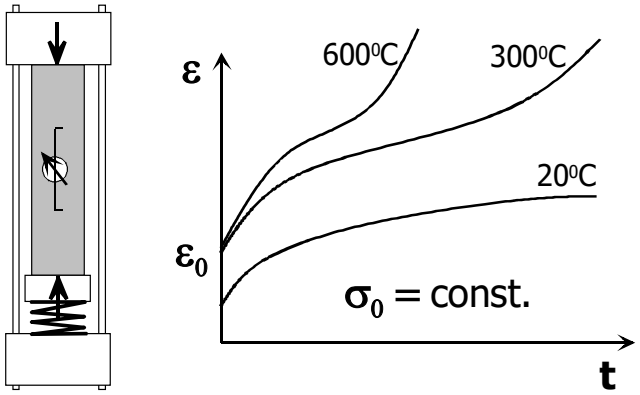
- tečenje,

- trajna trdnost in
- relaksacija,

Tečenje

Tečenje je pojav večanja deformacij s časom pri delovanju stalne obremenitve materiala (lezenje materiala). Pri nekaterih materialih se po določenem času deformacije stabilizirajo. Mnogi materiali se zaradi izpostavljenosti dolgotrajnemu delovanju obtežbe rušijo pri nižji obtežbi kot pri delovanju hipne obtežbe.

Tečenje betona preskušamo s pomočjo betonskih prizem, ki so vpete v jeklene jarme z zelo togimi vzmetmi (slika 110(a)). Na začetku preiskave so prizme obremenjene z določeno obtežbo, ki jo po namestitvi v jarem vzdržujejo toge vzmeti ob predpostavki delovanja stalne napetosti v prečnem prerezu prizme. Delujoča obtežba se ves čas meri z merilno dozo. S tem se kontrolira stalnost obremenitve. Deformacije se merijo bodisi elektronsko (merilni lističi) bodisi z mehanskimi inštrumenti (deformetri). V primerih, kjer se zahteva večja natančnost meritev, se načini merjenja kombinirajo. Iz časovnega razvoja deformacij pri stalni obremenitvi (slika 110(b)) lahko določimo velikost tečenja posameznega materiala. Na tečenje vplivajo tudi zunanji vplivi in dodatne obremenitve (temperatura, radiacija).

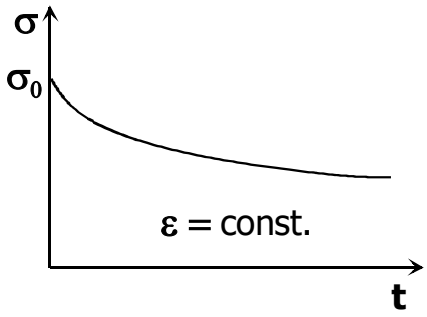


Slika 110: Shema preskusa tečenja betona in diagram časovnega razvoja skrčkov pri stalni obremenitvi in različnih temperaturah

Trajna trdnost

Definirana je kot mejna trdnost trajno obremenjenih materialov. Je manjša od trdnosti, ki se jo doseže pri trenutni statični obtežbi. Razmerje med trajno in trenutno trdnostjo je značilnost posameznega materiala.

Relaksacija



Slika 111: Upadanje obremenitve pri stalni deformaciji (relaksacija)

Relaksacija je pojav upadanja obremenitve s časom pri stalni deformaciji (obliki) materiala. Izvedba preizkusa je dokaj zahtevna, saj potrebujemo napravo, ki je absolutno toga zaradi vzdrževanja stalnosti oblike preizkušanca. Ker so take naprave praktično neizvedljive, se stalnost deformacij vzdržuje z napravami, ki imajo avtomatično regulacijo stalnosti oblike oz. dolžine preizkušanca. Kakovost naprave določa natančnost vzdrževanja stalnosti oblike preizkušanca.

Dinamične preiskave

Glede na delovanje obtežbe oz. njen vpliv na preskušanec ločimo preiskave z:

- enkratnim delovanjem obtežbe, kjer je merodajna energija udarca in
- večkratnim delovanjem obtežbe, kjer je merodajno utrujanje materiala.

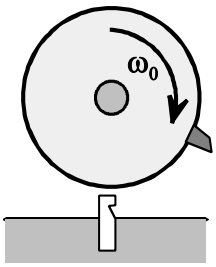
Udarna trdnost, žilavost materiala

Določamo jo z enkratno trenutno obremenitvijo, ki jo povzroča udarec. Postopki temeljijo na principu:

- meritve porušne energije povzročene z vztrajnikom ali z nihalom in
- meritve porušne energije pri udarcu s kladivom.

Preiskave z vztrajnikom in z nihalom

Preskus s pomočjo vztrajnika temelji na principu meritve kinetične energije. Vztrajnik se vrti z znano kotno hitrostjo ω_0. S tem je določena kinetična energija vztrajnika $E_K = D\ \omega_0$ (D je polarni vztrajnostni moment vztrajnika).



Ko se preskušanec poruši, se kotna hitrost zmanjša na vrednost ω_1. Zmanjšanje energije je praktično enako energiji rušenja preskušanca.

$$\Delta E_K = D\ (\ \omega_0^{\,2} - \omega_1^{\,2}) \qquad (14\text{-}5)$$

Slika 112: Preskus žilavosti z vztrajnikom

Preskusi, ki temeljijo na principu meritve kinetične energije, se izvajajo z napravami, ki imajo nihala. Podobni so preskusom z vztrajnikom. Najbolj znana

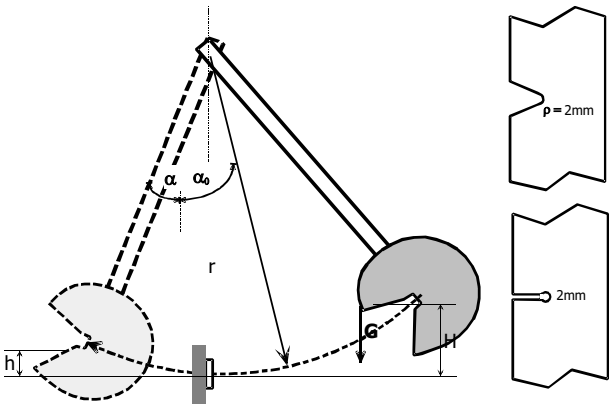
sta preskusa, ki se imenujeta po Charpy-ju in po Izod-u. Princip obeh preskusov je enak, razlikujeta se le po obliki nihal in preskušancev ter po načinu njihovega podpiranja.

Pri obeh postopkih se določata začetna (H) in končna (h) višina nihala. Razlika potencialne energije nihala teže G je praktično enaka porušni energiji. Ta se običajno izraža v odvisnosti od odklonskih kotov od vertikale, ki jih odčitamo na skali naprave in konstante nihala, ki jo predstavlja produkt teže nihala in dolžine njegove ročice.

$$\Delta E_P = G\,(H - h) = G\,r\,(\cos\alpha - \cos\alpha_0) \qquad (14\text{-}6)$$

Na osnovi energije porušitve običajno izračunamo tudi specifično energijo (a) kot razmerje porušne energije in površine prereza A_0 na mestu preloma:

$$a = \Delta E_P / A_0 \qquad (14\text{-}7)$$



Slika 113: Preskus žilavosti z nihalom po Charpy-ju

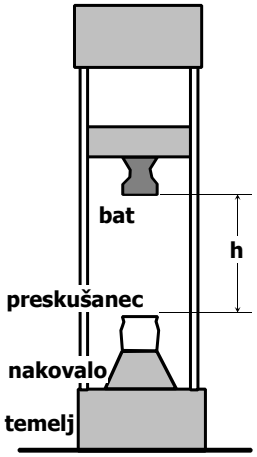
Pri hipnih obremenitvah se material obnaša drugače kot pri statičnih obremenitvah. Za porušitev je pogosto najbolj merodajna zarezna trdnost materiala. Vzorci so zato pripravljeni tako, da se z zarezo natančno določi mesto porušitve. Obstaja več vrst zarez, ki jih priznajo standardi. Charpy in Izod sta predlagala ostre zareze s polmerom zakrivljenosti 0,2 mm. Zaradi težavne izdelave takih vzorcev so v uporabi zareze, ki se izdelajo z vrtanjem luknjice in naknadnim zarezovanjem (slika 113).

Na robu zareze so napetosti močno koncentrirane. S tem postopkom se dejansko povečuje razlika med žilavostjo materiala v krhkem in elastoplastičnem stanju. Vpliv temperature je treba obravnavati kot poseben primer, saj vzorci segreti na različno visoke temperature različno prenesejo udarni preskus žilavosti.

Pri preiskavah z nihali morajo ta udariti v sredino vzorca. S tem se izognemo tresljajem in izgubi energije. Charpy-jevo nihalo je v tem pogledu bolj primerno in je zato standardizirano v večini dežel. Kapacitete nihal so različne od 1 do 1000 Nm, saj za prelom krhkih materialov potrebujemo bistveno manjšo energijo kot za prelom žilavih materialov.

