

uređaj cirkulira koncentrirana morska voda, kojoj se u spremniku *S* dovodi smjesa svježe morske vode i pretkoncentrirane morske vode dobivene u bazenima solane, u kojima morska voda ishlapljuje djelovanjem Sunčeva zračenja i vjetra. Tom prilikom izlučuju se kristali CaSO_4 koji lebde u tekućini. Iz prihvatnog spremnika *S* zasićena otopina tjerana pumpom *P* ulazi u niz zagrijača $G_1 \dots G_6$, u kojima se zagrijava suparom iz isparivača. Do konačnog zagrijavanja dolazi u zagrijaču G_7 direktnim ubrizgavanjem pare, a do uparivanja u isparivačima $F_1 \dots F_7$. Zagrijači se nalaze na atmosferskom tlaku i otopina u njima ne ključa. Međutim, od jednog isparivača do drugog tlak je sve manji, pa se otopina naglo upari u svakom od njih na sve nižoj temperaturi. Supara, koja pri tome nastaje, upotrebljava se u zagrijačima za zagrijavanje cirkulacijske tekućine. Sitni kristali soli, koji se izlučuju za vrijeme uparivanja, služe u isparnim tijelima kao kristalizacijske jezgre. U taložniku *T* veliki i teški kristali soli (NaCl) padaju na dno i odvođe se kao kristalna kaša u centrifugu. Otopina na gornjem rubu taložnika, u kojoj lebde fini kristali, sadrži korisne sastojke, pa se prerađuje u različite produkte (npr. soli za kupanje). Iz te se otopine mogu dobiti i kalij, magnezij i brom. Potrošnja svježe pare po kg isparene vode iznosi 0,38 kg. Potrošnja pare po jednom isparivaču smanjuje se povećanjem njihovog broja.

LIT.: И. И. Гельтерин, Выпарные аппараты. Государственное научно-техническое издательство химической литературы, Москва, Ленинград 1947. — Q. D. Kern, Process heat transfer. McGraw-Hill, New York 1950. — R. J. Clarke, Process engineering in the food industries. Heywood & Company, London 1957. — Т. А. Колач, Д. В. Радун, Выпарные станции, государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, Москва 1963. — Z. Rant, Испаривание и упаривание. Техническая книга, Загреб 1965. — S. K. Šušić, M. E. Guralj, Osnovi tehnologije šećera. Naučna knjiga, Beograd 1965. — А. Н. Плановский, В. М. Рамм, С. З. Казан, Процессы и аппараты химической технологии. Издательство «Химия», Москва 1968. — H. W. McAdams, Простирание топлива. Градевинска knjiga, Beograd 1969. — А. Г. Касаткин, Основные процессы и аппараты химической технологии. Издательство «Химия» Москва 1971. — F. Bošnjaković, Nauka o toplini. Tehnička knjiga, Zagreb 1976. — L. W. McCabe, C. J. Smith, Unit operations of chemical engineering. McGraw-Hill, Kogakusha, LTD, Tokyo 1976. — R. J. Welty, E. Ch. Wicks, E. R. Wilson, Fundamentals of momentum, heat and mass transfer. John Wiley and Sons, New York 1976.

E. Perlov-Narančić B. Tripalo

ISPITIVANJE GRAĐEVNIH MATERIJALA I KONSTRUKCIJA, postupci kojima se utvrđuju fizička i kemijska svojstva građevnih materijala, odnosno kojima se utvrđuje ponašanje građevnih konstrukcija pri djelovanju, u prvom redu vanjskih mehaničkih sila.

Građevni materijal uvjetuje svojim svojstvima i svojstva građevnih konstrukcija. Svojstva konstrukcije, osim toga, ovise o njezinom obliku. Zbog toga proučavanje svojstava materijala mora prethoditi proučavanju svojstava konstrukcije. To zahtijeva detaljno ispitivanje svojstava materijala. Za proučavanje konstrukcija, međutim, potrebna je u prvom redu teorijska analiza, a kad se u takvoj analizi nađe na nesavladive poteškoće, ispitivanje konstrukcija postaje prijeko potrebno. Ono je često potrebno i poželjno kao potvrda teorijske analize i ispravnosti izvedbe.

Za ispitivanja materijala i konstrukcija primjenjuju se raznovrsne metode, već prema svrsi ispitivanja i prema vrsti materijala i konstrukcija. Neke od tih metoda potpuno su identične i za ispitivanje materijala i za ispitivanje konstrukcije kad se radi o konstrukcijama od jednakog materijala (npr. metode bezrazornog ispitivanja), pa je zbog toga teško odrediti granicu između te dvije vrste ispitivanja. Neke metode ispitivanja razvile su se u posebne znanstvene discipline, npr. fotoelastimetrija (v. Fotoelastimetrija, TE5, str. 525), dimenzionalna analiza (v. Dimenzionalna analiza, TE3, str. 340), holografija (v. Holografija), tenzometrija (v. Tenzometrija) itd.

Kad se govori o ispitivanju materijala, obično se misli na ispitivanje tehničkih materijala koji kao sirovine, poluproizvodi ili konačni proizvodi služe za proizvodnju dobara. Ispitivanje građevnih materijala obuhvaća materijale koji se upotrebljavaju u građevnoj tehnici.

Veliko je značenje i važnost ispitivanja tehničkih materijala u suvremenom životu, jer se ispitivanje provodi s ciljem da se utvrde neke karakteristike materijala koje do sada nisu bile poznate ili da se provjeri da li karakteristike materijala odgovaraju postavljenim zahtjevima.

Postoje organizacije i institucije koje se bave propisivanjem karakteristika tehničkih materijala te kontrolom tih karakteristika koje se utvrđuju različitim postupcima ispitivanja. Radi toga svaka zemlja, prema svojim prilikama, donosi propise i pravilnike o kvaliteti i karakteristikama materijala koji se primjenjuju u pojedinim granama tehnike, a isto tako utvrđuje postupke ispitivanja. U nekim se zemljama propisi i pravilnici o karakteristikama i kvaliteti tehničkih materijala, o njihovoj primjeni, te postupci ispitivanja označuju oznakama koje su obično kratice institucije koja izdaje te propise ili kratice koja znači propis i pravilo (npr. DIN za *Deutsche Industrie Norm*, ACI za *American Concrete Institute*, CNIPS za *Центральный научно-исследовательский институт промышленного строительства*). U nas je to JUS, što je kratica za *Jugoslavenski standard*. Obično uz tu kraticu stoji i oznaka o kojem je standardu ili propisu riječ, i to prema klasifikaciji koja može biti označena brojevima (npr. DIN 1048), slovima (npr. BSS 102) ili mješovito (npr. JUS BC.002).

Posljednjih nekoliko desetljeća nastoje se u čitavom svijetu ujednačiti postupci ispitivanja materijala, pa su u tu svrhu osnovane međunarodne komisije i udruženja u koje ulaze predstavnici pojedinih društava iz različitih zemalja, ili službeni predstavnici nacionalnih organizacija za ispitivanje i kvalitetu materijala. Kao rezultat svojega rada komisije sastavljaju prijedloge za propise i pravilnike, standarde, norme itd., te ih daju na pregled i predlažu za prijem u pojedinim zemljama. Takve su međunarodne komisije ISO (*International Organization for Standardization*), RILEM (*Réunion internationale pour les essais de matériaux et construction*), CEB (*Comité Européen pour le Béton*).

Kad se govori o ispitivanju građevnih materijala, onda se obično pod tim razumiju materijali koji služe kao sirovine ili poluproizvodi u građevnoj tehnici. To su obično materijali u čvrstom agregatnom stanju u različitim oblicima: prah (cement), sitnež (šljunak, drobljenac) ili u komadima (opeka). Voda je česti građevni materijal u tekućem stanju, koja služi za proces hidratacije s cementom, vapnom i sadrom. Ima i drugih materijala u tekućem stanju koji se upotrebljavaju u graditeljstvu, a u tekućem su stanju, kao npr. dodaci betonu ili tekući sastojak dvokomponentnih sintetskih materijala. Kao građevni materijal pojavljuju se i veći komadi koji se gotovi ugrađuju u građevinu i predstavljaju gotove dijelove objekta, kao što su različite ploče, kanalske cijevi, vodovodne cijevi od silikatnih materijala ili od sintetskih materijala, sanitarna keramika itd. Ima također građevnih materijala koji stizu na gradilište u svicima (bitumenska lepenka) ili namotajima (čelična žica za prednapregnuti beton).

Ugrađeni građevni materijal mora posjedovati određena svojstva: čvrstoću, tvrdocu, otpornost protiv habanja, nepropusnost za vodu i plinove, mora biti dobar toplinski izolator, mora dobro prigušivati zvuk, ne smije biti higroskopan itd. No isto tako prilikom obrade i ugrađivanja mora imati neka svojstva koja su često u suprotnosti s potrebnim svojstvima ugrađenog materijala. Npr., poželjno je da beton pri ugradbi ima što veću podatljivost koja se postiže povećanjem količine vode, ali se s povećanjem količine vode smanjuje njegova otpornost na tlak, na habanje itd. Treba, prema tome, uskladiti karakteristike materijala da se zadovolji što više zahtjeva, uzimajući u obzir i fazu obrade, ugradnje, i konačnu namjenu građevnog materijala. Dakako, da su za pojedine građevine unaprijed poznata svojstva koja mora imati materijal i da su ona za pojedine građevine različita. Npr., za pregradne se zidove u stambenim zgradama zahtijeva da budu od materijala koji ima dobra toplinska i zvučna izolacijska svojstva, dok se npr. od betona za slapište brane hidroelektrane zahtijeva da bude otporan na udarce kamenih čestica, na djelovanje mraza, da bude nepropustan itd.

Vjerojatno nema područja proizvodnje gdje bi se na materijale postavljali tako različiti zahtjevi kao u graditeljstvu, i stoga je proučavanje i propisivanje svojstava tih materijala i njihovo ispitivanje od velikog značenja. Ne treba pri tom ipustiti iz vida da su investicije u građevinske objekte približno 1/3 od ukupnih investicija i da su zbog toga troškovi za proučavanje i ispitivanje građevnog materijala opravdani i potrebni.

Vrste materijala i njihova svojstva koje je potrebno ispitivati vrlo su brojni. Tome odgovara raznolikost i mnoštvo postupaka za ispitivanje građevnih materijala, a i brojnost propisa i standarda kojima su karakteristike materijala dogovorene, propisane ili preporučene. Vremenom se gledanja i zahtjevi o pojedinim svojstvima materijala mijenjaju, na temelju novih spoznaja i iskustava, tako da se standardi i propisi obnavljaju i nadopunjuju. Znatnije promjene i izmjene nisu česte i nije rijetko da neki propis o kvaliteti ostaje nepromijenjen desetak i dvadesetak godina. Tada su i pripreme za izmjenu takvog propisa dugotrajnije, šire i obuhvatnije, jer se propisom o kvaliteti nekog materijala ponajviše utječe na njegovu proizvodnju i potrošnju. O propisima, osim toga, neposredno ovisi i ekonomičnost proizvodnje takvog građevnog materijala. S pojavom novih građevnih materijala potrebno je utvrditi i postupke ispitivanja tih materijala. Razumljivo je stoga da broj postupaka ispitivanja, a time i broj normi, standarda i propisa stalno raste. Koji put je potrebno više godina, a i više desetljeća, da se ispita veza između svojstava materijala, koja se u praksi prate, i rezultata kratkotrajnih ispitivanja. Ne treba zaboraviti na još jednu specifičnost graditeljstva, naime, građevinski objekti u prosjeku imaju znatno duži vijek trajanja nego strojevi i uređaji drugih tehničkih grana. Npr., računa se da trajnost stambenih zgrada iznosi 50...100 godina, reprezentativnih građevina nekoliko sto-

ljeća, suvremenih auto-cesta (do generalne rekonstrukcije) 30...50 godina, hidroenergetskih postrojenja 30...50 godina itd. Trajnost jednog objekta, odnosno materijala od kojeg je objekat izgrađen, konačno se potvrđuje jedino praktičnim iskustvom, a u graditeljstvu su za takvo promatranje potrebni deseci godina; uobičajeno je da se nastoji ispitivanjem i praćenjem ponašanja materijala uspostaviti veza između rezultata kratkotrajnih ispitivanja i dugotrajnog ponašanja u praktičnim uvjetima. Potrebno je istaknuti još jednu karakteristiku građevnih materijala kad se uspoređuju s materijalima drugih tehničkih grana. Dio građevnih materijala, naime, upotrebljava se praktički bez preradbe, onakvi kakvi se nalaze u prirodi. To su drvo i kamen. Iako se oni zaštićuju od utjecaja atmosfere i okolice (voda, mraz, korodivni agensi itd.), ipak im se najvažnija mehanička svojstva ne mijenjaju. A upravo se takvi materijali u smislu jednakosti svojstava razlikuju od materijala za ostale tehničke grane, jer je rasipanje rezultata ispitivanja drva i kamena neusporedivo veće od rasipanja takvih rezultata čelika ili sintetskih materijala. To vrijedi manje-više i za ostale tipične građevne materijale: beton, opeku, sadru, keramiku itd.

Rasipanje rezultata ispitivanja može se prikazati koeficijentom varijacije koji je jednak omjeru standardne devijacije (v. *Statistika*) i aritmetičke sredine rezultata ispitivanja. Za neke tehničke materijale, kad se ispituje vlačna i tlačna čvrstoća, koeficijent varijacije iznosi:

| | | | |
|------------|--------|-------------|---------|
| polimeri | 2...4% | keramika | 5...10% |
| fenoplasti | 3...5% | opeka | 8...15% |
| čelik | 2...4% | beton | 5...15% |
| aluminij | 3...5% | drvo, kamen | 8...20% |

Materijali s velikim koeficijentom varijacije vrlo su neujednačeni kad se promatraju njihove mehaničke karakteristike. To je i razumljivo, naročito za kamen i drvo, jer su to materijali koji nastaju u prirodi u vrlo složenim i promjenljivim klimatskim, geološkim, ekološkim i drugim uvjetima, i to kroz razmjerno duga vremena — drvo za nekoliko desetaka godina, a kamen za milijune godina. Slično je, međutim, i za druge tipične građevne materijale, npr. beton, koji se doduše proizvodi i stvrdnjava kroz razmjerno kratko vrijeme i to kontrolirano, ali koji se sastoji od nekoliko sastojaka: cementa, vode i ispunje (šljunka, pijeska ili drugih znatnih materijala). Svaki od njih u beton unosi svoje karakteristike, pa treba računati da zbog tih utjecaja mora biti velika promjenljivost mehaničkih svojstava betona. Prilikom ispitivanja građevnih materijala toj se pojavi treba posvetiti puna pažnja i zbog toga treba provjeravati svojstva građevnih materijala na znatno više uzoraka nego svojstva materijala za ostale tehničke grane. Naposljetku treba spomenuti i to da su za najviše građevinskih objekata najvažnije mehaničke karakteristike, te da su takva ispitivanja građevnih materijala najčešća. Tek na drugom mjestu po broju objekata i elemenata nalaze se ispitivanja ostalih fizičkih karakteristika (upijanje vode, kapilarnost, toplinska i zvučna vodljivost, otpornost prema djelovanju mraza itd.). Građevne elemente koji su izloženi atmosferskim utjecajima i utjecaju okolice, potrebno je ispitati da li dobro odolijevaju različitim kemijskim utjecajima i insolaciji. Pored toga je poželjno da budu pogodni za preradu i obradu, a često je poželjno da budu pogodni za transport i što lakši.

Svrha ispitivanja. Prema svrsi ispitivanja razlikuju se prethodna, kontrolna i znanstvena ispitivanja.

Prethodna ispitivanja služe za upoznavanje materijala od kojih se namjerava izvesti gradnja. Pri izboru materijala za veći građevinski objekt važan je čitav niz činilaca od kojih kvaliteta materijala stoji na prvom mjestu, ali na izbor materijala utječu troškovi i mogućnost transporta, mogućnost uskladištenja, raspoložive količine materijala itd. Obično se sastavlja plan ispitivanja koji obuhvaća spisak materijala i njihovih svojstava koje treba ispitati, a prema mogućim sirovinским izvorima. Ako se radi o tzv. *kompozitnim* materijalima, kao npr. o betonu koji se sastoji od više sastojaka, treba odlučiti koje će se kombinacije sastojaka ispitati. Iako je u većini slučajeva razmjerno jednostavno sastaviti plan takvog pripremnog ispitivanja, jer nije velik izbor materijala iz pojedinih sirovinских izvora i od pojedinih proizvođača, može se dogoditi (a to obično vrijedi za beton) da

postoji više sirovinских izvora (šljunčara, tvornica cementa) i više vrsta dodataka, pa i mnogo kombinacija sastojaka. Tada je potrebno smanjiti broj kombinacija radi smanjenja troškova i skraćanja trajanja ispitivanja, jer su troškovi ispitivanja građevnih materijala razmjerno veliki i jer je potrebno dosta vremena da se (npr. da se stvrdne beton) dobiju konačna svojstva. Obično se tada na temelju prvih rezultata ispitivanja isključuju one kombinacije i oni materijali koji očito ne daju tražena svojstva. Tako se u nekoliko faza može broj kombinacija znatno smanjiti.

Kontrolna ispitivanja služe da se utvrdi kvaliteta proizvedenog materijala. Obično su za ta ispitivanja predviđeni standardni postupci ispitivanja. Tih ispitivanja ima najviše, obavljaju se rutinski s uvježbanim osobljem, na standardnim uređajima i strojevima. Danas su neka ispitivanja u tolikoj mjeri automatizirana da se sva mjerenja sila i deformacija, njihova registracija, proračun mehaničkih ili nekih drugih karakteristika, ispisivanje izračunatih podataka itd. obavljaju automatski hidraulički, električki ili elektronički. Kako je baš za graditeljstvo tipično da se velik dio materijala ugrađuje ili montira na gradilištima, razumljivo je da je potrebna stalna kontrola, a kako se obično radi i o velikim količinama materijala, potrebno je mnogo takvih kontrolnih ispitivanja.

Kontrolna ispitivanja obavljaju se tokom građenja ili naknadno. Obično postupci ispitivanja ovise o trenutku ispitivanja, jer ugrađeni materijal ima druge karakteristike od sirovina. Npr. pri proizvodnji betona za betonske konstrukcije uobičajena su ispitivanja svježeg betona (konzistencija, brzina stvrdnjavanja, izradba probnih tijela za ispitivanje čvrstoće itd.), a kad je konstrukcija izvedena, ispituje se stvrdnuti beton (sklerometriranjem, vađenjem jezgara, radiografski itd.). Za neke objekte (npr. dolinske pregrade) obavljaju se kontrolna ispitivanja i poslije mnogo vremena nakon što je objekat izgrađen s ciljem da se prate eventualne promjene u materijalu koje mogu biti uzrokovane trošenjem materijala, korozijom ili starenjem. Posebno su takva ispitivanja važna kad se objekti saniraju ili se mijenja namjena objekta.

Za kontrolna ispitivanja naročito je važna tzv. reproduktivnost rezultata ispitivanja, tj. njihova pouzdanost i nepromjenljivost pri ponovljenim ispitivanjima istog materijala. Prema tome, postupci kontrolnih ispitivanja moraju biti tako odabrani da rasipanje rezultata ispitivanja uzrokovano samim postupkom bude što manje. Tako npr. rezultati ispitivanja većine materijala ovise o tome kako se nanosi opterećenje na probna tijela koja se ispituju, u kojoj mjeri je ono centrično opterećeno, da li je na mjestima hvatišta sile prisutno trenje ili nije, koja je brzina opterećivanja, koja je temperatura tijela koje se ispituje itd. Gotovo da nema vanjskih utjecaja o kojima ne ovise, manje ili više, rezultati ispitivanja. Među njih treba uvrstiti točnost i reproduktivnost pomagala kojima se ispituje (strojevi, mjerni instrumenti, rasvjeta) i, svakako, osoblje koje obavlja ispitivanje. Za kontrolna ispitivanja zahtjev za reproduktivnošću rezultata naročito je važan, jer se na temelju tih rezultata donose odluke o tome da li je objekt izveden u skladu s propisanim zahtjevima. Kako se radi obično o objektima velike vrijednosti, odluka se ne smije oslanjati na problematične podatke ispitivanja. Zbog toga se, naročito za kontrolna ispitivanja, odabiru postupci koji su po mogućnosti što jednostavniji, zahtijevaju pomagala koja se lako mogu kontrolirati i s kojima se mogu služiti i manje kvalificirani radnici, ali koji daju pouzdane rezultate. Poznato je da je veliko rasipanje rezultata ispitivanja građevnih materijala, a ono se može pripisati dijelom postupku ispitivanja, a dijelom nejednoličnosti materijala. U nekim ispitivanjima mogu se do neke mjere odijeliti ta dva utjecaja. Može se npr. pretpostaviti da u ispitivanju iste mješavine betona rasipanje rezultata ovisi samo o postupku ispitivanja: drugim riječima, može se računati da je mješavina jednolična. Ako se, međutim, razmatra rasipanje rezultata ispitivanja betona iz više mješavina, rasipanje rezultata sigurno je veće zbog razlika među mješavinama. Ukupna standardna devijacija σ , standardna devijacija postupka σ_1 i mješavina σ_2 vezane su izrazom $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$, pa se može odrediti vrijednost jedne od triju veličina, ako su poznate vrijednosti za dvije.

Postupci za kontrolna ispitivanja propisani su standardima. Standardi za ispitivanje građevnih materijala svrstani su u nekoliko grupa i s općim standardima čine cjelinu, koja onima koji se bave ispitivanjem služi naročito za kontrolna ispitivanja, kao skup pravila kojih se pri ispitivanjima treba strogo pridržavati.

Znanstvena ispitivanja provode se obično sa svrhom da se upoznaju neke temeljne karakteristike materijala ili njihove međusobne veze, npr. proces hidratacije cementa, utjecaj pojedinih mineralnih sastojaka na proces vezanja ili utjecaj strukture materijala na fenomenološka svojstva materijala, odnosno ponašanje polikristaliničnih materijala pri popuštanju ili utjecaj pojave mikropukotina na čvrstoću betona itd.

Za takva ispitivanja obično se upotrebljuju postupci koji se razlikuju od standardnih. I pomagala su različita od standardnih, npr. optički instrumenti (mikroskopi ili elektronski mikroskopi), specijalni spektrografi, oscilografi itd. Takvim se ispitivanjem obično bave visokokvalificirani znanstveni radnici. Ona su obično dugotrajna, a ponekad je potrebna posebna oprema i posebna pomagala.

Mjesta ispitivanja. Građevni materijal može se ispitivati na gradilištu i u specijaliziranim institutima. Ispitivanja se obavljaju u laboratorijima na gradilištima kojima su mogućnosti ograničene na samo neke vrste ispitivanja, ali njihov kapacitet može ponekad biti i veći od kapaciteta institutskih laboratorija. Tako je npr. uobičajeno da se na velikim gradilištima brana, kanala, luka, stambenih blokova i prometnica za kontrolna ispitivanja materijala organiziraju laboratoriji za posebna ispitivanja, čak sa specijalnom opremom za masovna ispitivanja nekih svojstava materijala. U takvim laboratorijima ponekad se primjenjuju postupci koji su brzi, jednostavni i na temelju kojih se mogu tek do neke mjere utvrditi samo pojedine karakteristike materijala. Materijali se konačno provjeravaju u institutskim laboratorijima. Kao primjer može poslužiti laboratorij za stalnu kontrolu betona na gradilištu kanala s velikim količinama betona za obloge. Tu se dnevno kontroliraju granulometrijski sastav agregata, konzistencije betona, pripremaju i ispituju uzorci betona, te se mnogobrojnim ispitivanjima sklerometrom ili ultrazvukom provjerava konačna kvaliteta betona. Na nekim gradilištima utvrđuje se kvaliteta cementa jednostavnim i brzim ručnim ispitivanjem čvrstoće pogačica od stvrdnute cementne kaše stare 24 sata. Takvim postupkom moguće je približno i po iskustvu utvrditi kvalitetu cementa. Kad je kvaliteta sumnjiva, kontrolno ispitivanje provodi se u laboratoriju, koji je opremljen za potpuno ispitivanje cementa. Ispitivanja na gradilištu mogu biti i vrlo specijalizirana i vrlo približna. O tome ovisi organizacija i oprema laboratorija na gradilištu.

U nas ima više instituta za ispitivanje građevnih materijala, uglavnom u glavnim gradovima republika: Beogradu, Zagrebu, Ljubljani, Sarajevu, Skopju, s ukupno oko 2000 radnika. U te laboratorije obično se ne ubrajaju laboratoriji za geomehanička ispitivanja koji raspolažu uređajima za takva ispitivanja, a koji se donekle razlikuju od onih za ispitivanje građevnih materijala. Instituti za ispitivanja građevnih materijala mogu biti specijalizirani prema vrsti ispitivanja ili materijala (laki betoni, prednapregnuti beton, keramika itd.).

Razorna i bezrazorna ispitivanja. Prema stanju objekta, nakon ispitivanja razlikuju se ispitivanja s razaranjem (destruktivna), bez razaranja (nedestruktivna) i s polurazaranjem (semi-destruktivna ispitivanja). Obično su najzanimljivije mehaničke karakteristike materijala (čvrstoća, tvrdoća, elastičnost, plastičnost). Da se odredi većina tih mehaničkih karakteristika, potrebno je da se materijal ili do kraja razori ili bitno promijeni. Zbog toga se većina takvih ispitivanja svrstava u ispitivanja s razaranjem. Međutim, i za određivanje drugih karakteristika potrebno je razoriti materijal (npr. za određivanje otpornosti prema požaru, otpornosti prema djelovanju mraza), kad se materijal mrvni u sitni prah i sl., pa takvi uzorci nakon ispitivanja više nisu upotrebljivi. Očito je da iz racionalnih razloga nisu moguća takva ispitivanja na gotovim konstrukcijama, jer bi dijelovi konstrukcije postali neupotrebljivi. Često se tada iz konstrukcije vade uzorci materijala (uzimanje betonske jezgre, rezanje i vađenje pojedinih dijelova čeličnih konstruk-

cija itd.) koji se ispituju razaranjem, ali izvadene dijelove očito treba nadomjestiti novim. To su obično skupi dugotrajni postupci, a ponekad ih nije niti moguće primijeniti (npr. vađenje betonskih jezgara iz konstrukcije s vrlo gustom čeličnom armaturom).

Mnoga fizička svojstva utvrđuju se postupcima kojima se uzorci ne razaraju ili im se ni najmanje ne mijenjaju svojstva. Npr., gustoća materijala utvrđuje se vaganjem i izmjerom uzorka pravilnih oblika, brzina širenja zvuka u elastičnim tijelima mjeri se propuštanjem oscilacija visokih frekvencija, pri čemu su naprezanja u materijalu neznatna.

Postoje, međutim, između mnogih karakteristika koje se utvrđuju razaranjem i onih koje se utvrđuju bez razaranja čvrsti odnosi koji se mogu prikazati različitim funkcijskim vezama, pa je moguće pomoću jedne odrediti drugu karakteristiku. Takve se veze mnogo iskorišćavaju u suvremenoj kontroli građevnih materijala, pa kad se govori o *bezrazornom ispitivanju* obično se misli na određivanje onih svojstava koja se izravno mogu odrediti samo razaranjem, a neizravno i postupcima bez razaranja, ako su poznate veze između jednih i drugih. Razorni postupci obično su dugotrajni i skupi a ispitivanja bez razaranja obično su kratkotrajna i brza, pa se mogu lako i mnogo izvoditi. Ako se, međutim, na temelju rezultata bezrazornih ispitivanja određuju (pomoću funkcijskih veza) svojstva koja se inače utvrđuju razornim postupcima, interpolira se još jedan element nesigurnosti. Zbog toga je takav rezultat manje pouzdan od onog koji se dobije izravnim razornim postupkom. No, upravo zbog brzine, malih troškova i mogućnosti da se brzo dobije cjelovita slika o kvaliteti izvedene konstrukcije danas se vrlo mnogo proučavaju bezrazorni postupci.

Osim toga, postoje i *polurazorni postupci*. Tada oštećenja uzoraka obično nisu takva da materijal prestaje biti upotrebljiv.

U tabl. 1 nalazi se pregled postupaka, s obzirom na razornost materijala, za određivanje svojstava materijala.

Brzina opterećivanja materijala. Ispitivanja se razlikuju i prema brzini kojom se opterećuju uzorci materijala, pa postoje *statička i dinamička ispitivanja*. Statička ispitivanja su ona kad opterećenje teorijski ne mijenja svoju vrijednost u dužem vremenskom razdoblju, dok su dinamička ona kad opterećenje mijenja svoju vrijednost za vrijeme ispitivanja. Dakako, da ispitivanje, npr. mehaničkih svojstava, nije moguće provesti ako se ne mijenja opterećenje, no ipak se ograničava brzina promjene opterećenja. Teško je postaviti oštru granicu između statičkih i dinamičkih opterećenja, ali radi orijentacije može se smatrati dinamičkim opterećenjem ono pri kojem se uzorak razori ili znatnije strukturno promijeni u vremenu kraćem od jedne sekunde.

Sigurnija vremenska granica između statičkih i dinamičkih ispitivanja može se odrediti na temelju slijedećih razmatranja.

Kad se govori o ispitivanju materijala, mora se znati da je razlikovanje statičkih i dinamičkih ispitivanja uzrokovala pojava da se mnogi materijali pri jednakim prilikama inače ponašaju drugačije kad se polagano opterećuju nego kad se brzo opterećuju. Tako se mnogi materijali pri brzom opterećivanju ponašaju kao krhki, a pri polaganom kao plastični materijali (parafin na normalnoj temperaturi). To vrijedi naročito za elastoplastične materijale (npr. mekane vrste čelika, neke vrste polimera itd.). Za svaki se materijal može utvrditi vremenska granica kad se njegova svojstva mijenjaju i kad se materijal drugačije ponaša pri brzom ili polaganom opterećivanju, tako da za svaki materijal postoji granično vrijeme koje dijeli dinamičko od statičkog ispitivanja. Zbog toga je za neka statička ispitivanja propisana najveća dopuštena brzina opterećivanja, npr. $0,5 \text{ MPas}^{-1}$ (za ispitivanje čvrstoće betona), ili porast sile od nule do najveće vrijednosti za vrijeme od 15s (za ispitivanje tvrdoće metala utiskivanjem kuglice). Elastoplastični materijali kada prijeđu u plastično stanje ponašaju se djelomično kao viskozne tekućine za koje vrijedi Newtonov zakon tečenja, pa je za razvoj plastičnih deformacija do uspostavljanja stanja ravnoteže potrebno neko vrijeme te su i rezultati ispitivanja tvrdoće ovisni o brzini opterećivanja.

Razlikuju se također ispitivanja pri jednokratnom i ponovljenom opterećenju. To mogu biti statička i dinamička ispitivanja.

Tako npr. ispitivanje rastezanjem, kad se utvrđuje čvrstoća materijala uz polagano opterećivanje, spada u statičko ispitivanje s jednokratnim opterećenjem. Ispitivanje umornosti materijala s mnogo puta ponovljenim opterećenjem može biti dinamičko s razmjerno velikom frekvencijom promjena opterećenja, ali ono može biti i statičko ako su promjene opterećenja spore. Pokazalo se, među ostalim, i to da nema znatnijih razlika u rezultatima ispitivanja, pri brzim i sporim promjenama opterećenja, ako deformacije materijala ostaju elastične. Ispitivanje s višekratnim sporim ponavljanjem opterećenja naziva se i *kvazi-dinamičkim*.

Tehnološka ispitivanja. Izvan dviju navedenih grupa ispitivanja — statičkih i dinamičkih — velik dio ispitivanja svrstava se u tzv. *tehnološka ispitivanja*. To su ona ispitivanja kojima se određuju svojstva važna za praksu, a koja se ne mogu

Tablica 1

PREGLED POSTUPAKA ZA ODREĐIVANJE SVOJSTAVA MATERIJALA S OBZIROM NA RAZORNOST ISPITIVANOG MATERIJALA

| Svojstvo | Uzorak | U konstrukciji |
|--|---|--|
| Gustoća (sa šupljinama u materijalu) | bezrazorno | polurazorno (vađenje uzorka) bezrazorno (apsorpcijom neutrona) |
| Gustoća (bez šupljina u materijalu) | razorno (drobljenje u prah) | razorno (drobljenje u prah) |
| Vlažnost | bezrazorno | polurazorno (sušenjem izvađenog uzorka) bezrazorno (motrenjem elektr. otpora) |
| Upijanje vode | bezrazorno | polurazorno (vađenje uzorka) |
| Šupljikavost — apsolutna | razorno (potrebno odrediti gustoću) | polurazorno (potrebno odrediti gustoću) |
| Šupljikavost — prividna | bezrazorno | polurazorno (vađenje uzorka) |
| Toplinska vodljivost | bezrazorno (Poensgenov ormar) | bezrazorno (Schmidtove trake) |
| Toplinski kapacitet | bezrazorno | polurazorno (vađenje uzorka) |
| Kapilarno dizanje | bezrazorno | bezrazorno |
| Akustička svojstva | bezrazorno | bezrazorno |
| Elastične konstante (moduli) | bezrazorno | bezrazorno |
| Karakteristike plastičnosti (geom. promjene, radnja sloma) | razorno | polurazorno |
| Statička čvrstoća | razorno | polurazorno |
| Udarne čvrstoće | razorno | polurazorno |
| Granica umornosti | razorno | polurazorno |
| Udarne žilavost | razorno | polurazorno |
| Otpornost protiv mraza | razorno | polurazorno |
| Habanje trenjem | polurazorno | polurazorno (vađenje uzorka) |
| Erozija | polurazorno | polurazorno |
| Tvrdoća | polurazorno | polurazorno |
| Korozija | bezrazorno (mjerenje elektr. potencijala) | bezrazorno (mjerenje elektr. potencijala) |

utvrditi niti statičkim, niti dinamičkim ispitivanjem, niti utvrđivanjem nekih fizičkih karakteristika. Tehnološka ispitivanja u mnogome se razlikuju od statičkih i dinamičkih ispitivanja. U prvom redu, njima se ne utvrđuju osnovne karakteristike materijala, nego su postupci ispitivanja prilagođeni prilikama kojima je materijal izložen u praksi. Kao primjer može poslužiti ispitivanje otpornosti betona ili kamena prema djelovanju mraza. Podaci koji se dobiju na temelju statičkih i dinamičkih ispitivanja (tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, upijanje vode, gustoća itd.), iako mnogobrojni, ipak nisu dovoljni da se dobije odgovor na pitanje da li je i u kojoj mjeri beton ili kamen otporan prema djelovanju mraza. Materijal, naime, može imati mnoga dobra svojstva o kojima ovisi njegovo ponašanje na niskim temperaturama, npr. veliku vlačnu čvrstoću ili malo upijanje vode itd., ali ipak, pored tih dobrih svojstava, otpornost prema djelovanju mraza ovisi također o rasporedu šupljina, njihove međusobne povezanosti itd. Može se, prema tome, ocijeniti da li je neki materijal više ili manje otporan prema djelovanju mraza, no siguran odgovor daje jedino ispitivanje, koje je tako organizirano da se oponašaju prilike koje zimi djeluju na materijal. Najprije se materijal zasiti vodom, a zatim se ciklički izmjenično smrzava i otapa, nekoliko desetaka ili stotina puta. Nakon toga se utvrđuje da li je oštećen i u kojoj mjeri.

Karakteristike su tehnoloških ispitivanja: ima ih znatno više nego ostalih vrsta ispitivanja; postupcima ispitivanja simuliraju se prilike kojima je materijal izložen u prirodi; njima se ne utvrđuju osnovna svojstva materijala, već svojstva pod kombiniranim djelovanjima; rezultati ispitivanja prikazuju se često i drugim jedinicama mjera, osim naprezanjem, deformacijom ili radnjom; rezultati se ispitivanja često daju opisno, tj. bez upotrebe mjernih veličina, npr. kad se ispitivanjem postojanosti boje utvrđuje samo da li ima ili nema promjena.