Preiskave s kladivom

Pri preiskavah z udarcem se kritična kinetična energija, ki je potrebna za porušitev materiala določa na večjem številu preskušancev iz heterogenega materiala, da bi lahko bolj zanesljivo določili njegovo žilavost. Najbolj znano je Föpplovo kladivo. To prosto pada znotraj vodil in udari v vzorec, ki je postavljen na jekleno nakovalo. Če se vzorec poruši z enim udarcem to pomeni, da je kladivo padlo s "kritične višine". Zasnova preiskave vpliva na razmeroma velik raztros rezultatov. Del energije kladiva se namreč izgubi zaradi nihanj nakovala, temeljev in kladiva. V praksi se zato uporablja modificirana metoda, kjer se udarci stopnjujejo (večanje višine) do porušitve preskušanca.



Skupna porušna energija znaša:

$$\Sigma E = G\ \Delta h\ n\ (n+1)\ /\ 2 \qquad (14\text{-}8)$$

Δh je prirastek višine, s katere spuščamo kladivo, n pa je število udarcev do porušitve preskušanca.

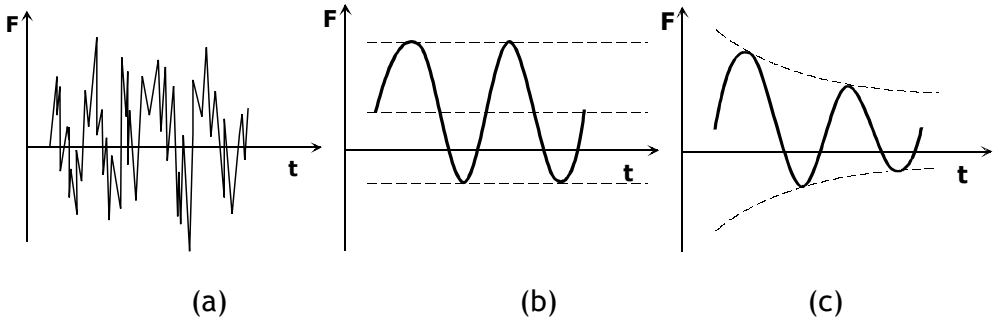
Mehanske lastnosti preskušanca se med preiskavo spreminjajo. Celotna izmerjena energija lahko služi le kot približno merilo žilavosti materiala. Pri tej preiskavi so razmere podobne razmeram v naravi, kjer je material izpostavljen udarni obremenitvi.

Slika 114: Preskus s Föpplovim kladivom

Opisane preiskave bolj sodijo med tehnološke kot med dinamične preiskave mehanskih lastnosti materiala. Porušna energija se izraža na enoto prostornine kot "specifično delo" (Nm/m^3), kar je dimenzijsko ekvivalentno napetosti (N/m^2).

Preiskave z dinamično obtežbo

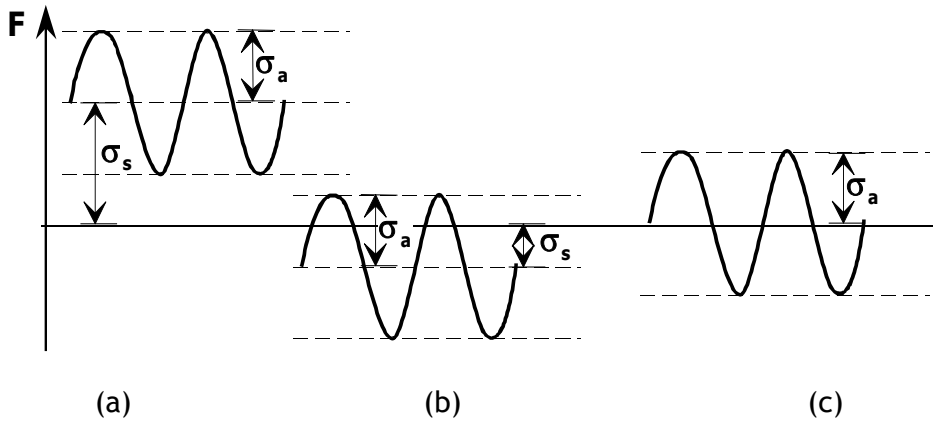
Preiskave odpornosti materiala na harmonične dinamične obremenitve so manj zahtevne kot preiskave, pri katerih se obtežba naključno spreminja. Naprave, s katerimi se povzročajo harmonične (enolično spremenljive) obremenitve materiala, delujejo običajno z električnim pogonom in regulacijo.



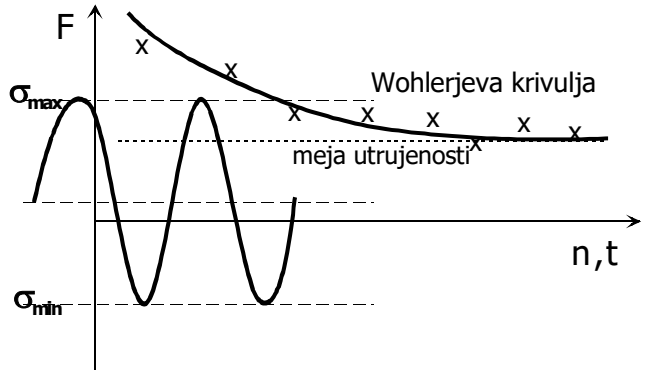
Slika 115: Naključno spreminjajoča se obtežba (stohastična) (a), harmonična nedušena (b) in harmonična dušena obtežba (c)

Obtežbe so lahko enoosne, večosne in upogibne. Pritrdila vzorcev (čeljusti, podpore) morajo biti prilagojene pogojem spreminjajoče se smeri in moči obremenjevanja preskušancev. Pri hidravličnih napravah so frekvence vzbujanja manjše (okoli 5 Hz) kot pri električnih (od 100 do 200 Hz). Med naprave posebne vrste sodijo visokofrekvenčni pulzatorji. Stroji so zelo togi, ker njihova lastna frekvenca mora biti veliko višja od frekvence vzbujanja preskušanca. Pri upogibnih preiskavah so frekvence nižje (okoli 1 Hz) obtežbe pa višje (do 1 MN) kot pri osnih preiskavah.

Obremenitev običajno opisujemo z napetostmi, ki jih imenujemo povprečna obremenitev σ_s, amplituda obremenitve σ_a in ekstremna obremenitev σ_{min} ter σ_{max}. Ločimo simetrične ($\sigma_s = 0$, $\sigma_a \neq 0$) in nesimetrične ($\sigma_s \neq 0$, $\sigma_a \neq 0$) obremenitve. Nesimetrične obremenitve so lahko enoznačne ($|\sigma_a| < |\sigma_s|$) ali izmenične ($|\sigma_a| \geq |\sigma_s|$).



Slika 116: Enoznačne nesimetrične obremenitve (a), izmenične nesimetrične obremenitve (b) in simetrične dinamične obremenitve (c)



Slika 117: Določanje meje utrujanja materiala

Pri seriji preskusov ugotovimo števila ciklov obremenitev, pri katerih so nastopile porušitve zaradi utrujenosti materiala pri različnih ekstremnih obremenitvah σ_{min} in σ_{max}. Pri stalni vrednosti σ_{min} večamo vrednost σ_{max}. Na absciso nanašamo število ciklov, pri katerem je prišlo do porušitve, na ordinato pa velikost napetosti σ_{max}. Krivulja, ki se imenuje Wöhlerjeva krivulja, ima hiperbolično obliko in se asimptotično približuje **meji utrujanja** preskušanega materiala. Če se material dinamično obremenjuje tako, da maksimalna obremenitev ne presega meje utrujanja, ni nevarnosti za njegovo porušitev zaradi utrujanja. Iz krivulje lahko odčitamo, koliko ciklov lahko zdrži nek

material, če poznamo velikost maksimalnih obremenitev pri neki dinamični obtežbi. Meja utrujanja je lastnost določenega materiala. Njena velikost znaša od 60% do 90% trdnosti določene s statično obtežbo.

Na opisan način najpogosteje preskušamo kovine in polimere, ki se uporabljajo za dinamično obremenjene dele konstrukcijskih sklopov. V zadnjem času se na utrujanje preskušajo tudi betoni in ostala keramična gradiva. Preiskave so praviloma dolgotrajne in drage. Sodobne naprave omogočajo spreminjanje amplitud obremenitev v istem ciklu preiskav, kar zmanjšuje število potrebnih preskušancev približno na polovico. Pri nekaterih materialih moramo zaradi tega vnaprej poznati povezavo med režimom spreminjanja obremenitev in režimom obremenjevanja s stalnimi maksimalnimi in minimalnimi obtežbami.

Trdota materiala

Trdota je odpornost materiala na prodor v njegovo sredino. Obstajajo različne metode, s katerimi se preskuša ta lastnost. Ene temeljijo na uporabi statične, druge pa na uporabi dinamične obtežbe. Značilnost vseh teh metod je, da so neporušne. Poškodbe materiala so omejene in zanemarljive, mehanske lastnosti preskušanca pa se ne spremenijo zaradi preskusa njegove trdote. Različnost metod je pogojena tudi z različnostjo materialov.