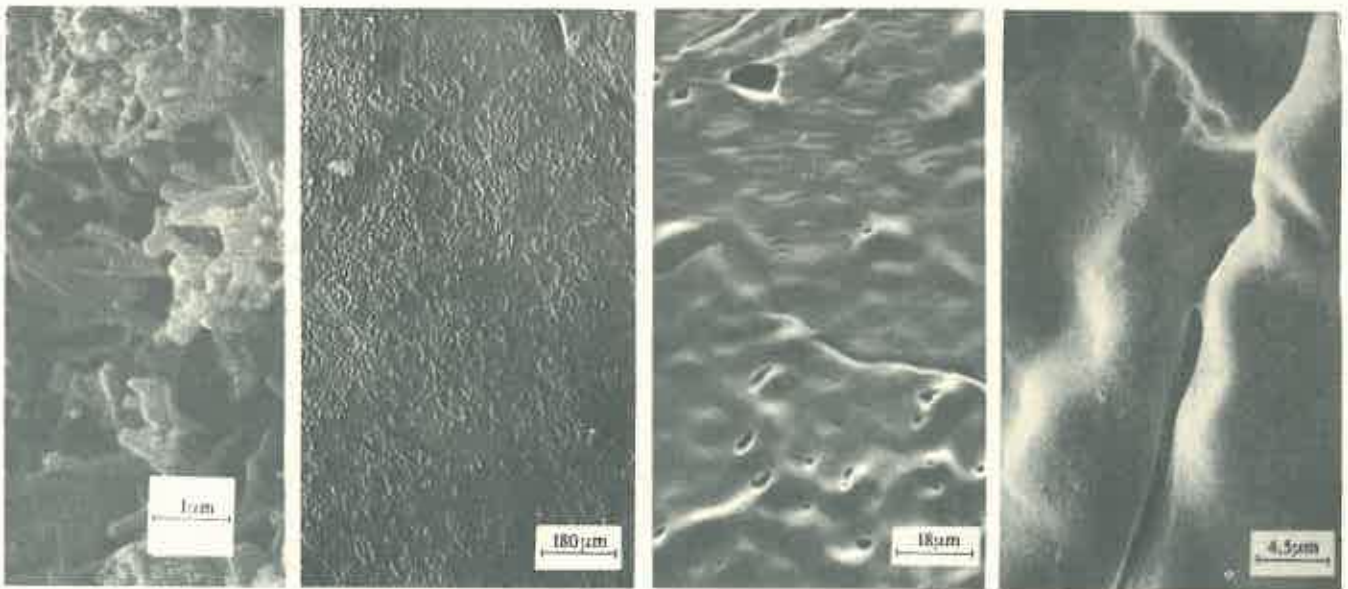
Mehanička svojstva građevnih materijala

Razlikuju se dvije osnovne strukture čvrste materije: *a) kristalinična* kad su molekule raspoređene u prostoru po nekom pravilu, i *b) amorfna*, kad su molekule nepravilno raspoređene.

Kristali u osnovi mogu imati takav raspored molekula da su fizička svojstva u svim smjerovima jednaka (*izotropija*) ili su u dva, odnosno u tri međusobno okomita smjera različita (*ortotropija*), ili u tri međusobno priklonjena smjera različita (*anizotropija*). Amorfne strukture su izotropne.

Struktura građevnih materijala, međutim, vrlo je nepravilna i složena i ne postoji nijedan građevni materijal kojemu se struktura može usporediti sa strukturom kristala. Postoje, međutim, materijali koji se sastoje od više sitnih u prostoru različito orijentiranih kristala (magnetske stijene, metali). Postoje materijali amorfne strukture i lančanih veza (staklo, polimeri). No, najviše građevnih materijala (betoni svih vrsta, keramika, drvo, kamen sedimentnog podrijetla itd.) imaju strukture različite od navedenih tipova struktura, i one su najčešće mješavina svih mogućih tipova, npr. beton se sastoji od agregata ili ispune i stvrdnutog veziva. Dakako, da se u njemu mogu naći i kristali i amorfne strukture (geli) i sedimentni ostaci. Tako sastavljeni betoni trebali bi biti izotropni, a njihova su anizotropna ili ortotropna struktura posljedica načina proizvodnje betona, načina ugradnje i zbijanja. Mikroskopske snimke čelika, cementnog betona, polimera i drva (sl. 1) pokazuju kolike razlike postoje u strukturama građevnog materijala, a da nijedna struktura ne predstavlja jednu od osnovnih struktura. Odstupanja od osnovnih struktura pojavljuju se i u materijalima koji se upotrebljavaju u ostalim tehničkim granama. U građevnim materijalima ona su znatno veća, i to je sigurno jedan od razloga da je rasipanje rezultata ispitivanja građevnih materijala znatno veće. U svakoj od tih struktura ima dijelova različitih mehaničkih svojstava, različite čvrstoće, tvrdoće i deformabilnosti. Osim toga, većina je građevnih materijala šupljikava, a u nekima čak veći dio obujma čine šupljine, koje su međusobno odijeljene tankim stijenkama (npr. stiropor). Neki materijali imaju te šupljine ispunjene vodom, koja je tada jedan od elemenata o kojem ovisi njihova svojstva.

Sigurno je, stoga, da fizičke i mehaničke karakteristike (ako se mehaničke promatraju odvojeno od ostalih fizičkih karak-



Cementni kamen

Bakrena legura pri različitim povećanjima

Sl. 1. Heterogena struktura materijala pod mikroskopom

teristika) više ovise o rasporedu različitih dijelova strukture (kristala, amornih utrusaka, sedimentnih dijelova itd.) i o njihovim međusobnim vezama nego o njihovim karakteristikama. Griffith je pokazao (1926) da defekti u osnovnim elementima, kristalu i amorfnoj strukturi ili lančanoj vezi, znatno, čak do 100 puta, smanjuju njihovu čvrstoću, tumačeći to koncentracijom naprezanja oko mjesta defekata, a to mogu biti dislokacije (v. *Čvrsto stanje*, TE3, str. 128) ili neke druge nepravilnosti (npr. šupljine). Ta se slika nejednoličnog prijenosa sila ponavlja i na znatno većem prostoru, što pokazuje snimka presjeka betonske kocke pod tlakom (sl. 2). Presjek kocke je prevučen fotoelastičnim lakom i snimka je načinjena pomoću polariziranog svjetla. Vidi se da je opterećenje različitih dijelova makrostrukture – agregata – drugačije od opterećenja cementnog morta, te da agregat kao krući dio makrostrukture preuzima znatno veća naprezanja. Zbog tih razlika u napreznjima pojavljuju se lokalne koncentracije naprezanja i početak razaranja materijala. Makar se pri ispitivanju materijala uzorci pomno pripremaju zbog opisanih značajki mikrostrukture i makrostrukture građevnih materijala, raspodjela naprezanja nije nikada jednolična, pa postoje uvijek lokalne koncentracije naprezanja.



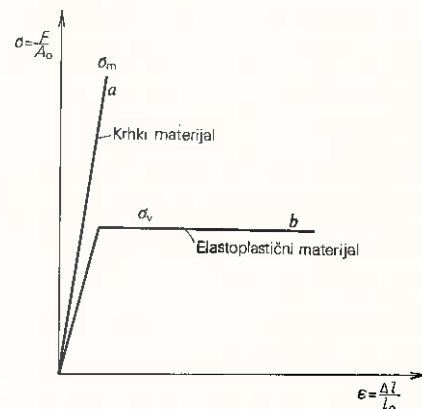
Sl. 2. Snimka presjeka betonske kocke pod tlakom. Presjek je kocke prevučen fotoelastičnim lakom i snimka je načinjena pomoću polariziranog svjetla

Krhki i elastoplastični materijali. Ponašanje je materijala pri koncentraciji naprezanja različito. Svrstaju li se svi materijali prema mehaničkim karakteristikama u *krhke* i *elastoplastične* materijale, tumačenje je njihova različitog ponašanja jednostavno. Karakteristike tih materijala prikazane su dijagramima,

u kojima apscisa predstavlja relativnu deformaciju $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, a ordinata naprezanje

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (1)$$

gdje su Δl stvarna promjena duljine, l_0 početna duljina, F sila, a A_0 početna površina presjeka.



Sl. 3. Ovisnost deformacije o napreznju

Krhki materijal ima samo elastične deformacije (krivulja *a* na sl. 3), a elastoplastični do naprezanja σ_v samo elastične, a kad je naprezanje dostiglo vrijednost σ_v , počinje naglo povećanje deformacije (tečenje, krivulja *b* na sl. 3). Zbog jednostavnosti, neka su elastične deformacije ovisne o napreznjima prema Hookeovu zakonu

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (2)$$

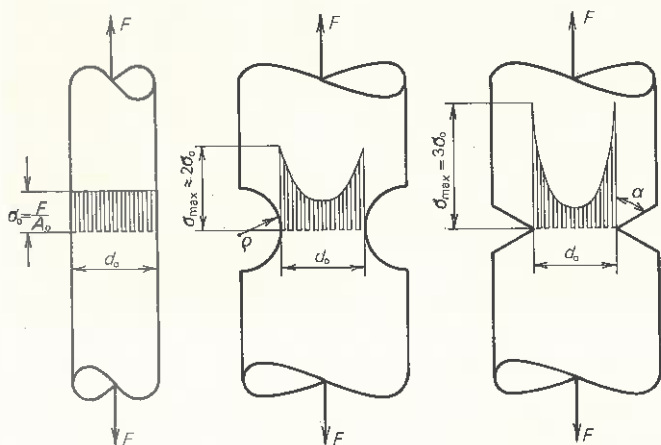
gdje je E modul elastičnosti.

Koncentracija naprezanja prikazana je dijagramom napreznja okruglog štapa (sl. 4) koji ima naglu promjenu poprečnog presjeka. Faktor koncentracije u materijalu koji se ponaša prema Hookeovu zakonu (2) ovisi o geometrijskim veličinama

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} = f\left(\frac{A}{A_0}, \alpha, \rho\right), \quad (3)$$

gdje je A/A_0 omjer površina punog i suženog presjeka štapa, α kut priklona, a ρ polumjer zakrivljenosti najužeg dijela.

U krhkom materijalu raspodjela naprezanja (sl. 4) ostaje nepromijenjena, ali s povećanjem sile F , koja djeluje na štap, povećavaju se proporcionalno i naprezanja sve do trenutka kad naprezanje u rubnim vlaknima na suženom dijelu ne dosegne čvrstoću materijala. Tada počinje razaranje materijala na tom mjestu, a koncentracija se još poveća zbog oštrijeg zarez a i manjeg presjeka i u kratkom vremenu (oko 10^{-3} s) razara se štap po čitavom presjeku.



Sl. 4. Koncentracija naprezanja u štapi s naglom promjenom poprečnog presjeka

U elastoplastičnim materijalima slika raspodjele naprezanja ostaje nepromijenjena sve dok najviše napregnuta rubna vlakna ne dosegnu granicu tečenja materijala. Daljim povećanjem sile, naprezanja na mjestima u blizini ruba dalje ne rastu jer su već jednaka σ_v (sl. 3) i konačno se naprezanja na cijelom presjeku izjednače, pa je naprezanje jednolično raspodijeljeno. Očito je da štap od krhkog materijala razara sila koja je znatno manja od one kad štap nema proširenog dijela. Štap od elastoplastičnog materijala, međutim, razara jednaka sila, bez obzira na postojanje proširenog dijela. Prema tome, nagle promjene presjeka loše utječu na krhke materijale, a bez utjecaja su na elastoplastične materijale. Slika raspodjele naprezanja u kristalu sigurno nije jednaka onoj koju je Griffith dao za neprekinutu sredinu, a što je temeljna pretpostavka u teoriji elastičnosti, jer se kristal sastoji od diskretnih čestica s prekinutim potencijalnim poljima na određenim razmacima. Stoga se govori o utjecaju defekata na različitim razinama: na razini molekularnih razmaka, na mikroskopskim i makroskopskim razinama. Ti defekti, dakako, osim šupljina različitih oblika i dislokacija na razini kristala, mogu nastati zbog različitih fizičkih i mehaničkih karakteristika dijelova materijala, ili zbog, kako se to obično naziva, različitih faza. Tako npr. u metalografskom izbrusku između kristala ferita nalazi se mekana faza ugljika, ili u betonu između zrna agregata mekana faza cementnog kamena. Prema tome, svi materijali koji se makroskopski smatraju homogenima mogu se već prostim okom ocijeniti kao heterogeni (beton, opeka itd.), a pod mikroskopom gotovo nema materijala koji bi se mogao smatrati homogenim.

Želi li se proširiti pojam krhkih i elastoplastičnih materijala, koji pojednostavljeno gledano predstavljaju većinu građevnih materijala, bolje je govoriti o krhkom, plastičnom ili elastoplastičnom stanju materijala, jer se mnogi građevni materijali mogu, već prema temperaturi, dovesti u različita stanja: krhko, plastično ili elastoplastično. U tabl. 2 prikazana su stanja pojedinih materijala za karakteristične temperature pri jednosmjernom opterećenju.

Mnogi krhki građevni materijali, imaju vlačnu čvrstoću nekoliko puta manju od tlačne. Tako npr. betoni imaju vlačnu čvrstoću 3...6 MPa, a tlačnu 20...60 MPa, opeka slično: vlačnu 1...2 MPa, a tlačnu 5...25 MPa itd. Ta se pojava može dijelom objasniti drugačijim utjecajem defekata na različitim razinama pri ispitivanju rastezanjem i tlačenjem. Općenito se mehanička

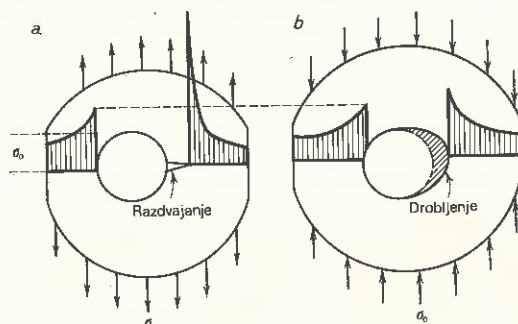
Tablica 2

STANJE NEKIH MATERIJALA S OBZIROM NA TEMPERATURU

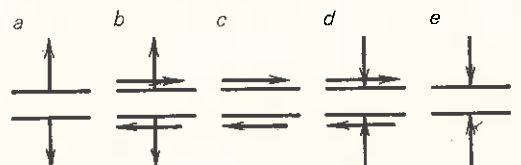
| Materijal | Temperatura | Krhko | Plastično | Elastoplastično |
|-------------------|-------------------------|-------|-----------|-----------------|
| Polimeri | -20°C +20°C +80°C | × | × | × |
| Kamen | +20°C | × | | |
| Drvo | +20°C | × | | |
| Prešano drvo | +20°C | | | × |
| Čelik | +20°C +650°C | × | × | |
| Lijeivano željezo | +20°C +650°C | × | × | |
| Bronca | +20°C | × | | |

svojstva materijala mogu svrstati među strukturno osjetljive i neosjetljive. Dokazano je da mehanizam razaranja krhkih materijala ovisi o vrsti naprezanja (rastezanje, tlačenje, savijanje, smicanje itd). Ako se pretpostavi da su naprezanja u nekom presjeku s defektom (npr. s nepravilnom šupljinom) u području elastičnih deformacija pri rastezanju i tlačenju jednaka ali suprotnog predznaka, slika naprezanja mijenja se u trenutku kad počne razaranje u najviše napregnutom mjestu, tj. na rubu šupljine. Pri rastezanju odvajaju se čestice materijala i na mjestu razaranja pojavljuje se oštar zarez koji povećava koncentraciju naprezanja, i on se vrlo velikom brzinom širi po presjeku te se odmah potpuno odvaja jedan od drugog dijela. Pri tlačenju prekoračenjem čvrstoće na najviše napregnutom mjestu, na rubu šupljine, razara se materijal, on se drobi, šupljina se povećava, ali se faktor koncentracije bitno ne mijenja, i konačno razaranje nastupa uglavnom zbog prekoračenja poprečnih deformacija (sl. 5).

Različita mehanička svojstva mogu se prema strukturnoj osjetljivosti krhkih materijala približno poredati kao na sl. 6.



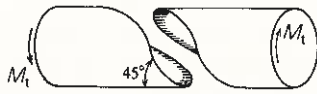
Sl. 5. Naprezanje materijala u presjeku s defektom. a rastezanje, b tlačenje



Sl. 6. Klasifikacija vrsta naprezanja i mehaničkih karakteristika prema strukturnoj osjetljivosti

Jednosmjerna i višesmjerna naprezanja. Granica umornosti materijala pri jednosmjernom vlačnom naprezanju spada također u strukturno vrlo osjetljiva svojstva. Navedeni redosljed (sl. 6) može se primijeniti na granice umornosti elastoplastičnih materijala, jer se naprezanja pri ispitivanju umornosti kreću u području elastičnih deformacija, te uglavnom vrijedi sve ono što vrijedi za krhke materijale.

Što se tiče ostalih vrsta opterećenja (savijanje, torzija) može se prihvatiti isto gledište, a to potvrđuju i zapažanja. Npr., pri savijanju krhkih materijala razaranje počinje u zoni vlačnih naprezanja, te strukturno osjetljivo svojstvo dikтира ponašanje uzorka. Isto to vrijedi za dvosmjerna naprezanja, npr. za torziju kad su na štapu kružnog presjeka glavna naprezanja (v. *Nauka o čvrstoći*), pod kutom od $\pi/4$ prema osi štapa, a do razaranja dolazi po liniji okomitoj na vlačna naprezanja, što je tipično za takve lomove (sl. 7).



Sl. 7. Oblik loma štapa od lijevanog željeza opterećenog momentom torzije

Opisane pojave pokušalo se rastumačiti fizičkim i njima analognim matematičkim modelima. Poznate su teorije najslabijeg članka (selektivna teorija), koja odgovara serijskom spajanju više elemenata, te teorija snopa (aditivna), koja odgovara paralelnom spajanju više elemenata.

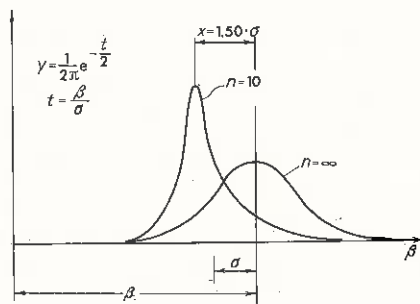
Teorija najslabijeg članka pretpostavlja da se od karika neograničene populacije koje imaju poznate statističke karakteristike vlačne čvrstoće, npr. za Gaussovu normalnu distribuciju (aritmetičku sredinu i standardnu devijaciju), sastavljaju lanci. Očito je da je u duljem lancu vjerojatnost veća da se u neograničenoj populaciji pojavi karika manje čvrstoće, a kako čvrstoća lanca ovisi o najslabijoj karici, očito je da dulji lanci imaju u prosjeku manju čvrstoću. Pretpostavi li se da je distribucija čvrstoće karika od kojih se sastavljaju lanci normalna, može se iz funkcije raspodjele $\Phi(x)$ odrediti s kojom se vjerojatnošću iz neograničenog skupa karika odabire jedna kojoj je čvrstoća manja od neke unaprijed zadane vrijednosti β_0 . Pri ponovnom n -krotnom odabiranju karika vjerojatnost da čvrstoća bilo koje odabrane bude manja od zadane vrijednosti β_0 određena je izrazom $\varphi = [\Phi(\beta_0)]^n$. Nije teško odrediti medijanu za n -krotna odabiranja karika $\beta_m = \beta_s - x\sigma$, gdje je β_s aritmetička srednja vrijednost čvrstoće, i prema tome utvrditi zakon prema kojemu se snizuju prosječne čvrstoće lanaca sastavljenih od n karika. Vrijednosti za x nalaze se u tab. 3.

Tablica 3

VRIJEDNOSTI x ZA ODREĐIVANJE MEDIJANE ZA n -KRATNA ODABIRANJA KARIKA

| | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 10 | 20 | 40 | 100 | 500 |
| x | 0 | 0,55 | 0,82 | 1,00 | 1,13 | 1,50 | 1,83 | 2,10 | 2,50 | 2,80 |

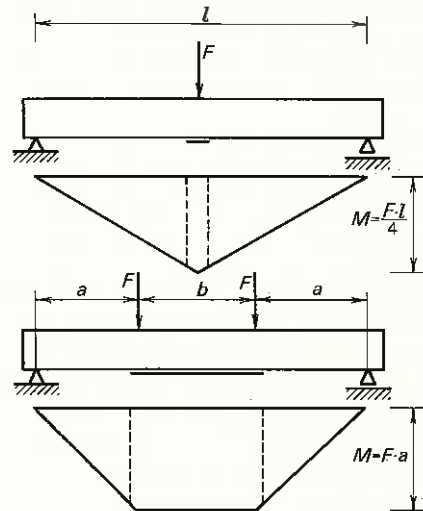
Ako se taj model prenese na uzorke koji se ispituju, pokazuje se da su rezultati ispitivanja u prosjeku veći za kraće uzorke, a za dulje uzorke duljina nema velikog utjecaja. Nije jednostavno eksperimentom utvrditi osnovnu duljinu elemenata koja odgovara jednoj karici u modelu lanca. Taj model ipak omogućuje da se u načelu analiziraju različiti postupci ispitivanja i rezultati koji se njima dobivaju. Teorija najslabijeg članka vrlo dobro se primjenjuje upravo na strukturno osjetljiva svojstva materijala u krhkom stanju, i to za različite načine opterećenja. Može se, npr., zaključiti da rezultati ispitivanja ovisе u određenoj mjeri od duljine uzorka. Isto tako rezultati ispitivanja gređica na savijanje sigurno ovisе o rasporedu opterećenja, koja daju jednaki maksimalni moment. Sa dvije koncentrirane jednake sile čvrstoća je manja što je veći razmak među silama, jer je veći dio rastegnute zone izložen najvećim naprezanjima, pa je vjerojatnost veća da se u tom razmaku nađe defekt.



Sl. 8. Raspodjela rezultata ispitivanja za neograničeni ($n = \infty$) i ograničeni ($n = 10$) broj karika u lancu

Može se, međutim, pokazati da se s povećanjem broja karika smanjuje standardna devijacija tako da konačna slika raspodjele rezultata ispitivanja čvrstoće ovisi o broju karika u lancu (sl. 8). Iz tog se zaključuje, npr., da su pri savijanju gređica od krhkog materijala rezultati ispitivanja čvrstoće veći od onih pri rastezanju, jer je samo najviše udaljeni sloj od neutralne osi izložen najvećim naprezanjem, te da se s povećanjem razmaka b među silama (sl. 9) smanjuju prosječni rezultati ispitivanja čvrstoće.

Suprotna je teorija koja uzima kao model snop od n međusobno čvrsto spojenih elemenata — štapova. Neka su čvrstoće pojedinih štapova raspodijeljene prema normalnoj raspodjeli s aritmetičkom sredinom β_s . Može se pokazati da će aritmetičke sredine snopova od n štapova biti to bliže aritmetičkoj sredini čitavog skupa što je n veći. Ako se svi štapovi sastave u jedan snop, dobiva se rezultat koji odgovara aritmetičkoj sredini čitavog skupa. Ova se teorija dobro primjenjuje na strukturno neosjetljiva svojstva.

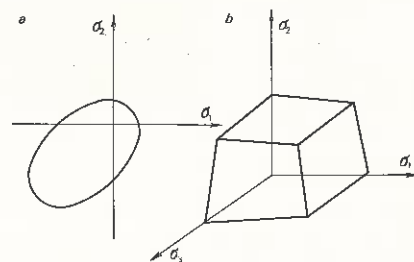


Sl. 9. Utjecaj položaja sile F na pojavu maksimalnog momenta savijanja opterećene grede. Na donjoj slici je maksimalnim momentom obuhvaćen veći dio materijala nego na gornjoj i vjerojatnost ranijeg sloma je veća

Za elastoplastična i plastična stanja, kad koncentracija naprezanja nema utjecaja, nema niti takvih pojava i može se pokazati da je ponašanje materijala u takvim stanjima približno jednako pri tlačenju i rastezanju, a manji su koeficijenti varijacije mehaničkih karakteristika.

No, jedan te isti materijal, koji se pri statičkom opterećivanju ponaša kao elastoplastičan ili plastičan, ponaša se kao krhak kad se drukčije optereti. To su npr. mnogi metali kad se udarno opterećuju ili kad se opterećenje ponavlja (umornost materijala). Tada i oblik loma odgovara lomu krhkih materijala, tj. nema pojave znatnih trajnih deformacija.

Sve se to odnosi uglavnom na jednosmjerna opterećenja. U građevnim konstrukcijama materijal je, većinom, opterećen u dva ili tri smjera, pa je poželjno da se poznaju svojstva materijala i u takvim prilikama. Tu se, međutim, javljaju teškoće i teorijske i tehničke naravi. Pretpostavi li se da je materijal izotropan, potrebno je mnogo ispitivanja da bi se dobili podaci za različite odnose opterećenja, npr. samo u dva smjera. Vjerojatno je, naime, da čvrstoća u jednom smjeru ovisi i o naprezanju koji je okomit na taj smjer. Da se dobiju donekle sigurni podaci koji povezuju opterećenja u dva okomita smjera, potrebno je mnogo ispitivanja. Ti se rezultati obično prikazuju graničnim linijama (sl. 10a), ili za trosmjerno opterećenje graničnim plohami (sl. 10b). Dakako, da bi se sa sigurnošću odredile granične plohe, potrebno je uz različite kombinacije opterećenja σ_1 , σ_2 i σ_3 ispitati vrlo mnogo uzoraka, pri čemu treba imati još u vidu i to da i pri tim ispitivanjima postoji rasipanje rezultata. Tu se pojavljuju tehničke teškoće zbog pro-



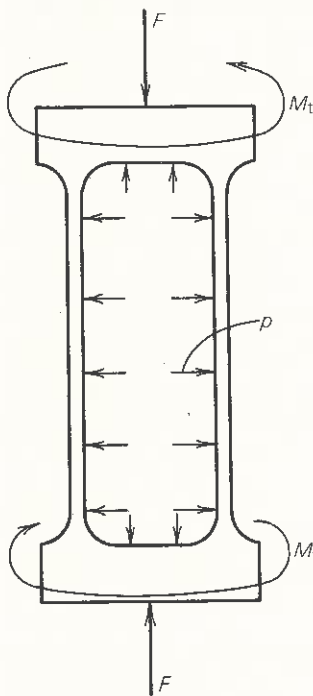
Sl. 10. Primjer granične linije (a) za prikazivanje naprezanja za dvosmjerno opterećenje i graničnih ploha (b) za prikazivanje naprezanja za trosmjerno naprezanje

blema kako prihvatiti uzorak i jednolično prenijeti silu na njega. Za jednosmjerno opterećenje taj problem ne postoji, jer su uređaji za takvo ispitivanje konstruirani tako da mogu prenijeti vlačnu silu, tlačnu silu, moment torzije ili savijanja, ili čak njihovu kombinaciju. Međutim, za opterećivanje u dva ili tri smjera ima u čitavom svijetu samo nekoliko uređaja, i to uglavnom konstruiranih za prenošenje tlaka, zbog čega se problem određivanja graničnih linija ili ploha rješava na drugi način.

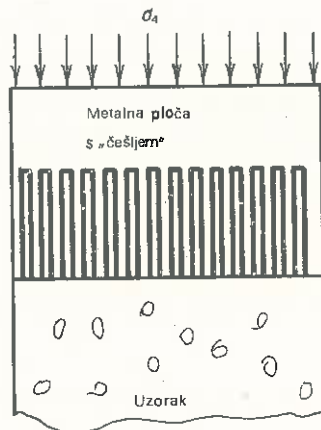
Dvosmjerna naprezanja mogu se postići u stijenkama cijevi koje se mogu opteretiti uzdužnom silom, momentom torzije i unutrašnjim tlakom.

Poznate su komponente naprezanja σ_{ij} od sile F , od momenta torzije M_t i od unutrašnjeg tlaka p , pa se lako izračunaju i glavna naprezanja prema izrazu $\sigma_u = \sigma_{ij} \cos(u_i) \cos(u_j)$. Ima i drugih kombinacija osnovnih opterećenja pomoću kojih je moguće dobiti dvosmjerna, pa čak i trossmjerna stanja naprezanja, ali ne treba ispustiti iz vida činjenicu da se takvim ispitivanjem može dobiti tek nekoliko točaka granične linije (sl. 10a) odnosno granične plohe (sl. 10b). Takvim ispitivanjima potvrđuju se ili se odbacuju tzv. teorije čvrstoće ili teorije graničnih stanja kojima se predviđaju stanja materijala, npr. razaranje, tečenje ili umornost pri višesmjernom naprezanju (v. *Nauka o čvrstoći*). Samo su neke od njih potvrđene, no pokazalo se da samo nekim materijalima odgovaraju pojedine teorije. Opterećenja u ortogonalnim smjerovima utječu na ponašanje većine građevnih materijala i oni mijenjaju svojstva utvrđena pri jednosmjernom opterećenju. Prikladno je ponekad tenzor naprezanja rastaviti na sferni ili hidrostatski i devijatorski dio. Hidrostatski dio odgovara hidrostatskom tlaku i u izotropnim materijalima uzrokuje jednako velike relativne deformacije u sva tri smjera, dok devijatorski dio uzrokuje promjene oblika, ali bez promjena obujma. Ispitivanja su pokazala da se mnogi materijali, npr. kamen, pod velikim hidrostatskim tlakom i razmjerno malom devijatorskom naprezanju ponašaju kao plastični materijali, iako su uz jednosmjerno naprezanje krhki na istim temperaturama. To se također događa u dubokim geološkim slojevima gdje su tlakovi vrlo veliki, a materijal slijedi prisilne deformacije uzrokovane pomacima tla i pri tome se ne razara (škrljavci, sinklinalne, antiklinalne). Ta iskustva potvrđuju važnost ispitivanja s višesmjernim stanjima opterećenja i pored teškoća koje prate takva ispitivanja.

Moguće je uz pomoć složenih uređaja višesmjerno opterećivati materijale. Oni se upotrebljavaju za neka znanstvena istra-



Sl. 11. Posuda za postizanje hidrostatskog tlaka i jednosmjernog opterećenja u kojoj se nalazi uzorak obložen gumenim plaštem



Sl. 12. »Češalj« za prijenos hidrostatskih tlakova

živanja. Uređaj za postizavanje hidrostatskog tlaka i jednosmjernog opterećenja sastoji se obično od zatvorene posude s tekućinom, u kojoj se nalazi uzorak obložen gumenim plaštem (sl. 11) ili češljevi u tri ortogonalna smjera preko kojih se prenoše različiti ili jednaki hidrostatski tlakovi (sl. 12). Češljovima se ne sprečava deformiranje kocke koja se ispituje.

Poteškoće i teorijske i eksperimentalne još su znatno veće kad se radi o ispitivanju anizotropnih ili ortotropnih materijala. Iako se teorijskim analizama ponašanja materijala pretpostavlja da su materijali izotropni, treba reći da, strogo uzevši, izotropni materijali gotovo ne postoje.

Poznate su razlike elastičnih karakteristika svih proizvoda koji se dobivaju valjanjem ili izvlačenjem. U smjeru valjanja obično su veći moduli elastičnosti i čvrstoća. To vrijedi za čelik, drvene iverice, papir itd. Razlike su ipak dovoljno male, pa se u inače složenim proračunima o tom i ne vodi računa. Za neke druge materijale ortotropija je ipak toliko izražena da razlike u ortogonalnim smjerovima treba uzeti u obzir. Za takve je materijale karakteristično da se smjerovi glavnih deformacija i glavnih naprezanja podudaraju sa smjerovima osi ortotropije, no u svim ostalim smjerovima oni se razlikuju, što treba uzeti u obzir kad se iz mjerenih deformacija izračunavaju glavna naprezanja. U anizotropnim materijalima, kojih je u stvari malo, ne podudaraju se smjerovi glavnih deformacija i glavnih naprezanja. Postupak kojim se u takvim slučajevima određuju smjerovi i vrijednosti glavnih naprezanja vrlo je složen. Treba najprije na temelju mjerenih deformacija u odabranim smjerovima (tri u ravnini, a šest u prostoru) izračunati komponente deformacije u smjerovima osi anizotropije, zatim uz poznate konstante elastičnosti (u ravnini 6 konstanta, u prostoru 21 konstanta) odrediti komponente naprezanja za te smjerove i zatim smjerove i vrijednosti glavnih naprezanja. Postupak je jednostavniji ako se deformacije mjere u smjerovima osi anizotropije. U izotropnom materijalu uvijek se poklapaju smjerovi glavnih deformacija i naprezanja.

STATIČKA I DINAMIČKA ISPITIVANJA

Standardna ispitivanja građevnih materijala obavljaju se redovno opterećivanjem u jednom smjeru, i to rastezanjem ili stlačivanjem. U tim ispitivanjima pretpostavlja se da je uzorak u smjeru opterećenja jednolično opterećen, te da je jednolično opterećen i po čitavoj površini preko koje se prenosi opterećenje. Toj pretpostavci nastoje se prilagoditi i postupci ispitivanja i uređaji za ispitivanje. To je jedino opterećenje kad se uzorak teorijski nalazi u homogenom stanju naprezanja i kad u punoj mjeri dolazi do izražaja strukturalna osjetljivost materijala u krhkom stanju. Sva ostala opterećenja (momentom savijanja, momentom torzije ili posmika) daju linearne raspodjele deformacije i, u elastičnom području, linearne raspodjele naprezanja, tako da neke mehaničke karakteristike materijala dolaze do izražaja tek u zonama najvećih deformacija i naprezanja. Moment torzije, osim toga, daje na plaštu tordiranog štapa dvosmjerno naprezanje. Ima, međutim, slučajeva kada se radi jednostavnijeg ispitivanja, neki materijali ispituju savijanjem, torzijom ili kakvim drugim opterećenjem. Tako je npr. jednostavnije ispitati cementnu prizmicu savijanjem nego rastezanjem zbog težeg prijenosa vlačne sile s kidalice na prizmicu.

Također je jednostavnije ispitati udarnu čvrstoću (žilavost) metala Charpyjevim njihalom na savijanje nego rastezanjem. Ispitivanje na savijanje ima još jednu prednost, a ta je da se (redovno) štapići pripremljeni za ispitivanje savijanjem razmjerno jednostavno zarezuju da bi se dobila koncentracija naprezanja i ujedno se tada ispituje osjetljivost na naglu promjenu presjeka.

Rezultati statičkih i dinamičkih ispitivanja iskazuju se kao

$$\text{relativna deformacija} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (4)$$

$$\text{naprezanje} \quad \sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (5)$$

$$\text{radnja sloma} \quad R = \int_{l_0}^l F dl, \quad (6)$$

ili specifična radnja $r = \frac{R}{V_0}$ (7)

gdje je Δl promjena duljine, F sila, A_0 početna površina poprečnog presjeka, a V_0 početni obujam ispitivanog uzorka.

Ponekad je prikladnije iskazati karakteristike materijala tzv. prirodnom deformacijom

$$\epsilon_n = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}, \quad (8)$$

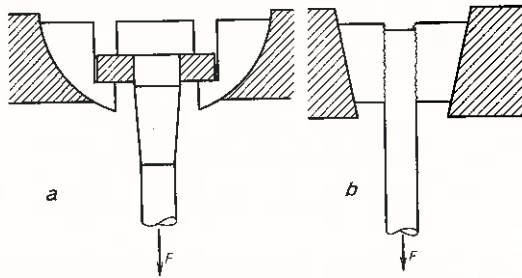
koja se znatnije razlikuje od linearne $\Delta l/l_0$ kad su linearne deformacije veće od 10%. To se pojavljuje za veće trajne ili elastične deformacije čelika ili elastične deformacije gume i sl. Isto tako ima prednosti umjesto $\sigma = F/A_0$ naprezanje izraziti kao omjer sile i stvarne površine poprečnog presjeka u trenutku kada djeluje sila $\sigma_n = F/A$. Nema posebnih razloga da se karakteristike materijala iskazuju naprezanjima (5), umjesto deformacijama (4). To je, međutim, tradicija, a ona se održava i zbog jednostavnijeg uvođenja tih karakteristika u proračune.

U dinamičkim ispitivanjima, opet prema tradiciji, otpornost se iskazuje radnjom (6) ili specifičnom radnjom sloma (7). Razlog je u tome što se donedavno nisu mogle mjeriti sile pri naglim opterećenjima, a radnja se mogla mjeriti. Kako radnja obuhvaća i silu i pomak u času sloma, takvo iskazivanje mehaničkih karakteristika ima prednosti u usporedbi s iskazivanjem istih karakteristika samo silom.

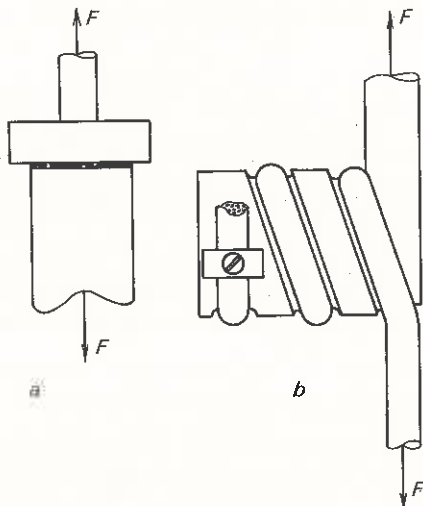
Statička ispitivanja

Homogeno naprezanje najbolje se postiže djelovanjem središnje vlačne sile. Prijenos vlačne sile s kidalice na uzorak može biti hvataljkama ili čeljustima (metali, sintetski materijali) (sl. 13), pužnicima (užad, kabeli) i pločama koje se lijepe smolama na uzorak (sl. 14).