Statične preiskave trdote

Postopke za preskus trdote s statično obtežbo lahko razvrstimo v tri skupine:

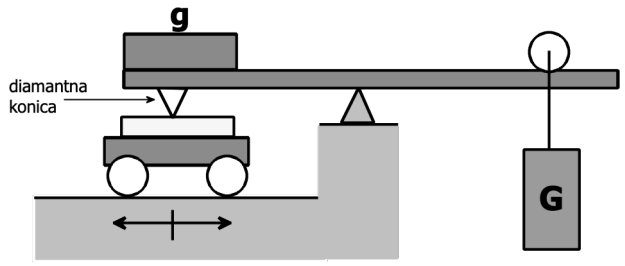
- preskusi z razenjem,
- preskusi z vtiskanjem in
- preskusi z odbojem.

Preskusi z razenjem

Mohsov postopek

Postopek so razvili v mineralogiji. Temelji na Mohsovi lestvici trdote, ki ima 10 stopenj: lojevec (1), kamena sol (2), kalcit (3), fluorit (4), apatit (5), ortoklaz (6), kremen (7), topaz (8), korund (9) in diamant (10). Trdoto neznanega materiala določimo tako, da njegovo zglajeno površino zaporedoma razimo z minerali znane trdote po Mohsovi lestvici navzgor. Kot približna ocena lahko služi podatek, da materiale trdote 1 in 2 lahko razimo z nohtom, materiale trdote 3 do 5 lahko razimo z nožem, z materiali trdote od 6 do 10 lahko razimo steklo. Obstaja tudi modificirana Mohsova lestvica, ki uporablja trdote 15-ih mineralov in je zato bolj natančna.

Martensov postopek



Slika 118: Martensov postopek meritve trdote krhkih materialov

Martensov postopek je sodoben postopek na osnovi razenja, ki omogoča tudi kvantitativno določanje trdote. Uporablja se za zelo krhke materiale. Zglajena površina materiala se razi z diamantnim stožcem, ki ima vršni kot enak 90°. Med preiskavo se preskušanec premika za nekaj milimetrov. S spreminjanjem lege uteži G se spreminja tudi pritisk na material. Trdota po Martensu je definirana kot sila, pri kateri nastane raza širine 10 μm (0,01 mm). Širina raze se ugotavlja z mikroskopom. Pri krušljivih materialih so robovi raze težko ločljivi, kar omejuje natančnost metode.

Preskusi z vtiskanjem

Vsi postopki z vtiskanjem izhajajo iz Hertzove definicije kontaktnih napetosti, ki nastanejo na stiku dveh teles različnih oblik. S postopkom po Hertzu se določa začetek trajnih deformacij na preskušancu. Preskušanec se tlačno obremeni s trnom, ki se deformira samo elastično. Kontaktne napetosti so zelo velike. Teoretično se da ugotoviti, pri kateri napetosti se v preskušanem materialu pojavijo trajne deformacije. Težave nastanejo pri definiciji trajne deformacije, saj so stične ploskve majhne, trajne deformacije pa težko merljive. Načeloma je ta postopek uporaben za elastoplastične materiale z izrazito mejo tečenja. Ta osnovni postopek je opuščen, vendar predstavlja osnovo za razvoj praktičnih postopkov, ki so v rabi. Pri vseh teh postopkih je velikost pritiska na preskušanec predpisana. Trdota materiala se izraža v merljivi površini odtisa, ki je nastal zaradi trajne deformacije, ki jo povzroči trn.

Brinellov postopek

Pri Brinellovem postopku ima trn obliko kroglice. Njen premer je odvisen od debeline preskušanca (preglednica 39).

Preglednica 39: Premer kroglice za preskus trdote po Brinellu

Premer kroglice D (mm)	Debelina preskušanca t (mm)
2,5	< 3
5	3 do 6
10	> 6

Sila, s katero pritiskamo kroglico (v Newtonih), se določi glede na predvideno trdoto preskušanega materiala. Za trde materiale se izračuna iz izraza $F=300D^2$, za srednje trde iz izraza $F=100D^2$ in za mehke iz izraza $F=50D^2$. Med preiskavo sila enakomerno naraste v času 15 sekund do zahtevane velikosti in nato deluje še 30 sekund zaradi vzpostavitve ravnovesja med trnom in vzorcem. Poleg predpisanega premera kroglice se lahko predpiše tudi globina vtisa (h), ki ne sme presegati 1/8 debeline preskušanca. V primerih, ko je pri Brinellovem preskusu odtis kroglice komaj viden ali je kroglica prodrla pregloboko v material, gre za neuspel preskus.

Trdota po Brinellu se izraža kot napetost na površini vtisa:

$$HB = F / A = F / (\pi D h) \qquad (14\text{-}9)$$

Globino vtisa (h) se običajno težko izmeri. Zato se pogosteje uporablja izraz (slika 119(a)), ki izhaja iz meritve premera (d) odtisnjene površine:

$$HB = 2 F / (\pi D (D - \sqrt{(D^2 - d^2)})) \qquad (14\text{-}10)$$

Metoda je uporabna za elastoplastične materiale trdote do 4500 MPa (trdota kroglic je od 6500 do 7000 MPa). Pri jeklih se na osnovi trdote po Brinellu lahko oceni tudi njihova natezna trdnost. Razmerje med natezno trdnostjo in trdoto jekla je razmeroma stalno in se ga da izraziti z razmerjem:

$$f_u \,/\, HB = 0{,}34 \text{ do } 0{,}36 \qquad (14\text{-}11)$$

Podobna razmerja so znana tudi pri drugih kovinah.

Vickersov postopek

Pri Vickersovem postopku je trn izdelan v obliki štirirobne diamantne piramide s vršnim kotom 136°. Kot je določen tako, da je odtis piramide analogen odtisu z Brinellovo kroglico, ki ima premer d=0,375D, kar je v sredini območja uporabnosti Brinellovega postopka. Piramida odtisne kvadratasto površino (slika 119(b)). Zaradi večje zanesljivosti rezultatov se merita diagonali odtisa d_1 in d_2. Trdota se določi z izrazom:

$$HV = 1{,}854 \;\; F \,/\, (d_1 \, d_2) \qquad (14\text{-}12)$$

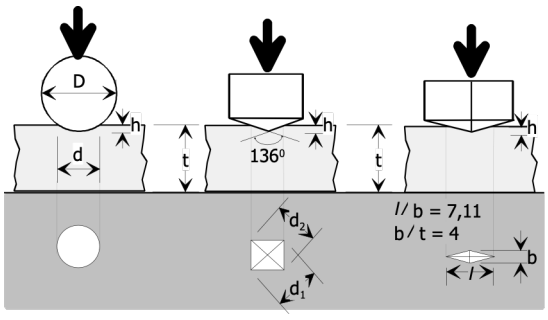
Rezultati, ki so dobljeni z Brinellovo in Vickersovo metodo, se dobro ujemajo do trdote 4500 MPa. Globina odtisa pri preskusu po Vickersu mora biti v enakih mejah kot pri postopku po Brinellu, enak pa je tudi čas obremenjevanja. Sila ni omejena, a je običajno v območju do 1kN. Pri preiskavi mehkejših materialov je lahko zelo majhna (do nekaj deset mN).

Knoopov postopek

Postopek je razvit iz Vickersovega postopka. Diamantni trn ima obliko piramide z bazo v obliki deltoida z razmerjem diagonal 7,11. Manjša diagonala konice je enaka 4-kratni debelini preskušanca (slika 119(c)). Sile s katerimi se vtiskuje trn so zelo majhne. S to metodo se preskušajo mikroskopsko majhni vzorci. Merijo se "mikro trdote" posameznih faz materialov sestavljenih struktur (polikristalični materiali - kovine, klinkeri v gradbeni industriji). Površine preskušancev morajo biti natančno zglajene. Trdota se izračuna iz izraza:

$$HK = 12{,}69 \; F \,/\, l^{\,2} \qquad (14\text{-}13)$$

kjer je l daljša diagonala odtisnjenega deltoida.