Prema St. Venantovu principu, homogeno naprezanje dobiva se u srednjem dijelu uzorka, jer je u okolici mjesta prijenosa

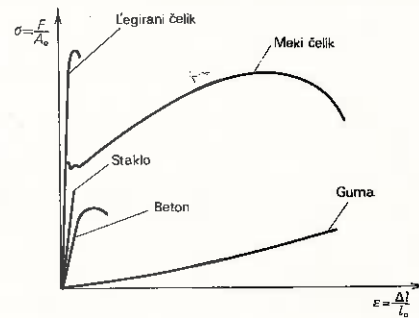


Sl. 13. Prijenos vlačne sile s kidalice na uzorak hvataljkama (a) i čeljustima (b)



Sl. 14. Prijenos vlačne sile s kidalice na uzorak lijepljenjem (a) i užetom (b)

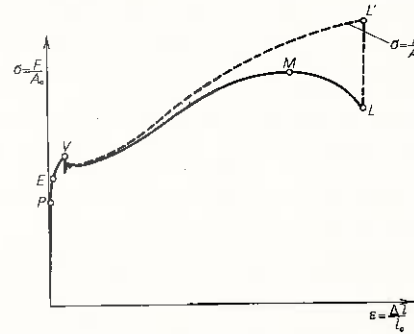
sile homogenost poremećena koncentracijama. Na kidalici je moguće u svakom trenutku utvrditi vrijednost sile, a deformacije, stvarne ili relativne, mogu se mjeriti posebnim instrumentima ili registrirati posebnim uređajem. Obično se na temelju tih podataka sastavlja σ, ϵ dijagram ili radni dijagram. Oblik tih dijagrama ovisi o materijalu (sl. 15).



Sl. 15. Primjeri dijagrama naprezanje (σ), deformacija (ϵ)

Neke karakteristične vrijednosti naprezanja definirane su fizički i tehnički zbog toga što fizička definicija ne omogućuje utvrđivanje tih karakterističnih vrijednosti.

Granica proporcionalnosti (točka P na sl. 16) određena je naprezanjem σ_p do kojeg vrijedi Hookeov zakon ($\sigma = \epsilon E$, gdje je E modul elastičnosti). No, kako ispitivanja pokazuju, postoje skoro uvijek odstupanja od Hookeova zakona. Ta su odstupanja posljedica nesavršenosti materijala i ograničene točnosti mjerenja. Potrebno je stoga poznavati granično naprezanje iznad kojeg se smatra da Hookeov zakon više ne vrijedi. Ona je određena tehničkom definicijom za σ_p , prema kojoj je ta granica određena kad se pojavi odstupanje od linearnog zakona veće od 10%.



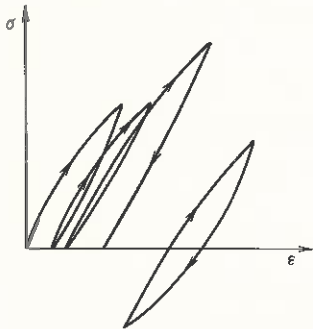
Sl. 16. Karakteristične točke na dijagramu naprezanje (σ), deformacija (ϵ)

Granica elastičnosti (točka E na sl. 16) određena je naprezanjem σ_e iznad kojeg se materijal više ne ponaša elastično. Prema tehničkoj definiciji, to je naprezanje kad se pojavljuju trajne deformacije veće od 0,003%, 0,01% ili 0,03%. Prvi je kriterij najstrožiji i upotrebljava se kad se istražuju svojstva metala, a ostali kriteriji služe kad se istražuju svojstva drugih materijala.

Granica popuštanja ili tečenja (točka V na sl. 16) odgovara naprezanju kad počinje tečenje materijala. Za neke materijale ona se lako zapaža, jer materijal popušta bez povećanja sile (pojava većih trajnih deformacija). Za polikristalinične materijale (metali) ta se pojava popuštanja tumači posmikom kristala kojima su ravnine kalanja nagnute pod kutom $\pi/4$ prema smjeru glavnih naprezanja (najveći posmik). Potpuno se ta posmična deformacija prenosi po čitavom obujmu uzorka (Lüdersove linije koje se pokazuju na poliranoj površini uzorka) nakon čega se pojavljuje tzv. očvršćivanje. Slične su pojave u lančanim vezama polimera, u kojima se te veze preoblikuju ali je fenomenološka pojava tečenja slična onoj polikristaliničnih materijala. Ako granicu tečenja nije moguće odrediti ispitivanjem, ona se tehnički definira kao naprezanje uz koje trajna deformacija iznosi 0,2%. Ta se granica označuje sa $\sigma_{0.2}$.

Čvrstoća materijala (točka M na sl. 16) odgovara naprezanju σ_m koje se pojavljuje kad je sila najveća.

Da se utvrde karakteristična naprezanja, potrebno je uzorke ponovo opterećivati i opterećenja postupno povećavati. Za većinu materijala uz takav režim opterećivanja pojavljuje se petlja histereze (sl. 17) već i za razmjerno mala naprezanja. Površina unutar petlje proporcionalna je energiji koja se troši za trajne deformacije.



Sl. 17. Primjer krivulje histereze u dijagramu naprezanje (σ), deformacija (ϵ)

Naprezanje u trenutku razaranja σ_1 koje odgovara točki L na sl. 16 za neke je materijale (metali, beton, drvo) manje od čvrstoće σ_m . Ta se pojava tumači lokalnim tečenjem materijala koje nastaje nakon prekoračenja čvrstoće materijala σ_m .

Ako se umjesto dijagrama koji odgovara početnoj površini presjeka A_0 nacrtaju dijagram za stvarnu površinu poprečnog presjeka A uzorka na koji djeluje sila, dobije se crtkani dijagram na sl. 16. Uzorak se razara pri najvećem stvarnom naprezanju koje odgovara točki L' , jer je $A_0 > A$.

Karakteristike deformabilnosti dane su modulom deformabilnosti $D = d\sigma/d\epsilon$.

Modul elastičnosti određuje se postupnim opterećivanjem do naprezanja koje obično ne prelazi 1/3 čvrstoće materijala. Iako je modul elastičnosti većine materijala (beton, kamen) promjenljiva veličina, ipak se u području malih naprezanja računa radi jednostavnosti kao s konstantom. Deformacije se mjere mehaničkim, optičkim ili električnim instrumentima, kojima se povećavaju mjerene vrijednosti, već prema mjernoj dužini l_0 i iznosu mjerenih deformacija. Za metale je potrebno povećanje i do 1000 puta, za drvo i sintetske materijale dosta je povećanje do 100 puta, dok za tvrde gume, iverice i slične materijale dovoljno je povećanje za 20...50 puta.

Žilavost materijala. Neobično su važne karakteristike žilavosti ili sposobnosti materijala da se trajno deformira. U tom smislu najpovoljniji su materijali koji se do neke deformacije ponašaju elastično ili čak kao materijali koji slijede Hookeov zakon, a koji se prelaskom te granice trajno deformiraju. To predstavlja sigurnosnu rezervu za nepredvidive okolnosti. U graditeljstvu ima nekih događaja za koje se teško mogu predvidjeti intenziteti opterećenja konstrukcija (potresi, tornadi), i zbog toga se one teško mogu i ispravno dimenzionirati. Zbog toga su materijali s rezervama deformacija vrlo poželjni, ali takvih upotrebljivih u graditeljstvu ima malo.

Relativno istezanje nakon loma iznosi

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0}, \quad (9)$$

gdje je l_1 duljina uzorka nakon loma, l_0 početna duljina. To je prva karakteristika žilavosti.

U trenutku kad na metalni uzorak djeluje najveća vlačna sila, pojavljuje se grlo, tj. lokalno suženje i buduće mjesto loma (sl. 18). Istezanje δ ovisi osim o žilavosti materijala i o odabranoj duljini uzorka l_0 , jer je

$$\delta = \frac{\Delta l_g}{l_0} + \frac{\Delta l_k}{l_0}, \quad (10)$$

gdje je Δl_g stvarna promjena duljine na kojoj se pokazuje grlo s promjenljivom deformacijom, a Δl_k promjena duljine onih dijelova izvan grla gdje je deformacija konstantna. Pokazalo

se da je izgled grla, za isti materijal, uvijek sličan bez obzira na dimenzije štapa koji se rasteže, i da je $\Delta l_g = kd_0$; gdje je k konstanta. Može se, dakle, postaviti

$$\delta = k_1 \frac{d_0}{l_0} + \frac{\Delta l_k}{l_0} = \text{konst.}, \quad (10a)$$

jer su oba člana konstantna, ako je $d_0/l_0 = \text{konst.}$ Obično se ispituju dva tipa metalnih štapova:

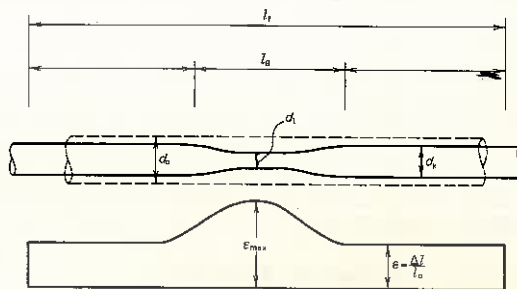
dugi štap

$$l_0 = 10d_0; \quad l_0 = 11,3\sqrt{A_0} \quad (11)$$

kratki štap

$$l_0 = 5d_0; \quad l_0 = 5,65\sqrt{A_0}. \quad (12)$$

Ako se deformacije mjere na uzorcima drugih duljina, treba rezultate mjerenja reducirati, za što postoje eksperimentalni podaci.



Sl. 18. Suženje i deformacija ispitivanog metalnog uzorka kad na njega djeluje najveća vlačna sila

Poprečno suženje ili kontrakcija druga je karakteristika žilavosti i izračunava se iz relacije

$$\varphi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = 1 - \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2. \quad (13)$$

Pomoću te relacije može se odrediti i najveća relativna deformacija, ako se pretpostavi da se obujam u plastičnom stanju ne mijenja

$$A_0 dx = A_1 (1 + \epsilon_{\max}) dx, \quad (14)$$

pa se dobiva

$$\epsilon_{\max} = \frac{\varphi}{1 - \varphi}. \quad (15)$$

Treća je karakteristika žilavosti radnja kidanja, koja se približno određuje tako da se dio dijagrama naprezanje—deformacija (sl. 16) do granice tečenja uzme kao pravokutnik, a iznad granice tečenja kao parabola. Za specifičnu radnju po jedinici obujma dobiva se

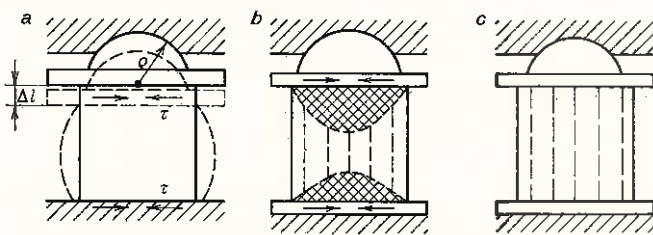
$$a = \frac{R}{A_0 l_0} = \frac{\delta}{3} (\sigma_v + 2\sigma_m). \quad (16)$$

Dakako, da se može odrediti površina u dijagramu sila—promjena duljine, koja je proporcionalna radnji kidanja.

Ispitivanje na tlak. Uzorci materijala za ispitivanje na tlak imaju oblik valjaka, prizama i kocaka različitih dimenzija, koje zavise o čvrstoći materijala i kapacitetu preše za ispitivanje. Što je čvršći materijal i što je kapacitet preše manji, manji je uzorak, tako se npr. lijevano željezo, bronca, kamen, keramika i drugo ispituju valjcima i kockama dimenzija 4...6 cm, a laki betoni kockama 20...30 cm.

Treba spomenuti da pri uobičajenom ispitivanju na tlak raspodjela po duljini uzorka i u poprečnom smjeru nije jednolična, jer se na dodirnim ploham između preše i uzorka pojavljuje trenje koje sprečava širenje uzorka. Zbog toga uzorak dobiva bačvasti oblik, ili nakon drobljenja oblik dvaju stožaca ili piramida (sl. 19). Šrafirani dijelovi (sl. 19 b) predstavljaju tzv. zaštićene zone, u kojima se pojavljuje trosmjerno stanje naprezanja, što sprečava raspadanje uzorka na tim dijelovima. To je

ujedno razlog što rezultati ispitivanja ovise i o obliku uzorka (kocka ili prizma), jer što je veći udio zaštićenih zona u uzorku, to je rezultat ispitivanja povoljniji. Postoje i koeficijenti redukcije kojima se može preračunati čvrstoća uzorka jednog oblika na drugi. Ako se ukloni trenje, npr. podmazivanjem, uzorci se drobe u prizmatičnim oblicima i čvrstoća je manja od one utvrđene na uzorcima s trenjem.



Sl. 19. Pojave pri tlačnom ispitivanju materijala. a) plastični materijal, b) krhki materijal s trenjem, c) krhki materijal bez trenja

Ako je poznata tlačna čvrstoća valjka betona β_v , može se izračunati tlačna čvrstoća kocke betona β_k pomoću relacija:

$$\text{za tlačnu čvrstoću kocke } < 25 \text{ MPa: } \beta_k = 1,25 \beta_v, \quad (17)$$

$$\text{za tlačnu čvrstoću kocke } > 25 \text{ MPa: } \beta_k = 1,20 \beta_v. \quad (18)$$

U tabl. 4 nalaze se koeficijenti za preračunavanje tlačne čvrstoće kocke betona prema duljini brida kocke, a u tabl. 5 koeficijenti za preračunavanje tlačne čvrstoće valjka prema promjeru, osnovici i visini valjka. Kad se provodi tlačno ispitivanje, nastoje se stvoriti takvi uvjeti da se postigne homogeno naprezanje, pa preše obično imaju gornju ploču, preko koje se prenosi sila na uzorak, tako učvršćenu da se položaj ploče može prilagoditi eventualnim nepravilnostima uzorka. Naročito treba paziti da dodirne plohe uzorka i preše budu potpuno ravne. Zahtijeva se npr. da betonske kocke s bridom od 20cm nemaju veće neravnine od 0,05mm. To vrijedi i za ploču preše. Ako su neravnine veće, potrebno je ploču preše prebrusiti, a pobočke uzoraka izravnati na posebnim strojevima za brušenje za brušenje ili plohe premazati posebnim namazom koji mora imati veću čvrstoću od ispitivanog materijala. To može biti sumporni, cementni, sadreni mort i sl.

Tablica 4

KOEFICIJENTI ZA ODREĐIVANJE TLAČNE ČVRSTOĆE BETONSKE KOCKE

| Brid kocke mm | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
|---------------|------|------|------|------|------|
| φ_k | 1,10 | 1,00 | 0,95 | 0,92 | 0,90 |

$\beta_x = \varphi_k \beta_{150}$; β_{150} čvrstoća kocke s bridom od 150 mm

Tablica 5

KOEFICIJENTI ZA ODREĐIVANJE TLAČNE ČVRSTOĆE BETONSKOG VALJKA

| Promjer osnovice/visina valjka mm | 100/200 | 150/300 | 200/400 | 250/500 | 300/600 |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| φ_v | 1,02 | 1,00 | 0,97 | 0,95 | 0,91 |

$\beta_x = \varphi_v \beta_{150/300}$; $\beta_{150/300}$ čvrstoća valjka s promjerom osnovice od 150 mm i visinom od 300 mm.

Posebno treba osigurati središnje djelovanje sile na pobočke uzoraka, jer ekscentričnost e uzrokuje razliku naprezanja na suprotnim točkama poprečnog presjeka koja iznosi

$$\Delta\sigma\% = \pm \frac{e}{K} 100\%, \quad (19)$$

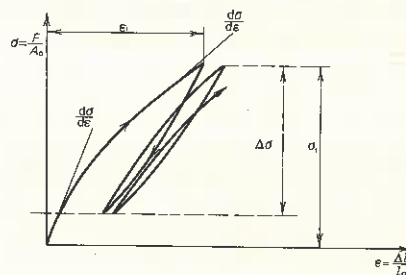
gdje je K udaljenost ruba jezgre (promjera $d/4$) od središta. Tako npr. za valjak $d = 150$ mm i $e = 2$ mm $K = d/8 \approx 19$ mm odnosno $\Delta\sigma\% = \pm 10,6\%$ ili ukupna razlika 21,2%.

Ako se uzme u obzir i heterogenost materijala u uzorku, razumljivo je veliko rasipanje rezultata ispitivanja koje je po-

sljedica postupaka ispitivanja. Za centriranje uzorka u prešu upotrebljavaju se šablone ili slične jednostavne naprave kojima je moguće smjestiti uzorak s točnošću ± 1 mm.

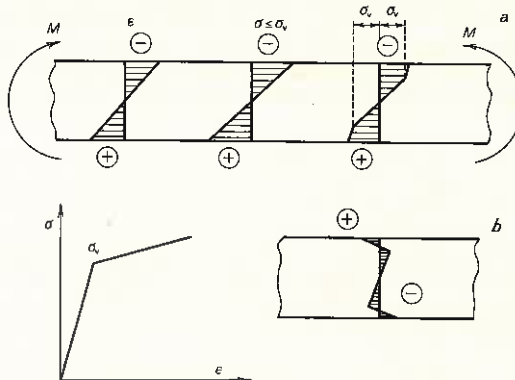
U dijagramu naprezanje — deformacija, koji prikazuje tlačna naprezanja, mogu se prema istim kriterijima utvrditi karakteristične granice, koje su za polikristalinične materijale uglavnom jednake kao za rastezanje. One su, međutim, za druge materijale obično različite. Neke tvari u plastičnom stanju nije niti moguće potpuno zdrobiti. Zbog tlaka povećavaju se poprečne dimenzije, pa se povećava i površina tako da je moguće znatno povećati opterećenja, a da ne dođe do konačnog razaranja uzorka. Kad se ispituju krhki materijali, ne pojavljuje se granica tečenja, pa se ispituje samo čvrstoća, a obično se niti ne mjere trajne deformacije, jer su razmjerno male, a uzorak je i tako potpuno razoren. Ipak je moguće pomoću automatskih uređaja za registraciju pomaka Δl ploče stroja koja tlači uzorak (sl. 19) pratiti odnos između sile i deformacije.

Moduli deformabilnosti, npr. modul elastičnosti, utvrđuju se obično na prizmatičnim uzorcima kojima omjer duljine i širine iznosi 2...3, jer se tek za takve uzorke može računati s približno jednoličnom raspodjelom naprezanja i deformacija uzduž uzorka. Modul može, prema dogovoru, biti tangenti $d\sigma/de$, sekantni σ_1/ϵ_1 ili povratni $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$, gdje je ϵ povratna elastična deformacija. Za mnoge, naročito građevne materijale do stabilizacije deformacija, tj. dok se materijal pri određenom režimu opterećenja ne počne ponašati elastično, potrebno je nekoliko puta ponoviti opterećenje (sl. 20). Ima, međutim, naprezanja iznad kojih se uopće ne pojavljuje stabilizacija.



Sl. 20. Dijagram naprezanje — deformacija za ponovljena opterećenja

Ispitivanje savijanjem. Takvim ispitivanjem utvrđuju se čvrstoća na savijanje ili vlačna čvrstoća savijanja materijala u krhkom stanju. Rjeđe se savijanjem ispituju materijali u elasto-plastičnom ili plastičnom stanju, jer su naprezanja, kad se prekorače elastične deformacije, složena pa se ne mogu primijeniti jednaki kriteriji kao pri rastezanju. Na čisto savijanje (v. *Nauka o čvrstoći*) može se primijeniti Bernoulli-Navierova hipoteza ravnih presjeka i za materijal u plastičnom stanju, ali nakon rasterećenja ostaju i elastično i trajno deformirani dijelovi, drugim riječima, heterogeno stanje deformacije i naprezanja (sl. 21). Tom stanju odgovara i deformacijska linija savinutog štapa (sl. 21a) i neopterećenog štapa nakon savijanja (sl. 21b). Štap se nakon rasterećenja djelomično (elastično) vratio u prvotni



Sl. 21. Naprezanja i deformacije u savinutom (a) i rasterećenom štapa (b)

oblik, ali je djelomično zadržao (trajno) savinut oblik. Koliki udio u zakrivljenosti takvog štapa imaju karakteristike utvrđene rastezanjem, može se utvrditi ispitivanjem, ali je sigurno da za svaki materijal taj udio treba posebno odrediti. Kako se vidi, pri ispitivanju savijanjem gubi se mogućnost primjena jednakih ili sličnih kriterija za granična naprezanja σ_e , σ_v , σ_p i σ_m , koji vrijede za rastezanje. To vrijedi i za ispitivanje torzijom.

Postoje za obje vrste ispitivanja izrazi dobiveni na temelju pokusa kojima je za pojedine vrste materijala moguće s određenom točnošću utvrditi granična naprezanja. Naprezanja se za materijale u krhkom stanju računaju izrazom

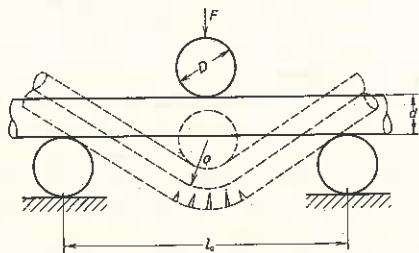
$$\sigma = \frac{M}{I_z} y_0, \quad (20)$$

gdje je M moment savijanja, I_z aksijalni moment tromosti, a y_0 udaljenost od neutralne osi do promatranih vlaknaca. Pri tom se pretpostavlja da je poprečni presjek opterećen u osi simetrije (ne pojavljuje se koso savijanje), da poprečni presjek nije s tankim stijenkama (nema izbočenja) te da je mali udio poprečne sile u glavnim naprezanjima (omjer između raspona i visine presjeka veći je od 5). Savijanje se obično postiže djelovanjem koncentrirane sile u sredini raspona (sl. 9), rjeđe dviju koncentriranih sila simetričnih s obzirom na sredinu raspona ili djelovanjem kontinuiranog opterećenja.

Ispitivanje žilavosti materijala proizvodi se savijanjem štapova kružnih ili pravokutnih presjeka na rasponu l_0 između valjkastih ležaja silom koja se prenosi na sredinu raspona preko trna promjera D . Uzorak se savija do pojave prvih naprslina u zategnutoj zoni, a određuje se iz izraza žilavosti

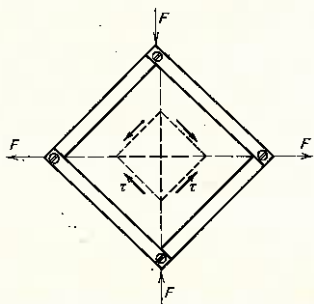
$$K = \frac{d}{\rho} 50\% \quad (21)$$

koji predstavlja relativnu deformaciju najviše zategnutih vlaknaca. U (21) ρ je polumjer zakrivljenosti osi savinutog štapa, a d promjer ili debljina štapa (sl. 22). Kad se ispituje vrlo žilavi materijal, mogu se dvije polovice štapa sklopiti tako da je $K = 100\%$. To je ujedno i najveća deformacija koja se dobiva takvim ispitivanjem.



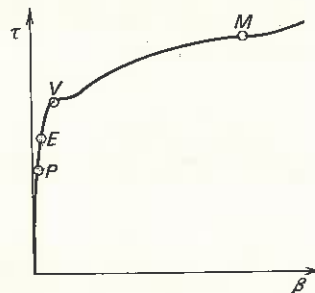
Sl. 22. Ispitivanje žilavosti materijala

Ispitivanje čistim posmikom teško je provesti zbog toga što se čisti posmik dobije pod kutom $\pi/4$ prema smjeru glavnih naprezanja, a to su upravo takva opterećenja za koja nema prikladnih uređaja. Teorijski se takva stanja mogu uspostaviti unutar krutog okvira koji je u uglovima spojen zglobovima, a opterećen silama suprotnih predznaka, a jednakih vrijednosti (sl. 23). Takav uređaj, međutim, nije lako izvesti. Pri čistom se posmiku pojavljuju isti odnosi naprezanja i deformacija kao



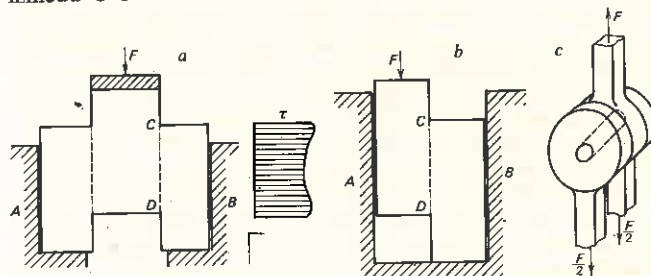
Sl. 23. Uređaj za ispitivanje čistim posmikom

i u dijagramu za rastezanje, a naprezanja su također homogena (sl. 24). Za polikristalinične materijale karakteristična je granica popuštanja koja prema mehanizmu sasvim odgovara ispitivanju rastezanjem.



Sl. 24. Dijagram naprezanje-deformacija za čisti posmik

Češća su ispitivanja odrezom, tj. ispitivanja čistim smicanjem. Tada se pojavljuju posmična naprezanja (sl. 25), koja su nejednolično raspoređena. Uporištima A i B sprečava se razmicanje oslonjenih dijelova radi uspostave što boljeg stanja čistog posmika na liniji CD . Kvalitativna raspodjela posmičnih naprezanja τ prikazana je na sl. 25. Na uzorcima oblika kao na sl. 25a i 25b ispituje se naročito čvrstoća spojnih sredstava, npr. na zavarenim metalnim konstrukcijama ili na drvenim konstrukcijama i sl., i to tako da se spojno sredstvo nalazi na dijelu između C i D .



Sl. 25. Primjeri smještaja uzoraka za ispitivanje odrezom

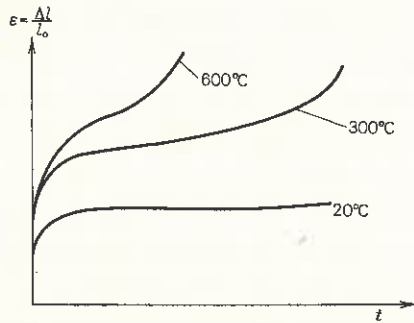
Uzorci kružnog presjeka obično se ispituju na odrez tako da se provuku kroz prikladne otvore (sl. 25c). U svim tim slučajevima raspodjela posmičnih naprezanja nije jednolična i razlike su između najmanjih i najvećih naprezanja to veće što je omjer duljine CD i razmaka AB manji (sl. 25b). Ipak se zbog jednostavnosti proračuna, a i zbog sličnosti sa stvarnim stanjem u konstrukcijama (npr. zakovice), računa s prosječnim naprezanjem $\tau = F/A_0$.

Čisti posmik moguće je ostvariti i djelovanjem torzije na štapove kružnog presjeka. Ako je, međutim, presjek pun, pojavljuju se poteškoće zbog nejednolične raspodjele naprezanja u presjeku — u osi štapa nema naprezanja, a prema rubu naprezanja rastu linearno. Ako štap i nema pun poprečni presjek (cijev), može se uzeti da je u stijenki cijevi posmično naprezanje jednolično raspodijeljeno, pogotovo ako je stijenka cijevi razmjerno tanka; no tada postoji opasnost da se cijev od elasto-plastičnog materijala izboči ako su stijenke suviše tanke.

Ispitivanje dugotrajnim opterećenjem. U statička ispitivanja spadaju i ispitivanja s dugotrajnim opterećenjem kad se mjere sile, deformacije ili oboje. Ima više pojava koje su važne za takva ispitivanja. U prvom redu dugotrajnim opterećenjem stalnom silom mnogi se materijali razaraju pri naprezanju manjem od statičke trenutne čvrstoće. Mjerenja deformacija u takvim ispitivanjima pokazuju da ponašanje materijala ovisi o naprezanju, te da se može razoriti materijal nakon nekog vremena uz stalno povećanje deformacija, ali da se uz manja naprezanja mogu deformacije stabilizirati (sl. 26).

Povećanje deformacije djelovanjem stalnog opterećenja poznato je u tehnologiji materijala kao *puzanje materijala* ili *tečenje*. Ono granično naprezanje uz koje se deformacije stabiliziraju i uz koje se niti nakon neograničeno dugog vremena opterećenja materijal ne razara naziva se *trajnom čvrstoćom*. Ona je manja od trenutne statičke čvrstoće i omjeri tih dviju čvrstoća ovisi

o materijalu. Druga je pojava tzv. *relaksacija*. Ona je karakterizirana održavanjem stalnog oblika deformiranog uzorka. Ono se određuje mjerenjem opterećenja koje se za većinu materijala vremenom smanjuje, ali se obično pojavljuje stabilizacija.



Sl. 26. Promjena deformacije čelika s vremenom

Uređaji za ta ispitivanja su različiti. Za ispitivanja promjene oblika uz stalno opterećenje, obično jednosmjerno, pojavljuje se problem održavanja konstantnog opterećenja. To se postiže sustavom opruga koji s malim promjenama duljine znatnije ne mijenja opterećenje ili hidrauličkim uređajima kojima se mehanički održava stalnost opterećenja (održavanjem tlaka u hidraulički zatvorenom uređaju). Budući da se radi o mjerenjima deformacije kroz duže vrijeme, prednost imaju instrumenti kojima je moguće provjeriti i usporediti promjene oblika ili duljine s početnim stanjem, npr. mehanički komparatori gdje se promjene uspoređuju na invarnom štapu (Berryjev komparator) (v. *Tenzometrija*). Za ispitivanja promjene opterećenja uz održavanje stalnog oblika osnovni su problem uređaji za održavanje oblika, jer bi oni trebali da budu *apsolutno kruti*. Takvih uređaja dakako nema, pa se stalnost oblika ili duljina može održavati jedino pomoću automatske regulacije, koja uvijek ima ograničenu, ali definiranu i poznatu točnost.

Utjecaj temperature. Temperatura materijala koji se ispituje bilo kojim od opisanih postupaka vrlo je važna, pa su često uređaji tako konstruirani da je moguće održavati određenu temperaturu uzorka. Rezultati ispitivanja pokazuju da se svojstva nekih građevnih materijala (bitumen, plastici) znatno mijenjaju s malim povišenjem temperature, svojstva se drugih materijala (metala) manje mijenjaju (sl. 26), a na svojstva nekih materijala temperatura tek neznatno utječe (keramika, beton).

Takva ispitivanja najvažnija su za beton i mortove, jer su pojave puzanja i relaksacije u tim materijalima veće nego u ostalim. Zbog toga se u armiranobetonskim konstrukcijama pojavljuje tzv. *adaptacija sila*.

Dinamička ispitivanja

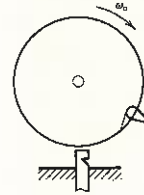
Ispitivanjem jednokratnim trenutnim opterećenjem, udarom, utvrđuje se tzv. *udarna čvrstoća* ili *žilavost materijala*.

Udarna čvrstoća. Ima više postupaka za određivanje udarne čvrstoće, koji se uglavnom mogu svrstati u dvije grupe: one kojima se mjeri energija potrebna za razaranje i one kojima se određuje kritična energija potrebna za razaranje uzorka jednim udarcem.

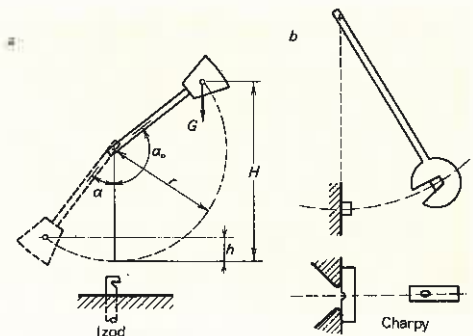
Energija za razaranje. U prvu grupu ispitivanja spadaju ispitivanja pomoću zamašnjaka. Zamašnjak (sl. 27) se okreće poznatom kutnom brzinom ω_0 , pa je tada poznata kinetička energija zamašnjaka $E_K = D\omega_0^2$, gdje je D polarni moment tromosti mase zamašnjaka. Razori li se uzorak, npr. konzolni štapić od ispitivanog materijala, kinetička energija se smanjuje, pa kutna brzina iznosi ω_1 . Smanjenje kinetičke energije koje je praktički jednako energiji potrebnoj za razaranje štapa iznosi

$$\Delta E_K = R = D(\omega_0^2 - \omega_1^2) \tag{22}$$

Slično se određuje energija razaranja, udarna čvrstoća ili žilavost materijala pomoću klatna, od kojih su najpoznatiji Izodov i Charpyjev postupak (sl. 28), koji se razlikuju jedino oblikom uzoraka koji se ispituju i načinom oslanjanja. Početni



Sl. 27. Određivanje udarne čvrstoće zamašnjakom

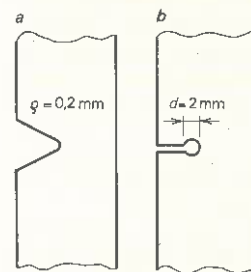


Sl. 28. Određivanje udarne čvrstoće pomoću klatna. a Izodova metoda, b Charpyjeva metoda

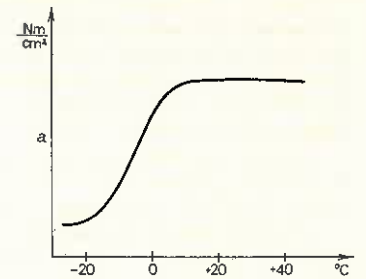
položaj klatna u oba postupka određen je početnom visinom H , a konačni visinom h . Razlika potencijalne energije klatna jest $G(H - h)$, gdje je G težina klatna određena umnoškom mase klatna i ubrzanja Zemljine teže, a jednaka je energiji potrebnoj za razaranje uzorka. Obično se mjere kutovi početnog i krajnjeg položaja klatna, pa je energija za razaranje uzorka

$$\Delta E_p = R = Gr(\cos \alpha - \cos \alpha_0) \tag{23}$$

Ta se energija obično preračunava u tzv. specifičnu energiju po jedinici površine $a = R/A_0$, gdje je A_0 površina presjeka na mjestu prijeloma. Iskustvo pokazuje da se pri takvim naglim opterećenjima materijal ponaša znatno drugačije nego pri statičkim opterećenjima, naročito s obzirom na koncentraciju naprezanja, temperaturu uzorka, te neka temeljna svojstva materijala. Stoga se za takva ispitivanja uzorci zarezuju kako bi se koncentriralo naprezanje i pokazala tzv. *osjetljivost na zarez* koja je ponekad presudna za ponašanje materijala. Ima više prihvaćenih oblika tih zarezova. Izod i Charpy su predložili za obje metode oštre zarezove s polumjerom zakrivljenosti od 0,2 mm pri dnu zarezova (sl. 29a). Takvi zarezovi su napušteni u većini zemalja zbog poteškoća točnosti izradbe i zamijenjeni mnogo jednostavnijim, koji se dobivaju bušenjem rupe i naknadnim prorezivanjem (sl. 29b). Naprezanje je izrazito koncentrirano na rub rupe te se tim postupkom, u stvari, povećava razlika u žilavosti između materijala u krhkom i elastoplastičnom stanju. Utjecaj temperature se posebno ispituje, pa se mjeri specifična energija prijeloma uzoraka na različitim temperaturama, jer se pokazalo da neki metali (visokovrijedni čelici) na temperaturama nižim od ledišta vode imaju znatno smanjenu žilavost (sl. 30).



Sl. 29. Oblici zarezova na uzorku za ispitivanje udarne čvrstoće

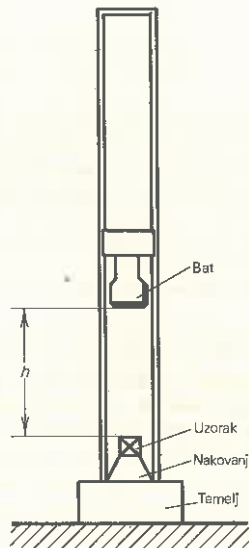


Sl. 30. Primjer utjecaja temperature na specifičnu energiju po jedinici površine pri određivanju udarne čvrstoće

Konstrukcija klatna mora osigurati da klatno udari u središte uzorka kako bi se izbjegle oscilacije i gubitak energije. To je lakše postići Charpyjevim klatnom, i to je jedan od razloga da je za standardna ispitivanja u većini zemalja uveden taj postupak ispitivanja. Kapaciteti takvih uređaja vrlo su različiti i iznose 1...1000 Nm. Kad se ispituju materijali homogenih struktura i u krhkom stanju, mali mogu biti uzorci i kapaciteti klatna, dok su za žilave materijale potrebna klatna većih kapaciteta.

Energija za razaranje jednim udarcem. Drugom vrstom postupka određuje se kritična energija za razaranje uzorka jednim

udarcem, ali tada je potrebno mnogo uzoraka heterogenog materijala da bi se s potrebnom sigurnošću utvrdio taj podatak. Među tim postupcima najvažniji je Föpplov bat, koji se sastoji od vodilica i utega koji slobodno pada s poznate visine i udara uzorak postavljen na masivni čelični nakovanj. Tada se određuje kritična visina s koje treba ispustiti uteg da jednim udarom razori uzorak, jer se pretpostavlja da mehaničke karakteristike uzorka nisu izmijenjene prethodnim udarcima. Ta se vrsta ispitivanja rijetko upotrebljava, jer je potrebno pripremiti više uzoraka, i jer radnja bata koji pada na uzorak nije potpuno definirana. Dio se radnje, naime, troši na oscilacije nakovnja, temelja i bata (sl. 31).



Sl. 31. Föpplov bat

Danas se sve više upotrebljava modificirani Föpplov način ispitivanja. Tada se udarci ponavljaju na istom uzorku, ali se visina utega postupno povećava. Ukupna energija potrebna za razaranje uzorka iznosi

$$R = G \Delta h \frac{n(n+1)}{2}, \quad (24)$$

gdje je: G težina utega, Δh prirast visine za svako novo spuštanje utega, a n broj udaraca potrebnih za razaranje uzorka.