(a) (b) (c)

Slika 119: Postopki za določanje trdote z vtiskanjem: Brinellov (a), Vickersov (b) in Knoopov (c)

Rockwellov postopek

Postopek je zelo praktičen in poteka v treh fazah. S posebno napravo se spremljajo pomiki trna, ki prodira v material. Pomiki se merijo z merilno urico, ki ima razdelke po 2 μm. Pri začetni obremenitvi (100 N) se kazalec urice postavi v ničelno lego. Nato se obremenitev poveča na polno obtežbo enako G + 100 N in počaka, da se urica umiri. Nato se trn razbremeni na začetno obtežbo 100 N, pri kateri se odčita pomik trna. Trdota po Rockwellu se določa na osnovi razlike globine odtisa pri razbremenitvi in začetku preiskave (razlika med 3. in 1. fazo). Trdota po Rocwellu se izraža z:

$$HR = K - n \qquad (14\text{-}14)$$

kjer je K konstanta odvisna od oblike in vrste trna, n pa je odčitek na urici izražen kot število razdelb po 2 μm. Trn se obremenjuje z utežmi preko vzvodov. Hitrost obremenjevanja se uravnava s hidravlično zavoro. Naprave so lahko tudi prenosne tako, da se jih lahko uporablja na gradbiščih. V preglednici 40 so prikazane stopnje trdote po Rockwellu:

Preglednica 40: Določanje trdote po Rockwellu (t je globina odtisa)

Označba po Rockwellu	**Vtisni trn**	**Obremenitev G (N)**	**Trdota t (mm)**
A C D	diamantni stožec	500 1400 900	100 - 150
B F G	jeklena kroglica	900 500 1400	130 - 500
E	jeklena kroglica	900	130 - 500

Dinamične preiskave trdote

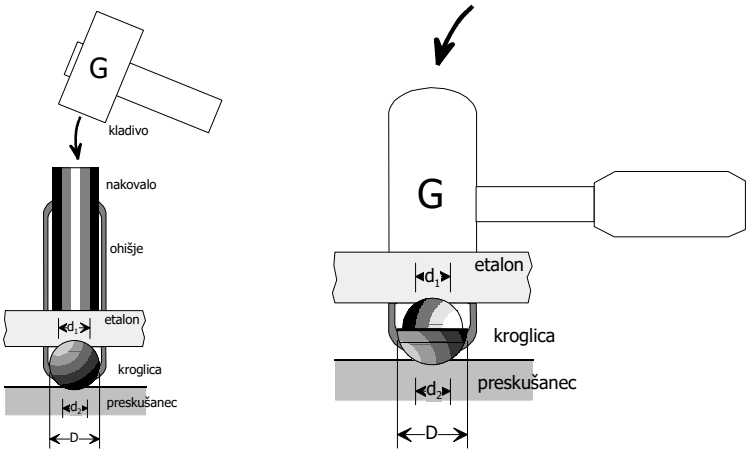
Postopki za določanje trdote materiala z dinamično obtežbo temeljijo na enem izmed sledečih principov:

- merjenju globine odtisa in
- merjenju višine odboja znane mase, ki pade na preskušanec.

Postopek z meritvijo odtisa

Postopek "Poldi"

Postopek, ki je zelo primeren za terenske preiskave, se imenuje po nemški železarni Poldi-Hütte. Naprava za preskušanje je sestavljena iz ohišja, etalonske ploščice, Brinellove kroglice premera 10 mm in nakovala (slika 120(a)). Obtežba se pri preskušanju povzroča z udarcem kladiva, ki ima maso 2 kg.



Slika 120: Poldi preskuševalec (a) in kladivo z dvema polkroglama (b)

Ko se s kladivom udari po nakovalu, kroglica pusti odtis na etalonski ploščici in na preskušanem materialu. Iz znane trdote etalonskega materiala se lahko določi trdoto neznanega materiala po izrazu, ki se uporablja pri določanju trdote po Brinellu:

$$\frac{HB_1}{HB_2} = \frac{1-\sqrt{1-(\frac{d_2}{D})^2}}{1-\sqrt{1-(\frac{d_1}{D})^2}} \qquad (14\text{-}15)$$

d_1 je odtis kroglice na etalonu, d_2 je odtis na neznanem materialu, HB_1 je znana trdota etalonskega materiala in HB_2 iskana trdota neznanega materiala. Zgornji izraz povsem velja za počasne obremenitve. Ker s Poldijem povzročamo dinamične obremenitve, je pri vrednotenju rezultatov preskusa potrebno upoštevati empirično določene korekcijske količnike, ki so podani v posebnih preglednicah. Posebno praktična je izvedba Poldija v obliki kladiva (slika 120(b)), ki ima dve polkrogli namesto Brinellove kroglice. Polkrogli se uporabljata tudi v osnovni napravi Poldi, ko se preiskuje trdota materiala, ki je bistveno različna od trdote etalonskega materiala. V takih primerih se trdota neznanega materiala določi z izrazom:

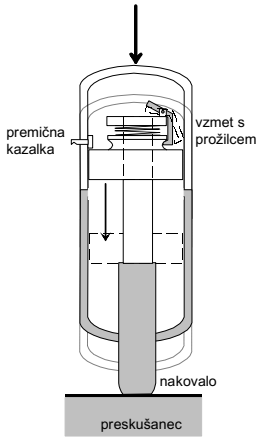
$$\frac{HB_1}{HB_2} = \frac{D_2-\sqrt{D_2^2-d_2^2}}{D_1-\sqrt{D_1^2-d_1^2}} \qquad (14\text{-}16)$$

NEPORUŠNE PREISKAVE

Z neporušnimi preiskavami se določajo fizikalne lastnosti materiala brez porušitve ali drugih sprememb njegove strukture. Mehanske lastnosti se ocenjujejo na osnovi kalibracije z rezultati porušnih preiskav. Preiskave z neporušnimi metodami so hitre in poceni. Z njimi lahko dobimo veliko podatkov za statistično vrednotenje določene lastnosti. S tem se v določeni meri lahko kompenzira manjša natančnost metod.

Postopki z meritvijo odboja znane mase

Postopki izhajajo iz Shore-ovega postopka, pri katerem je vzpostavljena povezava med višino odboja kroglice in trdoto materiala. V gradbeništvu se uporablja praktična naprava za preskušanje trdote materiala, ki se imenuje **sklerometer** (slika 121). Ko se sklerometer sproži, vzmet potisne maso, ki udari na palico prislonjeno na preskušanec. Na skali sklerometra se zabeleži višina odskoka potisnjene mase po trku palice in preskušanega materiala. Sklerometer se lahko postavi v različne položaje. Obstajajo različni tipi sklerometra, ki so prilagojeni vrstam preskušanega materiala. Sklerometer za preskušanje betona se kalibrira na osnovi znanega razmerja med trdnostjo in trdoto betona. Na osnovi tega odnosa so sestavljene tudi tabele za oceno trdnosti betona. Običajno se na izravnani površini betona (30-50 cm^2) s sklerometrom devetkrat meri trdota.



Običajno je raztros rezultatov zelo velik (±30%), zato se s tem postopkom dobi le približna ocena trdnosti betona. Sklerometriranje se uporablja v kombinaciji z odvzemom vzorcev (vrtanje valjev) za destruktivno določanje trdnosti betona. Beton se lahko preskuša tudi z metodo kroglice z etalonom, kot je opisano v predhodnem poglavju.

Slika 121: Shema sklerometra

Obstajajo tudi metode, pri katerih se o kakovosti betona sklepa na osnovi velikosti kraterja, ki ga naredi krogla izstreljena iz posebne pištole.

Postopek Ericksen temelji na ugotavljanju sile trganja betona iz njegove površine. Na betonsko ploskev se z ustreznim lepilom (epoksi) prilepi ploščica, ki se po strditvi lepila potegne, pri tem pa se meri sila površinske porušitve betona pod ploščico. Ta sila se lahko s postopkom kalibracije poveže s tlačno trdnostjo betona.

Akustične metode

Zvok se v zraku širi s hitrostjo 330 m/s (0,33 km/s) v elastičnem trdem telesu pa veliko hitreje (od 1,5 do 5 km/s). Teoretična hitrost zvoka, ki se širi vzdolž palice iz materiala z modulom elastičnosti E in gostoto ρ, se da izračunati z izrazom (14-17). Hitrost zvoka v neomejenem elastičnem prostoru se da izračunati z izrazom (14-18), kjer je ν Poissonovo število.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{14-17}$$

$$v = \sqrt{\frac{E\cdot(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \tag{14-18}$$

Pri nekaterih materialih so znana razmerja med modulom elastičnosti in tlačno trdnostjo materiala. Pri znani hitrosti širjenja zvoka in vrednostjo Poissonovega količnika se lahko izračuna modul elastičnosti in od tod tudi tlačna trdnost materiala. Preizkuševalne naprave so sestavljene iz dveh sond (oddajnik in sprejemnik oscilacij), merilnika časa in osciloskopa ali digitalnega prikazovalnika zvočnega valovanja. Na znani razdalji med sondami merimo hitrost prehoda ultrazvočnih oscilacij. Njihova frekvenca znaša od 50 do 120 kHz. Frekvenca vzbujanja se izbere tako, da je izguba energije čim manjša, njena disipacija zaradi heterogenosti betona v sprejemljivih mejah, natančnost meritve časa (v μs) pa čim večja.

Ultrazvok se širi v ozkem snopu, ki je ožji pri višjih frekvencah. Običajne naprave merijo čase okoli 0.2 μs z maksimalno oddaljenostjo sond do 8 m. Dolžina vala je 3 - 6 cm. Pri meritvah lastnosti betona mora dolžina vala presegati premer maksimalnega zrna agregata.