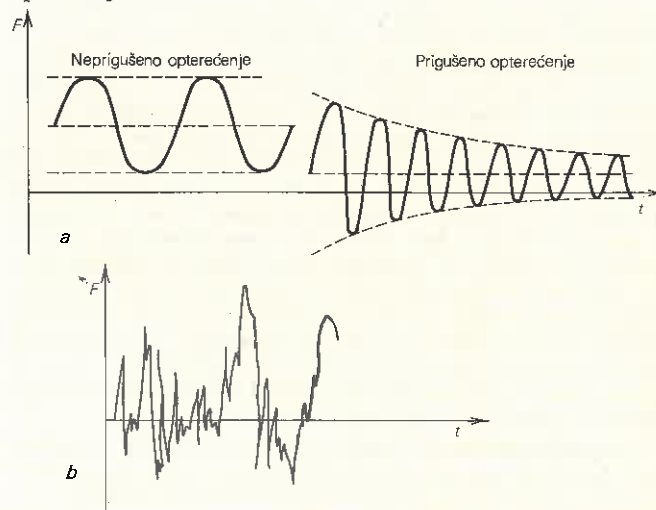
Sigurno se mehanička svojstva ispitivanog materijala pri ponovljenom udaranju mijenjaju, no podatak o ukupnoj energiji, potrebnoj za razaranje, ipak je mjerilo žilavosti materijala. U određenoj mjeri i prilike pri takvom ispitivanju slične su onima u praksi, pa se to svojstvo može svrstati prije među tehnološka nego među dinamička svojstva.

Energija potrebna za razaranje uzorka obično se preračunava na jedinicu obujma. To je tzv. specifična radnja Nm/m^3 , odnosno N/m^2 , što dimenzijski odgovara naprezanju.

U drugu grupu dinamičkih ispitivanja spadaju postupci u kojima se opterećenja mnogo puta ponavljaju. Promjene opterećenja obično su vrlo brze da se skрати vrijeme ispitivanja. Pokazalo se, naime, da brzina promjene opterećenja ne utječe na rezultate ispitivanja, ako je naprezanje uzorka manje od granične elastičnosti materijala. Ustanovilo se ipak da se nakon mnogo ponovljenih opterećenja tada razara materijal. Ta je pojava u tehnici poznata kao *umornost materijala*. To je pojava gdje se materijal pri mnogo puta ponovljenom opterećenju razara pri naprezanju manjem od statičke čvrstoće materijala σ_m . To naprezanje, ovisno o režimu opterećenja, iznosi $(0,6 \dots 0,9)\sigma_m$. S naprezanjem manjim od toga kritičnog naprezanja materijal se može neograničeno mnogo puta opterećivati, a da ne dođe do razaranja. Takvo granično naprezanje naziva se *granicom umornosti*.

Ispitivanje ponovljenim opterećenjima. U svim tehničkim granama ima konstrukcija ili njihovih dijelova koji se opterećuju ponovljenim harmonijskim opterećenjem, npr. osovina za prije-

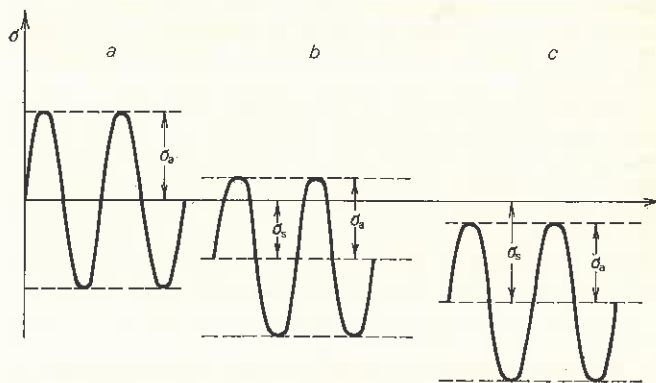
nos snage pomoću remenica ili rezonantno titranje odašiljačkog antenskog stupa, s prigušenjem ili bez njega (sl. 32a), ali i takvih koje su izvrnute slučajnim (stohastičkim) promjenama opterećenja (udarci kugala u mlinu ili čekića u drobilicama) (sl. 32b). Kako stohastičke promjene nisu unaprijed poznate, a uređaji za simulaciju takvih promjena opterećenja vrlo su složeni i skupi, obično se materijali ispituju harmonijskim promjenama opterećenja koje nije teško proizvesti. Te se promjene opterećenja postižu električnom regulacijom i električnim pogonom. Takvi su strojevi predviđeni pretežno za jednoosna opterećenja, obično uzdužnom silom, i za razliku od strojeva za opterećivanje statičkim silama istog predznaka (vlačnim ili tlačnim) moraju imati uređaj za prihvaćanje uzorka na koji se prenose sile obaju predznaka. Frekvencija promjene opterećenja rijetko je kada veća od 5 Hz za uređaje s hidrauličkim pogonom, dok je znatno veća 100...200 Hz kad se upotrebljavaju elektronički upravljani strojevi, tzv. visokofrekventni pulzatori. U takvim strojevima čitav se sustav — štap u ispitivanju, okvir stroja, dodatna masa — održava u rezonantnom titranju uz regulaciju amplitude opterećenja.

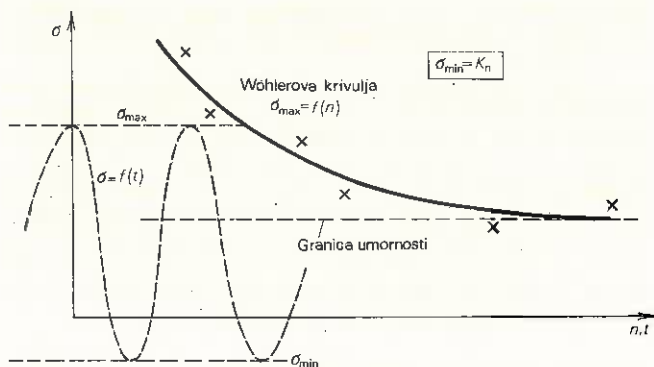


Sl. 32. Promjenljivo opterećenje. a harmonijska promjena, b slučajna (stohastička) promjena opterećenja

Ima uređaja predviđenih samo za tlak s prešama na hidraulički pogon kojim se mogu veći uzorci ispitivati na savijanje. Njihova je frekvencija promjena opterećenja manja i iznosi ~ 1 Hz, ali su zato opterećenja mnogo veća (do 1 MN).

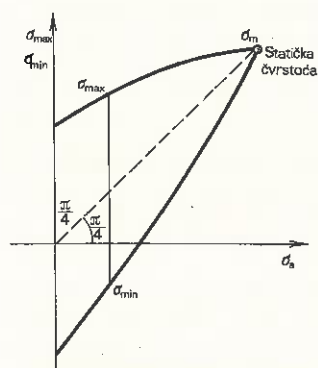
Režimi opterećenja su obično opisani dvjema veličinama: prosječnim opterećenjem σ_s i njegovom amplitudom σ_a ili najvećim σ_{\max} i najmanjim opterećenjem σ_{\min} . Razlikuju se simetrični i nesimetrični režimi opterećenja. Za simetrična opterećenja uvijek je $\sigma_s = 0$, dok σ_a može imati različite vrijednosti. Za nesimetrična opterećenja uvijek je $\sigma_s \neq 0$. Kad je $|\sigma_a| < |\sigma_s|$, to je režim jednoznačnih, a kad je $|\sigma_a| \geq |\sigma_s|$, to je režim izmjeničnih opterećenja (sl. 33).

Sl. 33. Simetrični i nesimetrični režim opterećenja. a simetrični režim ($\sigma_s = 0$), b nesimetrični režim kad je $|\sigma_a| > |\sigma_s|$ ($\sigma_s \neq 0$), c nesimetrični režim kad je $|\sigma_a| < |\sigma_s|$ ($\sigma_s \neq 0$)



Sl. 34. Određivanje granice umornosti materijala

Kako su konstrukcije i njihovi dijelovi najčešće izloženi vrlo promjenljivim opterećenjima (npr. djelovanje vjetera različitog smjera na antenski odašiljački toranj), treba obično ispitati ponašanje materijala pri različitim režimima opterećenja. Tada se registrira broj promjena opterećenja uz koji se za poznati σ_{max} i σ_{min} materijal razara. Na temelju ispitivanja crta se Wöhlerov dijagram (sl. 34) u kojem se za jednako naprezanje σ_{min} i povolji odabrano naprezanje σ_{max} na apscisnu os nanosi broj promjena nakon kojeg je uzorak razoren. Pokazuje se za većinu materijala da vrijednosti σ_{max} leže na krivulji koja ima asimptotu paralelnu s apscisnom osi. Ta je asimptota granica umornosti za promatranu vrijednost σ_{min} . Granica umornosti je ono naprezanje (σ_{max}) koje se može mijenjati između σ_{max} i σ_{min} , a da se niti nakon neograničenog broja promjena materijal ne razara. Na uzorcima od istog materijala i uz iste prilike ispitivanje se ponavlja sa drugim σ_{min} itd. Granice umornosti za različite σ_{min} unose se u tzv. Smithov dijagram (sl. 35), u kojem se na ordinate nanose $n\sigma_{min}$ i odgovarajuće granice umornosti ($n\sigma_{max}$), a raspolovnica prvog kvadranta predstavlja prosječno naprezanje σ_s . Naprezanje σ_m u tom dijagramu predstavlja statičku čvrstoću.



Sl. 35. Smithov dijagram za prikaz rezultata ispitivanja granice umornosti. σ_m statička čvrstoća

Neki materijali (metali, sintetični) ispituju se pri simetričnom režimu opterećenja na razmjerno jednostavnom uređaju, koji se sastoji od elektromotora, brojača okretaja i prekidača kojim se motor zaustavlja kad se uzorak slomi. Uzorak u obliku štapa kružnog presjeka konzolno je učvršćen u smjeru osi rotora motora, a na kraju opterećen. Okretanjem štapa vlakanca na njegovu plaštu naizmjenično su napregnuta sa $\pm\sigma_a$ uz prosječno opterećenje $\sigma_s = 0$. Kako asinhroni motori imaju brzinu vrtnje 900 ili 1450 min^{-1} , ispitivanja se završavaju razmjerno brzo, ali se takvim uređajem može ostvariti samo simetrični režim opterećenja, iako su se nastojali dodatnim polugama omogućiti i drugi režimi, ali su naponi ostali bez znatnijeg uspjeha.

Umornost materijala je kao pojava neugodnija u dijelovima konstrukcija od elastoplastičnih materijala, jer se pojavljuju nenadani lomovi tih dijelova, a bez prethodne pojave većih trajnih deformacija uz statička jednokratna opterećenja. Zbog toga su pojave umornosti materijala poznate uglavnom za metale i materijale koji se upotrebljavaju u strojarstvu, brodogradnji, zrakoplovstvu itd. Iako režimi promjene opterećenja u graditeljstvu nisu toliko oštri kao u ostalim granama tehnike, ipak

se u posljednje vrijeme proučava umornost i građevnih materijala, naročito betona.

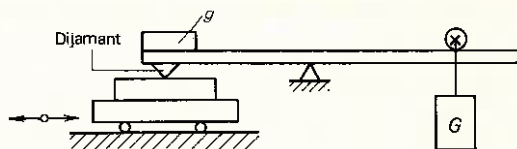
Ispitivanje umornosti materijala. Kako je ispitivanje umornosti materijala, kad se želi dobiti cjelovita slika o nekom materijalu u svim režimima opterećenja, dugotrajno i skupo, u novije vrijeme nastoji se posebnim režimima opterećenja u kojima se u istom ciklusu ispitivanja mijenja amplituda opterećenja, brže doći do rezultata. Time se broj uzoraka smanjuje od 20-30 na manje od polovice. Za pojedine materijale potrebno je, međutim, unaprijed poznati vezu između takvih režima i normalnih režima opterećenja s konstantnim maksimalnim i minimalnim naprezanjem.

Tvrdoća materijala jedno je od važnih mehaničkih svojstava. Postoji više postupaka za ispitivanje tvrdoće koji se međusobno razlikuju, a sadrže statičke i dinamičke elemente, zbog čega je teško ocijeniti da li se radi o statičkom ili dinamičkom ispitivanju. Pojedini postupci ne mogu se primijeniti na sve materijale, tako da nema univerzalnog postupka. Zajedničko je, međutim, svim postupcima da su oštećenja na ispitivanom materijalu neznatna, često se ne mogu niti vidjeti prostim okom, i mehaničke se karakteristike materijala uopće ne mijenjaju ili se vrlo malo mijenjaju nakon takvih ispitivanja. Zbog toga se takva ispitivanja svrstavaju u bezrazorna ispitivanja. Fizička je definicija tvrdoće: *otpornost materijala protiv prodiranja u njegovu sredinu*. No, pokazalo se da nije jednostavno za sve materijale naći općeniti postupak u skladu s tom definicijom. Zbog toga su se održala uglavnom tri postupka: paranje, utiskivanje i odskok. Neki od tih postupaka, npr. paranje, ima karakteristike tehnološkog ispitivanja i rezultati mjerenja iskazuju se nekim empirijskim vrijednostima. Neki drugi, kao npr. postupci utiskivanjem, imaju karakteristike određivanja osnovnih mehaničkih veličina i rezultati se izražavaju naprezanjem.

Postupak paranjem poznat je u mineralogiji, gdje je prihvaćena najprije *Mohsova skala* sa 10 stupnjeva tvrdoće: milovka, kamena sol, kalcit, fluorit, apatit, ortoklas, kvarc, topaz, korund i dijamant.

Nepoznata tvrdoća nekog minerala određuje se tako da se mineralima iz Mohsove skale para po površini ispitivanog minerala i utvrđuje koji od dva susjedna minerala u Mohsovoj ljestvici para i drugi koji ne para ispitivani mineral. Tako se tvrdoća ispitivanog minerala interpolira u Mohsovu ljestvicu. Kasnije je Mohsova ljestvica proširena na 15 minerala, čime je povećana točnost utvrđivanja tvrdoće. Danas se taj postupak upotrebljava jedino u mineralogiji.

Martensov postupak je suvremeniji, i to je još uvijek jedini postupak kojim se tvrdoća određuje kvantitativno — paranjem tehničkih materijala u izrazito krhkom stanju. Izglučana površina materijala para se dijamantnim stošcem s vršnim kutom od $\pi/2$. Tako je konstruiran i aparat (sl. 36) s postoljem na koje se učvrsti uzorak i koje se može pomicati nekoliko milimetara u smjeru poluge s učvršćenim dijamantnim stošcem.



Sl. 36. Uređaj za ispitivanje tvrdoće Martensovim postupkom

Jednostavnim premještanjem pomičnog utega G mijenja se tlačna sila. Tvrdoća prema Martensu definirana je silom koja djeluje i daje zarez širine 0,01 mm. Širina zarez se mjeri mikroskopom. Nekim materijalima teško je ocijeniti širinu zarez, jer su rubovi nepravilni zbog drobljenja materijala.

Postupak utiskivanjem. Hertz je pomoću izraza koje je izveo za naprezanja na dodirnim plohama tijela različitih geometrijskih oblika pokušao definirati tvrdoću materijala kao što se običnim rastezanjem određuju granica proporcionalnosti, granica elastičnosti i granica popuštanja. Njegovim se postupkom utvrđuje početak trajnih deformacija na uzorku materijala koji se ispituje. Uzorak je pod tlakom u dodiru s utiskivačem koji se samo elastično deformira. Kako su naprezanja na mjestu dodira po-

znata, teorijski je moguće utvrditi ono naprezanje u kojem se počinju pojavljivati trajne deformacije. Poteškoće se, međutim, pojavljuju pri definiranju trajne deformacije na mjestu dodira, jer su površine dodirnih ploha male, a trajne deformacije teško mjerljive i uz pomoć posebnih instrumenata. Taj postupak načelno je moguće primijeniti samo na elastoplastične materijale s izraženom granicom popuštanja. Zbog navedenih poteškoća taj je postupak napušten, ali na njegovu temelju razrađeni su vrlo praktični postupci koji su se održali do danas, a pomoću kojih je moguće dosta jednostavno kvantitativno odrediti tvrdoću materijala.

To su postupci određivanja tvrdoće utiskivanjem. U svim takvim postupcima sila tlaka ima određenu vrijednost, a mjeri se trajno deformirana površina koju je ostavio utiskivač preko kojeg je djelovala sila na uzorak.

U *Brinellovu postupku* utiskivač je kuglica promjera 2,2, 5 ili 10 mm, a sila se bira prema predviđenoj tvrdoći materijala. Sila se određuje iz formula: $300D^2$ za tvrdi, $100D^2$ za srednje tvrdi i $50D^2$ za meki materijal, gdje je D promjer kuglice u mm. Trajanje povećanja sila do konačne vrijednosti iznosi 15s, a njeno djelovanje traje 30s da se omogući uspostava ravnoteže između utiskivača i plastično deformiranog uzorka. Promjer kuglice ovisi o debljini uzorka prema tablici:

| promjer kuglice | debljina uzorka |
|-----------------|-----------------|
| 2,5 mm | < 3 mm |
| 5 mm | 3...6 mm |
| 10 mm | > 6 mm |

ili se propisuje najveća dubina utiskivanja h , već prema debljini uzorka t tako da je $h \leq t/8$. Ta su ograničenja potrebna da se na materijalima različitih tvrdoća i na uzorcima različitih debljina dobiju usporedivi rezultati, jer se može dogoditi da je udubljenje kuglice jedva vidljivo ili da kuglica sasvim prođe kroz uzorak. Tada su rezultati nepouzdana.

Tvrdoća prema Brinellu iskazuje se kao naprezanje na površini udubljenja:

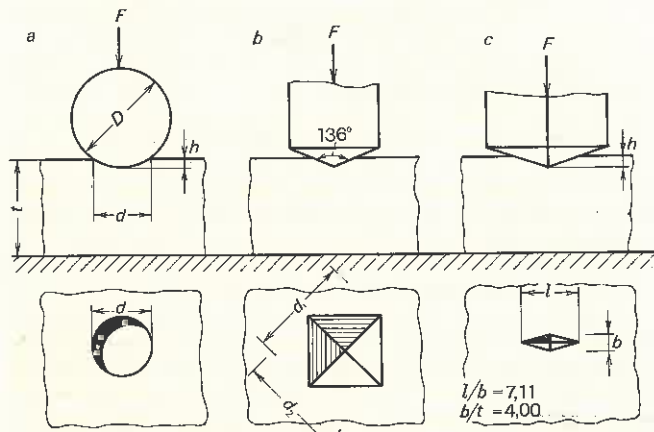
$$HB = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi Dh}, \quad (25)$$

gdje je h dubina udubljenja, a D promjer kuglice (sl. 37a). Dubinu udubljenja h teško je mjeriti. Jednostavnije i znatno se točnije mjeri promjer kalote udubljenja d , pa se tvrdoća prema Brinellu dobiva iz izraza

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (26)$$

Brinellovim postupkom moguće je mjeriti tvrdoću elastoplastičnih materijala do 4500 N/mm^2 , jer tvrdoća čelične kuglice iznosi $6500 \dots 7000 \text{ N/mm}^2$.