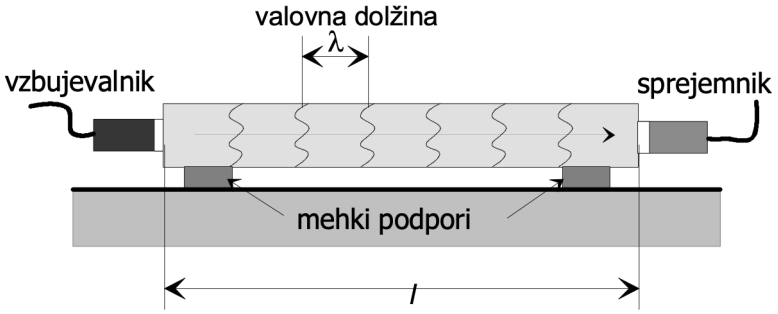
V praksi se uporabljata dve vrsti naprav: naprave s stalnim vzbujanjem in naprave z impulznim vzbujanjem oscilacij. Kratki impulzi trajajo od 1/20 do 1/15 s. Na osciloskopu se vidi tudi dušenje valovanja. Obstajajo tudi postopki, s katerimi se lahko ugotovijo nepravilnosti v betonu (razpoke, gnezda itd.)

Metode na osnovi resonance

Modul elastičnosti materiala se lahko določi s pomočjo resonančnega pojava na preskušancih pravilne prizmatične oblike. Resonančno nihanje prizme nastane, ko je čas med impulzi vzbujanja enak času prehoda in vračanja vala v prizmi.

$$T = \frac{2\cdot\ell}{v} = 2\cdot\ell\cdot\sqrt{\frac{\rho}{E}} \qquad f = \frac{1}{T} \qquad E = 4\ell^2 f^2 \rho \tag{14-19}$$

Resonančna frekvenca f je določena z največjo amplitudo vala, ki je sprejet na drugem koncu prizme (stojni val). Na podoben način se lahko spravi v resonanco vsak elastični sistem, zato je ta metoda zelo razširjena. Pri oscilacijskih sprejemnikih ni potrebna velika vzbujevalna energija.



Slika 122: Določanje modula elastičnosti z resonanco

Metode z uporabo sevanja

Homogenost in gostota materiala se lahko določata z röntgenskim in γ-žarčenjem. Homogenost, prisotnost tujkov, vključkov in votlin so vidni na filmu, ki se postavi na drugo stran prezračenega vzorca. Debeline materiala, ki se lahko prezračijo so odvisne od njihove sestave. Jeklo se lahko preiskuje do debeline 150 mm, beton pa do debeline 400 mm. Preiskave se izvajajo z močnimi röntgenskimi napravami (do 150 kV) ali močnimi viri γ-žarčenja ($^{60}C_o$, $^{137}C_s$). Gostoto prezračenega materiala se da ugotoviti tudi z meritvijo radiacije na dveh straneh vzorca oz. konstrukcijskega elementa.

TEHNOLOŠKE PREISKAVE

Najbolj pogoste tehnološke preiskave gradiv so preiskave:

- odpornosti proti obrabi,
- odpornosti robov,
- erozije materiala,
- delovanja kavitacije,
- zmrzlinske odpornosti,
- vodonepropustnosti,
- konsistence,
- hitrosti vezanja (cement in ostala veziva),
- stabilnosti prostornine (cement in ostala veziva),
- izločanje apna in soli ter
- geometrijskih lastnosti (izkrivljenost, izgled površine).

Odpornost proti obrabi

Odpornost gradiva proti obrabi se preskuša na rotirajoči jekleni plošči. Preskušanec v obliki kocke se obremeni s silo 300 N. Na ploščo se posipa 20 g korundnega prahu določene granulacije. Po 22 obratih se korundni prah zamenja. Postopek se ponavlja 20 krat, tako da preiskava ene ploskve preskušanca traja 440 obratov. Brusijo se 3 ploskve kocke ali pa samo ploskev, ki je pri uporabi preskušanega vzorca izpostavljena obrabi. Obraba se ugotavlja s tehtanjem vzorca pred in po preiskavi. Rob kocke običajno meri 7,07 cm, tako da površina obrabne ploskve znaša 50 cm^2.

Odpornost robov

Odpornost robov se ugotavlja na suhih preskušancih izdelanih v obliki kock s stranico 5 cm. Preskus poteka v valovitem jeklenem bobnu (5 valov v radialni smeri) ali v Duvalovem bobnu s poševno osjo. Pet kock se običajno vrti eno uro z določenim številom obratov. Rezultat preiskave se izraža kot odstotek izgube teže preskušancev.

Erozija materiala

Odpornost gradiva na erozijo se preskuša z vodnim ali zračnim curkom z dodajanjem ostrega peska. Curek deluje pravokotno na ploskev v določenem času. Meri se globina odstranjene plasti ali izguba teže in premer erodirane ploskve. Ob znani gostoti materiala se izračuna debelina erodirane plasti.

Delovanje kavitacije

Delovanje kavitacije se preskuša podobno kot delovanje erozije. V posebnih kanalih se pri določeni hitrosti vode dosega pulziranje vode. Pri tem se plast vode odlepi od površine preizkušanca in povzroči podtlak. Zaradi podtlaka nastane kavitacija, ki odleplja material.

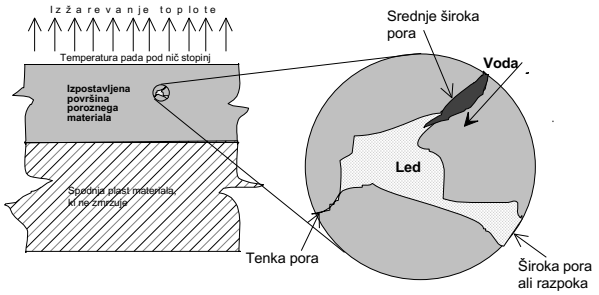
Zmrzlinska odpornost

Do pojava zmrzovanja materiala pride le ob prisotnosti vode pri temperaturah pod 0°C in to samo pri poroznih in vodopropustnih materialih. Porozni materiali se različno odzivajo na zmrzovanje. Površinske sile preprečujejo kristalizacijo vode (nastajanje ledu). Zaradi tega v drobnih porah, kjer so te sile močnejše, voda zmrzuje kasneje kot v večjih. Z nižanjem temperature voda postaja nestabilna tudi v drobnejših porah in proces zmrzovanja napreduje po materialu. Led, ki nastaja v večjih porah srka vodo iz drobnih por. V zelo tankih porah (pod 5 μm) je voda tako tesno vezana, da niti ne zmrzuje niti se ne odvaja proti večjim poram kljub zelo nizkim temperaturam. Nastajanje ledu povzroča dodatne notranje napetosti v okolici notranjih razpok in por.

Zmrzlinsko odpornost gradiv preskušamo na različnih vzorcih (kocke s stranico 15 - 20 cm, kamnite kocke 4 - 6 cm, prizme, valji). Pred preskusom se vzorci nasitijo z vodo do stalne teže. Ohladijo se na -15 do -30°C (ponavadi na -20°C) in držijo 4 ure v komorah. Nato se odtajajo v vodi na sobni temperaturi. Postopek se ponavlja večkrat, odvisno od klimatskih pogojev. Pri nas se običajno opravlja 20 ciklov, v Rusiji 100 ciklov. Vpliv zmrzovanja se ocenjuje bodisi vizualno (spremembe vzorca) bodisi kot sprememba teže vzorca. Najboljša je primerjava trdnosti pred in po zmrzovanju. Odporni materiali ne zgubijo več kot 20% trdnosti. Sodobnejše metode temeljijo na meritvah sprememb modula elastičnosti E. Zmrzovanje je površinski proces. Na površini se ustvari ledeni ovoj, voda pa je zaprta v porah v notranjosti telesa. Če je prostornina por vsaj za 9% večja od prostornine vode, ki jo je telo vpilo, ne bo prišlo do povečanja notranjih obremenitev pri zmrzovanju (prostornina ledu je za 9% večja od prostornine vode).

Zaprta poroznost je neobčutljiva na zmrzovanje (ni vode - ni ledu). Na tem principu se zmrzlinska odpornost lahko oceni z Hirschwaldovim koeficientom, ki je razmerje med navidezno in absolutno poroznostjo. Material je zmrzlinsko odporen, če je to razmerje manjše od 0.85, torej je v telesu 15% votlin, ki niso

napolnjene z vodo. Merjene vrednosti so različne za različne materiale (od 0.75 do 0.85), zato jih je s popolnim zmrzovanjem potrebno določiti za vsak material. Razlike nastanejo zaradi različnega določanja navidezne poroznosti pri atmosferskem tlaku in absolutne poroznosti pri kuhanju v vodi, v vakuumu eksikatorja, pod tlakom v avtoklavu. V praksi se je izkazalo, da so na zmrzovanje odporni materiali, ki vpijajo manj kot 0,5% vode (glede na maso). Trdnost materiala praktično ne vpliva na njegovo zmrzlinsko odpornost.



Slika 123: Ponazoritev por in razpok v poroznem materialu med zmrzovanjem

Z Brardovim postopkom se posredno preskuša vpliv zmrzovanja. V zasičeni vodni raztopini natrij-sulfata $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ se preskušanec kuha 30 min. Vzorec se v zasičeni raztopini ohladi na sobno temperaturo in nato pusti nekaj časa na zraku. Potem se ponovno položi v raztopino. V porah in okolici preskušanca se tvorijo kristali. S povečanjem prostornine kristalov se veča tudi pritisk v porah preskušanca, kjer nastanejo podobne razmere kot pri zmrzovanju. Z drugimi vrstami raztopin se dosegajo podobni učinki, ki so celo bolj neugodni kot učinki zmrzovanja vode.

Prepustnost vode in zraka

Metode z višanjem tlaka vode

Na izravnano površino vzorca deluje voda pod pritiskom. Po določenem času, se na prelomljenem (ali prerezanem) vzorcu meri globina prodora vode. Pri nekaterih postopkih se tlak postopoma povečuje, meri pa se količina vode, ki se precedi skozi vzorec. Po Grafovem postopku se tlak vode stopnjuje 72 ur v treh stopnjah. V prvih 24 urah znaša tlak 1 bar, v naslednjih 24 urah 3 bare, v zadnjih 24 urah pa 7 barov. Postopek je nekoliko modificiran za preverjanje lastnosti materialov v ekstremnih klimatskih pogojih kot obstajajo na pr. v Rusiji. Pri modificiranem postopku se tlak vsakih 8 ur dvigne za 1 bar, dokler voda ne premoči valjasti vzorec premera in višine 150 mm. Za mero propustnosti se upošteva zadnji tlak, pri katerem se voda še ni popolnoma precedila skozi vzorec. Na ta način se preskušajo konstrukcijski betoni in malte, na katere deluje voda pod pritiskom (pregrade, bazeni, vodohrani).

Metode brez višanja tlaka vode

Prepustnost vode brez višanja tlaka se preskuša pri materialih in izdelkih, ki so izpostavljeni delovanju vode pod atmosferskim pritiskom (strešniki, fasadna opeka). Zgornja ploskev preskušanca se vodonepropustno ogradi. V tako dobljeno posodo se vlije voda do višine 10 - 50 mm. Pri strešnikih se meri čas v katerem se pojavijo prve kaplje vode na njegovi spodnji površini. Pri tem

preskusu se uporablja izraz 6/t. Najdaljši pričakovani čas zadrževanja vode pri strešniku znaša 6 ur (6/t=1). Najkrajši čas zadrževanja vode sta 2 uri (6/t=3).

Prepustnost zraka

Preskuša se na različne načine in s posebnimi napravami. Vse imajo del, s katerim se nadomešča izguba zraka in del, v katerem se vzdržuje stalen pritisk zraka. Meri se izguba zraka.

Konsistenca

Konsistenca materiala se preskuša na svežih mešanicah materialov, kot so betoni in malte. Konsistenca predstavlja mero vgradljivosti in obdelovalnosti svežih mešanic. Obstaja več vrst postopkov, ki med seboj niso povsem primerljivi. Zato se pogosto rezultati preiskav z različnimi postopki ne morejo medsebojno primerjati.

Postopek z vtiskanjem

V svežo mešanico materiala, ki je nasuta v posodi brez dna, se vtiska predmet določene oblike. Ta je lahko jeklena kroglica, ki prosto pada z določene višine. Meri se globina vdora kroglice v svežo mešanico. Uporablja se lahko tudi jeklena palica s kroglastim vrhom premera 16 mm. Meri se število udarcev potrebnih za določeno globino vtiskanja palice v svežo mešanico.

Postopek posedanja sveže mešanice brez stresanja

Sveža mešanica se vgradi v pločevinasti prerezani stožec z nabijanjem v treh plasteh. Stožci so lahko različnih izmer. Po odstranitvi stožca se mešanica posede. Merilo konsistence je velikost posedka.

Postopek posedanja s stresanjem

Eden izmed najbolj pogosto uporabljanih tovrstnih postopkov je Ve-Be postopek. Sveža betonska mešanica se vgradi v pločevinasti stožec, ki se nahaja v valjasti posodi. Potem, ko se stožec izvleče, posoda z vzorcem se stresa s frekvenco 50 Hz. Med stresanjem se meri čas poseda stožca v valjasto obliko ali pa posedanje plošče naslonjene na zgornjo površino stožca.

Postopek stresanja na stresalni mizici se uporablja za preskušanje konsistence sveže malte. Po odstranitvi stožca, s pomočjo katerega se je na mizico postavil vzorec malte, se mizica določen čas stresa. Po stresanju se meri premer preskušanca na mizici.

Vicatov postopek

Konsistenca cementne paste se ugotavlja v Vicatovem aparatu (igla premera 10 mm, mase 300 g) se spušča v valj narejen iz cementne paste. Konsistenca se ocenjuje glede na prodor igle v pasto do višine 5 - 7 mm nad dnom.

Hitrost vezanja cementa

Vicatov aparat se uporablja tudi za meritve hitrosti vezanja cementa. Pri tem se v vzorec cementne paste spušča igla obtežena z maso 300 g in s površino

prereza enako 1 mm^2. Vezanje cementa se začne, ko se vrh igle ustavi 3 - 5 mm pod vrhom valjastega preskušanca, konec vezanja pa nastopi ko se igla ustavi na globini 1 mm.

Stabilnost prostornine cementa

Uporablja se več načinov ugotavljanja stabilnosti prostornine , med katerimi so najbolj znani sledeči postopki:

- določanje stabilnosti s pogačo,
- določanje stabilnosti z Le Chatelier-ovim prstanom in
- določanje stabilnosti v avtoklavu.

Določanje stabilnosti s pogačo

Iz cementne paste standardne konsistence se naredijo pogačice premera 9 cm in višine 1,5 cm. Na podložni stekleni ploščici se strjujejo 24 ur. Ena izmed pogačic se kuha v vodi. V 28 dneh se ena izmed ostalih dveh pogačic hrani na zraku pri sobni temperaturi v prostoru brez prepiha, druga pa v vodi. Cement ima stabilno prostornino, če na nobeni izmed pogačic niso nastale razpoke.

Le Chatelier-jev prsten

Le Chatelierjev prstan je plašč valja premera in višine 30 mm, ki je izdelan iz medeninaste pločevine debeline 0,5 mm. Plašč valja je prerezan po višini. Na obodu ima pritrjen par igel dolžine 150 mm. Valj 30 mm se napolni s cementno pasto, ki se na obeh koncih poravna s steklenima ploščicama. Takoj po vgradnji vzorca cementne paste se izmeri razmik igel. Vzorci se hranijo 24 ur v vodi na sobni temperaturi. Po tem se ponovno meri razmik igel. Preiskava se nadaljuje s kuhanjem vzorcev v vodi. Po 2,5 urah kuhanja se ohladijo in se nato ponovno meri razmik igel. Cement ima zadostno prostorninsko stabilnost, če sprememba razmika pri dveh zaporednih meritvah ne presega 10 mm. Pri tem se upošteva povprečen rezultat meritev pri 3 vzorcih.

Določanje stabilnosti v avtoklavu

Sprememba prostornine cementne paste je lahko tudi posledica hidratacije MgO ali apnenih zrn, zaradi reakcije C_3A z mavcem (sulfatna ekspanzija). Te reakcije so počasne, zato jih pri preiskavah skušamo pospešiti. V avtoklavu se pod pritiskom 20 barov pospeši ekspanzija MgO in CaO. Sprememba prostornine se meri s spremembo dolžine preskušanca po avtoklaviranju.

Ugotavljanje prisotnosti apnenih zrn

Določanje vsebnosti apnenih zrn in soli je običajna vrsta tehnoloških preiskav opečnih izdelkov. Večja apnena zrna, ki se nahajajo v glini, se pri pečenju na 800°C pretvorijo v živo apno. V stiku z vodo se živo apno gasi in pri tem nabreka ter povzroča razpoke v notranjosti opečnega izdelka ali krušenje na njegovi površini. Vsebnost apnenih zrn se ugotavlja tako, da se opeke za več dni položijo v vlažno komoro nad vodo. Postopek ugotavljanja se pospeši tako, da se z vodo natopljene opeke v avtoklavu 3 ure izpostavijo zasičeni pari pod pritiskom treh barov. Na opekah, v katerih je prekomerna količina apnenih zrn, se pojavijo razpoke in površinske poškodbe.

Preiskave geometričnih lastnosti

V gradbeništvu so mnogi izdelki izdelani v predpisanih oblikah in s predpisanimi odstopanji izmer od določene nominalne izmere. Dovoljena odstopanja so običajno velikostnega reda od enega do nekaj milimetrov.

Izkrivljenost

Izkrivljenost se določa z vlečenjem izdelka (opeka) med paralelnima ploščama. Ravnost površine se ugotavlja s polaganjem preizkušanca na ravno ploščo ali s pomočjo kotnega merila.

Oblika zrn agregata

Hrapavost, gladkost in valovitost površine se ocenjuje vizualno ali z napravo, ki meri neravnost površin. Oblika zrn agregatov se ocenjuje vizualno ali z meritvijo izmer in klasifikacijo po njegovi obliki (okrogla, oglata, ploščata, paličasta). Pri kvantitativni oceni oblike agregata se uporabljata dva postopka.

Iz določene količine agregata se izbere večje število zrn merljivih oblik. Merita se največja (d_{max}) in najmanjša izmera (d_{min}). Iz teh podatkov se za vsako zrno izračuna koeficient oblike zrna (d_{min}/d_{max}). Koeficient celotnega vzorca se izračuna kot povprečje koeficientov izmer posameznih zrn.

Prostornina zrn se meri z volumetrom ali pa se izračuna iz njihove mase in gostote. Na osnovi izmerjene največje izmere vsakega zrna se izračuna prostornina opisane krogle. Od tod se izračuna prostorninski koeficient $C=V_z/V_k$, kjer je V_z - prostornina zrna in V_k - prostornina krogle.

LITERATURA

1. Civil Engineering Materials, 4th edition, Edt. Jackson N. & Dhir R.K., The Macmillan Press Ltd., London 1993.
2. Dean I., "Finishes", 4th edition, Mitchell's Building Series, Longman, Harlow, England, 1996.
3. Dean I., "Materials technology", Mitchell's Building Series, Longman, Harlow, England, 1996.
4. Gordon J.E. "The New Science of Strong Materials", 2nd edition, Penguin Books Ltd., Harmondsworth, England, 1991.
5. Horrath, L. "Fundamentals of Materials Science for Technologists", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1995.
6. Kemija, Leksikon Cankarjeve založbe, Urednik Ksenija Dolinar, Cankarjeva založba, Ljubljana 1988, ISBN: 86-361-0155-7
7. Les plastiques aujourd'hui et demain, Syndicat des Producteurs de Matières Plastiques (SPMP), Paris, 1990.
8. Lyons A., "Materials for Architects and Builders - An Introduction", Arnold, London, 1997
9. Materials in Action Series: Manufacturing with Materials, Edit. Edwards L. & Endean M., The Open University, Milton Keynes, England, Butterworths Scientific Ltd., London, 1990.
10. Materials in Action Series: Materials Principles and Practice, Edit. Edwards L. & Endean M., The Open University, Milton Keynes, England, Butterworths Scientific Ltd., London, 1990.
11. Materials in Action Series: Structural Materials, Edit. Edwards L. & Endean M., The Open University, Milton Keynes, England, Butterworths Scientific Ltd., London, 1990.
12. Schäffler H, Bruy E. & Schelling G. "Baustoffkunde", 7.Auflage,Vogel Buchverlag, Würzburg, 1996.
13. Shackelford J.F. "Introduction to Materials Science for Engineers, 2nd edition, Macmillan Publishing Company, New York, 1990.
14. Taylor, G.D."Construction Materials", Longman Scientific &Technical, Longman Group UK Ltd., Harlow, 1991.
15. Mallick, P.K., *Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing and Design*, 2nd Edition, M.Dekker, New York, NY, 1994.
16. Lopez-Anido R.A. in Naik T.R, *Emerging Materials for Civil Engineering, State of the Art*, The American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2000.

SEZNAM SLIK

Slika 1:	Življenjski krog gradiv	2
Slika 2:	Osnovne skupine materialov	3
Slika 3:	Shema hierarhične piramide standardizacije	21
Slika 4:	Shema organiziranosti ISO	23
Slika 5:	Zaporedje kroženja kamnin v naravi in spreminjanje enih v druge: 1 - kristalizacija, 2 - erozija (vpliv zunanjih sil), 3 - litifikacija, 4 - metamorfoza (visoka temperatura in pritisk), 5 - paligeneza (taljenje)	41
Slika 6:	Shema proizvodnje kamene volne	51
Slika 7:	Zrnavost agregata v betonskem prerezu	54
Slika 8:	Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov	55
Slika 9:	Mejne krivulje območij primernosti agregata po JUS U.M1.057	56
Slika 10:	Stopnje količine vlage v agregatu: (a) osušen v peči, (b) zračno suh, (c) zasičen z vlago in (d) moker	57
Slika 11:	Prikaz izdelave gradbene keramike	61
Slika 12:	Shematski prikaz izdelave ploskega stekla	68
Slika 13:	Diagram prostorninske spremembe mavca med vezanjem	77
Slika 14:	Diagram naraščanja tlačne trdnosti mavca med vezanjem	78
Slika 15:	Krog preobrazbe apna	80
Slika 16:	Shematski prikaz proizvodnje cementa	82
Slika 17:	Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja	83
Slika 18:	Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1:2001	84
Slika 19:	Vpliv vodocementnega razmerja na sestavo cementnega kamna	89
Slika 20:	Časovni potek strjevanja cementne paste	91
Slika 21:	Razvoj hidratacijske toplote v prvih urah vezanja cementne paste	91
Slika 22:	Shema kapilarnega krčenja cementnega kamna	92
Slika 23:	Vpliv hitrosti obremenjevanja na nosilnost in na modul elastičnosti cementnega kamna	93
Slika 24:	Proces hidratacije in nastajanja polimernega filma v polimerno modificiranih cementnih maltah	105
Slika 25:	Primerjava sestave aeriranega betona in betona normalne gostote	106
Slika 26:	Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti betona	109
Slika 27:	Vpliv naravnega in umetnega sušenja betona	110
Slika 28:	Odvisnost trdnosti betona od vodocementnega količnika	111
Slika 29:	Shematski prikaz vode v porah	112

Slika 30: Shematičen prikaz glavnih lastnosti dobrega betona, njihovega medsebojnega vpliva in elementov, ki vplivajo na njegove lastnosti 114
Slika 31: Osnovni načini zaščite porozne betonske površine pred zunanjimi vplivi 125
Slika 32: Prikaz učinka hidrofobiranja betonske površine 126
Slika 33: Primeri korozije armature zaradi poškodovanosti betona 128
Slika 34: Prikaz različnih vrst površinske zaščite betona 129
Slika 35: Shema proizvodnje železa in jekel 139
Slika 36: Sheme plavža in različnih peči za izdelavo jekla 140
Slika 37: Shematični prikaz stopnje pomirjenosti ingotov (2-nepomirjen, 1-pomirjen, 0-specialno pomirjen) 142
Slika 38: Shema oblikovanja kovinskega jekla z zveznim litjem 143
Slika 39: Prikaz razmerja železa in ogljika v jeklih: fazni diagram železo-ogljik (Fe-C) 144
Slika 40: Vpliv količine ogljika na mikrostrukturo in mehanske lastnosti karbonskega jekla 146
Slika 41: Natezni diagram mehkega jekla 151
Slika 42: Določanje meje plastičnosti pri izraziti (a) in neizraziti plastičnosti (b) 151
Slika 43: Začetna dela tehničnih diagramov mehkih konstrukcijskih jekel 152
Slika 44: Vpliv temperature na mehanske lastnosti konstrukcijskega jekla 153
Slika 45: Shematski prikaz proizvodnje aluminija 161
Slika 46: Shema oblikovanja polizdelka s stiskanjem aluminija 162
Slika 47: Primerjava σ–ε diagramov jekel in aluminijevih zlitin v običajni in normalizirani obliki (specifična trdnost) 164
Slika 48: Shematski prikaz proizvodnje bakra 167
Slika 49: Shema elektrolitske rafinacije bakra 167
Slika 50: Shematski prikaz pridobivanja magnezija 173
Slika 51: Shematični prikaz pridobivanja polimerov iz nafte 183
Slika 52: Vrste molekul nastalih s polimerizacijo (polimerne verige) 185
Slika 53: Polimerne verige v različnih vrstah polimernih materialov 185
Slika 54: $\sigma - \varepsilon$ diagram treh značilnih polimerov, ki so bili kratkotrajno obremenjeni do porušitve 188
Slika 55: Oblikovanje z vtiskanjem v kalup 192
Slika 56: Oblikovanje z stiskanjem v kalupu 193
Slika 57: Oblikovanje z vpihavanjem zraka v kalup 193
Slika 58: Oblikovanje polimernih izdelkov z iztiskanjem 194
Slika 59: Izdelava polimernega traku kaširanega s tkanino 194
Slika 60: Razmerje uporabe umetnih mas 201
Slika 61: Pridobivanje polimernih materialov iz osnovnih virov in iz polimernih odpadkov 202

Slika 62: Primerjava energije, ki se sprošča pri gorenju različnih snovi 203
Slika 63: Shematični prikaz recikliranja umetnih mas 204
Slika 64: Shematični prikaz pirolize plastičnih odpadkov 205
Slika 65: Delež in uporabnost različnih produktov pirolize 205
Slika 66: Shematski prikaz destilacije surove nafte 209
Slika 67: Lepljenje ogljikovodikovega veziva na mokro podlago 210
Slika 68: Shematični prikaz določanja viskoznosti 211
Slika 69: Prostorninska razmerja komponent bitumenskih mešanic 214
Slika 70: Shematični prikaz razporeditve obtežbe skozi plasti vozišča 219
Slika 71: Primerjava gostote, natezne trdnosti in modula elastičnosti tradicionalnih gradiv in kompozitnih materialov (prikazane so logaritemske skale) 235
Slika 72: Primerjava mehanskih lastnosti matričnih polimerov pri različnih negah 236
Slika 73: Primerjava cen posameznih vrst vlaken glede na visoko trdna ogljikova vlakna (indeks 1) 238
Slika 74: Osnovni načini tkanja vlaken 238
Slika 75: Različne razporeditve vlaken v kompozitnem materialu 239
Slika 76: Dve vrsti lameliranih kompozitov 240
Slika 77: Prikaz različnih jeder in primerjava njihovih tlačnih in strižnih trdnosti v odvisnosti od njihove gostote 241
Slika 78: Pregled materialov in vrst kompozitnih armatur za beton 243
Slika 79: Vlivanje smole v kalup in izdelava kompozitov z vlivanjem pod pritiskom 244
Slika 80: Postopki konstruiranja in optimizacije izdelkov iz laminatov (dimenzioniranje, obtežba, temperaturni pogoji, kemijska odpornost in ostale zahteve) 246
Slika 81: $\sigma - \varepsilon$ diagram laminata z vidno mejo nastanka mikrorazpoke 247
Slika 82: Primerjava izgube medplastne strižne trdnosti epoksidnega in poliesterskega laminata s stekleno tkanino pri pospešenem propadanju 247
Slika 83: Prečni prerez in shematski prikaz traheide iglavca 252
Slika 84: Značilnosti prereza lesnega debla 253
Slika 85: Poenostavljeni detajli radialnega prereza mehkega in trdega lesa 254
Slika 86: Značilne deformacije lesa zaradi krčenja 257
Slika 87: Diagrama krčenja in nabrekanja lesa 258
Slika 88: Obremenitve lesa: natezna in tlačna vzdolž (a) in prečno na vlakna (b), strižna vzdolž (c) in prečno na vlakna (d) ter upogibna (e) 263
Slika 89: Odvisnost specifičnih deformacij lesa od osne obremenitve v smeri vlaken (a) in od tlačne obremenitve prečno na vlakna (b) 263
Slika 90: Najbolj pogoste oblike zvijanja lesenih elementov: usločenost (a), koritavost (b), sabljavost (c) in zavitost (d) 266

Slika 91:	Proizvodnja plošč iz velikih iveri	269
Slika 92:	Priprava in izdelava papirusa v starem Egiptu	274
Slika 93:	Priprava in izdelovanje pergamenta v srednjem veku v Evropi	274
Slika 94:	Priprava in ročno izdelovanje papirja na Kitajskem	276
Slika 95:	Omakanje površine lepljenca	281
Slika 96:	Osnovne vrste obremenitev enostavnih lepljenih stikov	285
Slika 97:	Oblike enostavnejših lepljenih stikov	286
Slika 98:	Sprememba oblike tesnilne plasti med delovanjem dilatacije	289
Slika 99:	Primera tesnenja fuge pri različnih pričakovanih raztezkih	290
Slika 100:	Proces naravne zaščite prekinitve v cinkovi prevleki jekla	298
Slika 101:	$\sigma - \varepsilon$ diagrama idealno krhkega in idealno elastoplastičnega materiala	307
Slika 102:	Koncentracija napetosti v zoženem delu natezno obremenjene palice	307
Slika 103:	Razporeditev napetosti v prerezu materiala z napako pri natezni in pri tlačni obremenitvi	308
Slika 104:	Klasifikacija obremenitev glede na strukturno občutljivost materiala (a - strukturno najbolj občutljiva in e - strukturno najmanj občutljiva obremenitev)	309
Slika 105:	Tlačni preskus materiala v obliki kocke ali valja	310
Slika 106:	Značilni primeri določanja modula elastičnosti	311
Slika 107:	Tritočkovni (a) in štiritočkovni (b) upogibni preskus	312
Slika 108:	Preskus žilavosti z upogibom	313
Slika 109:	Strižne preiskave materiala (čisti strig (a), strig v napravi s tečaji (b) in strig pri torziji (c))	313
Slika 110:	Shema preskusa tečenja betona in diagram časovnega razvoja skrčkov pri stalni obremenitvi in različnih temperaturah	314
Slika 111:	Upadanje obremenitve pri stalni deformaciji (relaksacija)	315
Slika 112:	Preskus žilavosti z vztrajnikom	315
Slika 113:	Preskus žilavosti z nihalom po Charpy-ju	316
Slika 114:	Preskus s Föpplovim kladivom	317
Slika 115:	Naključno spreminjajoča se obtežba (stohastična) (a), harmonična nedušena (b) in harmonična dušena obtežba (c)	317
Slika 116:	Enoznačne nesimetrične obremenitve (a), izmenične nesimetrične obremenitve (b) in simetrične dinamične obremenitve (c)	318
Slika 117:	Določanje meje utrujanja materiala	318
Slika 118:	Martensov postopek meritve trdote krhkih materialov	319
Slika 119:	Postopki za določanje trdote z vtiskanjem: Brinellov (a), Vickersov (b) in Knoopov (c)	321
Slika 120:	Poldi preskuševalec (a) in kladivo z dvema polkroglama (b)	323
Slika 121:	Shema sklerometra	324

Slika 122: Določanje modula elastičnosti z resonanco 326
Slika 123: Ponazoritev por in razpok v poroznem materialu med zmrzovanjem 328

SEZNAM PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Naravna gradiva	6
Preglednica 2:	Umetna gradiva in njihovi izdelki	8
Preglednica 3:	Gradbena veziva	10
Preglednica 4:	Hidroizolacijski materiali in izdelki	12
Preglednica 5:	Termoizolacijski materiali in izdelki	13
Preglednica 6:	Materiali in izdelki, ki absorbirajo zvok	13
Preglednica 7:	Materiali in izdelki za akustično izolacijo in izolacijo za dušenje zvoka in vibracij	14
Preglednica 8:	Specifična masa in toplotna prevodnost materialov	15
Preglednica 9:	Zaželene in nezaželene lastnosti kamenin	49
Preglednica 10:	Značilnosti posameznih skupin zidakov po Eurocode 6	64
Preglednica 11:	Vrste mavca	76
Preglednica 12:	Oznake in imena mineralnih dodatkov	85
Preglednica 13:	Trdnostni razredi cementov [Mpa]	85
Preglednica 14:	Shema in opis hidratacije cementa	87
Preglednica 15:	Eksperimentalno določene trdnosti malt v odvisnosti od njihove sestave	102
Preglednica 16:	Skupine jekel glede na vsebnost ogljika	145
Preglednica 17:	Vpliv legirnih elementov na izboljšanje karbonskih jekel	146
Preglednica 18:	Vroče valjana jekla za armiranje betona	156
Preglednica 19:	Hladno preoblikovana jekla za armiranje betona	156
Preglednica 20:	Armaturne mreže za armiranje betona	156
Preglednica 21:	Pregled sestave in uporabe bakra, medenin ter bronov	168
Preglednica 22:	Pregled osnovnih polimerov	187
Preglednica 23:	Pomembnejši povzročitelji in načini propadanja polimerov	189
Preglednica 24:	Viskoznost različnih materialov	211
Preglednica 25:	Primerne stopnje viskoznosti za uporabo veziv	212
Preglednica 26:	Primerjava lastnosti različnih vlaken: A-najbolj izražena, C-najmanj izražena lastnost	237
Preglednica 27:	Vpliv debeline jedra na lastnosti sestavljenega kompozita	242
Preglednica 28:	Primerjava prednosti in pomanjkljivosti kompozitne armature	242
Preglednica 29:	Stanje na področju uvajanja armiranih plastik v gradbeno prakso	249
Preglednica 30:	Prostorninske lastnosti lesa	256
Preglednica 31:	Koeficienti spremembe dolžine in prostornine pri spremembi vlažnosti za 1%	258

Preglednica 32:	Vnetljivost lesa	260
Preglednica 33:	Standardizirane izmere rezanega lesa	267
Preglednica 34:	Značilne vrednosti mehanskih lastnosti nekaterih trdnostnih razredov lesa po EN 338:1995	271
Preglednica 35:	Primerjava lastnosti in uporabnosti tesnilnih materialov	287
Preglednica 36:	Polimeri, ki se uporabljajo kot lepila in tesnilne mase	288
Preglednica 37:	Raztros (v) rezultatov preiskav gradiv	301
Preglednica 38:	Pregled postopkov za določanje lastnosti gradiv	304
Preglednica 39:	Premer kroglice za preskus trdote po Brinellu	320
Preglednica 40:	Določanje trdote po Rockwellu (t je globina odtisa)	322