Poznato je da je omjer između vlačne čvrstoće čelika i Brinellove tvrdoće skoro stalan: $0,34 \dots 0,36$, tako da se s priličnom sigurnošću može procijeniti čvrstoća čelika, ako je poznata



Sl. 37. Postupci za određivanje tvrdoće utiskivanjem. a Brinellov, b Vickersov, c Knoopov postupak

njegova tvrdoća. Slični omjeri poznati su i za druge metale, pa se prema toj karakteristici ispitivanje tvrdoće ubraja u bezrazorna ispitivanja.

U *Vickersovu postupku* utiskivač je dijamantna četverostrana piramida s vršnim kutom od 136° (sl. 37b). Taj je vršni kut odabran prema Brinellovoj kuglici, koja ostavlja udubljenje promjera $d = 0,375D$, gdje je D promjer kuglice, a to odgovara prosječnoj vrijednosti donje i gornje granice promjera udubljenja $(0,25 \dots 0,5)D$, unutar kojih su upotrebljivi rezultati prema Brinellovu postupku. Udubljenje piramide daje kvadrat na površini uzorka, ali zbog netočnosti rada, heterogenosti uzorka i sl., više puta je kvadrat iskrivljen pa se mjere obje dijagonale (d_1 i d_2). Vickersova tvrdoća izračunava se iz izraza:

$$HV = \frac{1,854F}{d_1 d_2}. \quad (27)$$

Rezultatima ispitivanja prema Brinellu i Vickersu dobro se podudaraju tvrdoće do 4500 N/mm^2 .

Jedina su ograničenja za Vickersov postupak: dubina udubljenja mora zadovoljavati uvjet $h \leq t/8$, trajanje porasta sila 15s, a trajanje punog opterećenja 30s. Sila nije ograničena, i ona je rijetko veća od 1 kN, ali može biti i vrlo mala, nekoliko desetaka mN.

Iz Vickersova postupka razvilo se *ispitivanje dijamantnim šiljkom* u obliku piramide (Knoopov postupak, sl. 37c) koji radi s vrlo malim opterećenjem, tako da je moguće mjeriti tvrdoću mikroskopskih uzoraka. Taj se postupak uspješno primjenjuje za ispitivanje tzv. *mikrotvrdoće* pojedinih faza materijala složene struktura, kao npr. polikristaliničnih materijala (metali) ili klinkera u industriji građevnih materijala. Površine uzoraka moraju, međutim, biti izglacane. Tvrdoća se izračunava pomoću izraza

$$HK = \frac{12,69F}{l^2}. \quad (28)$$

Vrlo je paktičan *postupak prema Rockwellu*, koji se sastoji od tri faze ispitivanja koje se provode na posebnom uređaju, gdje je moguće pratiti pomake utiskivača pomoću mikroure s podjelom po $2 \mu\text{m}$. Na uređaju je moguće utiskivač operetiti, najprije tzv. predopterećenjem, obično 10 kp ($\sim 100 \text{ N}$). U tom se položaju kazaljka mikroure namjesti na nulu. Zatim se utiskivač opereti punim opterećenjem $G + 10 \text{ kp}$, pa se počeka dok se kazaljka mikroure smiri i zatim opet rastereti na početno opterećenje od 10 kp i tada očita položaj kazaljke na mikrouri. Razlika između početnog položaja kazaljke (nula) i konačnog daje tzv. tvrdoću prema Rockwellu: $HR = K - n$, gdje je n broj dijelova skale od po $2 \mu\text{m}$, a K konstanta koja ovisi o obliku i vrsti utiskivača.

U svim takvim uređajima utiskivač se opterećuje utezima preko sustava poluga. Oni obično imaju hidrauličku kočnicu kojom se regulira brzina opterećivanja, ekran na kojemu se očitava karakteristična geometrijska vrijednost udubljenja ili mikroure za mjerenje dubine prodiranja. Obično su stabilni, ali ih ima i prenosivih, predviđenih za upotrebu na gradilištu. Svi takvi uređaji smatraju se statičkim zbog polaganog porasta opterećenja, pa su i postupci ispitivanja statički.

Tablica 6

ODREĐIVANJE TVRDOĆE ROCKWELLOVIM POSTUPKOM

| Uobičajena oznaka Rockwell | Utiskivač | Opterećenje G kp | Tvrdoća |
|----------------------------|-------------------|------------------|------------|
| A C D | dijamantni stožac | 50 140 90 | 100 - 500t |
| B F G | čelična kuglica | 90 50 140 | 130 - 500t |
| E | čelična kuglica | 90 | 130 - 500t |

t (mm) pomak kazaljke

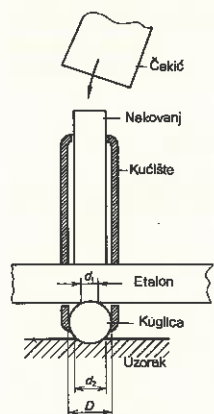
Dinamička ispitivanja tvrdoće mogu se svrstati u dvije grupe: u prvoj se mjeri udubljenje nekog utiskivača, u drugoj odskok neke mase koja padne na površinu uzorka.

Vrlo je paktičan tzv. *Poldi-ispitivač* (prema željezari Poldi-Hütte u Njemačkoj), koji se sastoji od kućišta, etalona, Brinellove kuglice promjera 10mm i nakovnja (sl. 38). Poldi-ispitivač usmjeri se okomito na površinu predmeta kojemu se želi odrediti tvrdoća i čekićem (mase od oko 2kg) udari po nakovnju. Kuglica ostavi udubljenje na etalonu i na ispitivanom predmetu. Iz izraza za tvrdoću prema Brinellu dobije se:

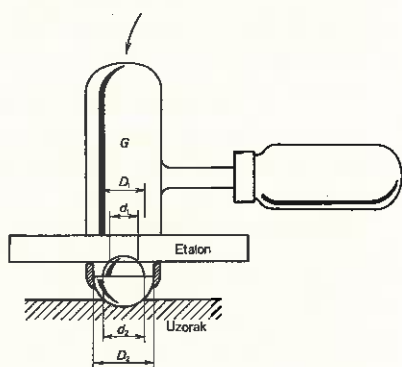
$$\frac{HB_1}{HB_2} = \frac{1 - \sqrt{1 - (d_2/D)^2}}{1 - \sqrt{1 - (d_1/D)^2}} \quad (29)$$

gdje su d_1 i d_2 promjeri udubljenja kuglice na etalonu i na ispitivanom predmetu. Ako je tvrdoća etalona (HB_2) poznata, lako je odrediti tvrdoću uzorka (HB_1).

Izraz (29) vrijedi kad se ispitivanje provodi polaganim povećanjem sile i stoga su potrebne korekcije. Postoje empirijski podaci u tablicama za d_1 i d_2 pomoću kojih se za poznatu tvrdoću etalona može odrediti tvrdoća ispitivanog predmeta. Promjeri udubljenja mnogo se ne razlikuju, ako se ispituje tvrdoća materijala koja je slična tvrdoći etalona.



Sl. 38. Poldi-ispitivač za dinamičko ispitivanje tvrdoće



Sl. 39. Čekić za ispitivanje dinamičke tvrdoće sa dvije polukugle

Tvrdoća materijala koja se mnogo razlikuje od tvrdoće etalona utvrđuje se utiskivačem koji se sastoji od dvije polukugle različitih promjera D_1 i D_2 (sl. 39). Tada je omjer tvrdoća uzorka (HB_1) i etalona (HB_2)

$$\frac{HB_1}{HB_2} = \frac{D_2 - \sqrt{D_2^2 - d_2^2}}{D_1 - \sqrt{D_1^2 - d_1^2}} \quad (30)$$

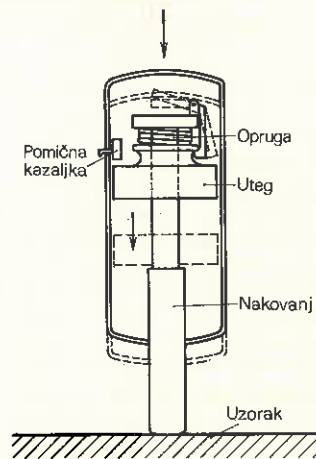
Umjesto da se udara po nakovnju (Poldi-ispitivač) ima naprava u obliku čekića (sl. 39) kojim se udara po površini uzorka.

Drugu grupu čine postupci kojima se tvrdoća ocjenjuje prema visini odskoka neke mase koja udara na površinu uzorka.

Poznat je *Shoreov postupak*. On se temelji na mjerenju visine odskoka čelične kuglice koja je spuštena s određene visine na površinu uzorka.

Za ispitivanje građevnih materijala više se upotrebljavaju sklerometri za određivanje odskočne tvrdoće. To su naprave u kojima se pomoću pera ubrzava masa koja udara na šipku (nakovanj) prislomjenu na površinu materijala koji se ispituje. Mjeri se odskok nakon elastičnog sruza mase sa šipkom i materijalom. Mjera je tvrdoće visina odskoka, jer ona raste s tvrdoćom materijala. Za razliku od Shoreova postupka, sklerometar se može postaviti u različite položaje, ali uvijek okomito na površinu uzorka koji se ispituje. U Evropi se najviše upotrebljava *Schmidtov sklerometar* (sl. 40). Ima ih više tipova prilagođenih za ispitivanje različitih materijala (za beton, opeku, keramiku, lake betone i sl.). Obično se na temelju usporednih ispitivanja povezuje odskok na sklerometru sa čvrstoćom mate-

rijala, i tako se svojstvo koje se utvrđuje razaranjem (čvrstoća) ocjenjuje bezrazornim postupkom.



Sl. 40. Schmidtov sklerometar

ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA

Obično se pod tim razumiju postupci kojima se utvrđuju neke fizikalne veličine a da se materijal ne oštećuje niti ne razara. Na temelju tih mjerenja ocjenjuju se mehanička svojstva koja se ispituju razaranjem (npr. čvrstoća) ili znatnom promjenom karakteristike materijala (npr. granica popuštanja). Takvi su postupci, općenito, brzi i jeftini, pa je tako moguće prikupiti mnogo podataka o materijalu ugrađenom u konstrukciju. Točnost je tako utvrđenih mehaničkih svojstava, međutim, manja nego kad se ispituje razornim postupcima.

Ispitivanje tvrdoće statičkim i dinamičkim postupcima spada u grupu ispitivanja bez razaranja, jer su oštećenja materijala (udubljenja na površini uzoraka) neznatna, a za većinu materijala može se odrediti veza između tvrdoće i čvrstoće materijala. Za neke (metali) ona je poznata, a za neke druge obično se ona utvrđuje ispitivanjem više uzoraka. Tako se npr. određuje Schmidtovim sklerometrom odskočna tvrdoća betona i istodobno čvrstoća kocaka s bridom od 20cm. Pomoću više takvih mjerenja može se ocijeniti točnost te veze, te je iskoristiti za ocjenu čvrstoće betona. Obično se na površini betona od 30...50cm² koja je izravnata obavi 9 mjerenja odskočne tvrdoće, izračuna sredina i iz poznate veze odredi čvrstoća. Za takvo određivanje čvrstoće rasipanje rezultata jest veliko i iznosi do ±30%; zato taj postupak nije prihvaćen za konačnu ocjenu kvalitete betona, već služi da se dobije slika o čvrstoći betona na više mjesta na konstrukciji, i zatim drugim postupcima, npr. vađenjem uzoraka betona iz konstrukcije, provjerava točnost sklerometrijskih mjerenja.

U nekim zemljama služe se drugim postupcima ispitivanja tvrdoće građevnih materijala, npr. pomoću kuglice i etalona za određivanje čvrstoće betona, jer se tako mogu utvrditi veze između tvrdoće i čvrstoće.

Pokušava se, nadalje, da se na temelju promjera kratera na površini betona odredi njegova čvrstoća. Taj se krater dobiva metkom ispaljenim iz pištolja s određene udaljenosti.

Ima postupaka (Ericson) kojima se mjeri sila potrebna da se istrgne dio s površine betona. Tada se sintetskim smolama naljepi na površinu betona metalna pločica koja se prihvati dinamometrom i mjeri sila trganja. I opet treba najprije utvrditi vezu između poznate čvrstoće betona i sile trganja, i tu vezu iskoristiti za određivanje čvrstoće istih vrsta betona.

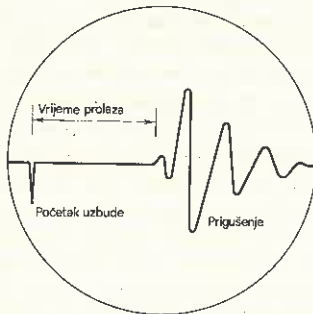
Akustički postupci. Veliku grupu bezrazornih ispitivanja čine *akustički postupci*. Poznato je, naime, da se u elastičnim materijalima zvuk širi određenom brzinom, koja npr. u zraku iznosi 330ms⁻¹, a u čvrstim elastičnim tijelima 1,5...5km s⁻¹. U štapu od materijala modula elastičnosti E i gustoće ρ teorijski brzina iznosi

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (31)$$

dok je brzina širenja u neograničenoj elastičnoj sredini

$$v = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (32)$$

gdje je ν Poissonov koeficijent. Za neke građevne materijale poznata je veza između modula elastičnosti i čvrstoće (npr. betona). Uz poznati ρ i poznati ν , mjerenjem brzine zvuka v može se odrediti modul elastičnosti, a zatim i čvrstoća. Za takva mjerenja služe posebni elektronički uređaji koji se sastoje od dvije sonde, uzbudivača i prijmnika oscilacija, te uređaja za mjerenje vremena i obično osciloskopa na kojemu je moguće promatrati sliku primljenog zvučnog vala. Sonde se prislone na ispitivani komad na poznatom razmaku te se mjeri vrijeme prolaza ultrazvučnih oscilacija od uzbudivača do prijmnika. Frekvencija tih oscilacija iznosi 50...120 kHz, a odabrana je tako da utrošak energije bude što manji, da disipacija zbog heterogenosti betona bude u prihvatljivim granicama te da točnost mjerenja vremena (μ s) širenja ultrazvuka bude što veća. Pokazalo se, naime, da je uz te frekvencije oscilacijama obuhvaćen razmjerno mali dio obujma tijela, te da se oscilacije šire kao uski snop koji je to uži što je frekvencija viša. Današnji uređaji mogu mjeriti vrijeme od 0,2 μ s, a najveće su udaljenosti sonda do 8 m. Duljina vala iznosi 3...6 cm i ona mora biti veća od najvećih zrna agregata u betonu, ako se žele na slici vala na osciloskopu izbjeći nepravilnosti zbog heterogenosti sastava betona.



Sl. 41. Primjer primljenih oscilacija zvučnih valova

Ima dvije vrste uređaja za ispitivanje ultrazvukom: s neprekidnom uzbudom i s impulsnom uzbudom. Kratki ultrazvučni impulsi šalju se u vremenskim razmacima od 1/20, 1/10 ili 1/5 s. Na osciloskopu može se registrirati i prigušenje (sl. 41), čime se dobiva podatak više o ispitivanom materijalu. Iako ti uređaji nisu konstruirani da se mogu otkriti defekti u građevnim materijalima na temelju slike odraza, kao što je to moguće u materijalima koji se upotrebljavaju u strojarstvu, postoje ipak postupci kojima se mogu, npr., utvrditi površinske pukotine, gnijezda u betonu i sl.

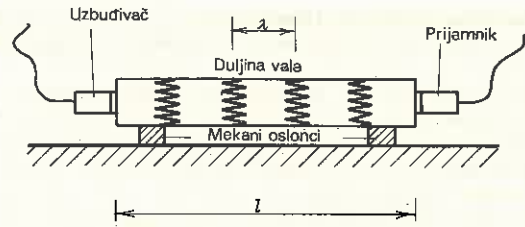
Ispitivanje rezonantnim titranjem. Takvim ispitivanjem uzorka pravilnog geometrijskog oblika, obično prizmatičnog, moguće je također odrediti modul elastičnosti. Može se pokazati da se rezonantno titranje prizme (sl. 42) pojavljuje kad je vrijeme između pojedinih impulsa uzbudivača jednako vremenu koje je potrebno da val impulsa prođe čitavom prizmom i da se vrati na mjesto uzbude. To vrijeme iznosi

$$T = \frac{2l}{v} = 2l \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (33)$$

Budući da je frekvencija $f = 1/T$, dobiva se za modul elastičnosti

$$E = 4l^2 f^2 \rho \quad (34)$$

Rezonantna frekvencija f određena je najvećom amplitudom vala primljenog na drugom kraju prizme (stojni val). Slično se može dovesti u rezonantno titranje bilo kakav elastičan sustav, pa se taj postupak primjenjuje i za određivanje krutosti čitavog sustava za vrijeme savijanja, torzije i izvijanja, i sl.



Sl. 42. Ispitivanje rezonantnim titranjem za određivanje modula elastičnosti

Uz osjetljive prijmnike nije potrebna velika energija da se uzbudi i konstrukcija većih dimenzija.

Ispitivanje zračenjem. Rendgenskim i gama-zračenjem može se utvrditi homogenost i gustoća materijala.

Homogenost, prisutnost stranih tvari, šupljine i drugo mogu se odrediti iz snimke na filmu koji se postavlja na drugoj strani prozračenog tijela. Tako je moguće prozračiti do 150 mm debeli čelik ili do 40 cm debeli sloj betona. Za takva ispitivanja potrebni su snažni rendgenski uređaji i do 150 kV ili snažni izvori gama-zraka kao što je ^{60}Co , ^{137}Cs i sl.

Prozračivanjem gama-zrakama može se utvrditi gustoća prozračenog materijala mjereći apsorpciju zračenja Geiger-Müllerovim brojačem ili scintilacijskim brojačem. Za takva mjerenja i fotografiranje potrebno je da budu pristupačne dvije plohe prozračenog tijela.

TEHNOLOŠKA ISPITIVANJA

Takvih ispitivanja ima mnogo u svim područjima tehnike, a opisat će se samo neka najvažnija koja se upotrebljavaju za ispitivanje građevnih materijala.

Otpornost prema trošenju (habanju) trenjem dvaju materijala ispituje se pomoću čelične ploče koja rotira i na koju je pritisnuta kocka betona, kamena ili drugog materijala silom obično od 300 N. Na ploču ispod kocke posipa se šmirak (prije nakсос, danas silicij-karbid) određene granulacije. Nakon svaka 22 okretaja ploče mijenja se šmirak i dodaje novih 20 g šmirka. To se ponavlja 20 puta (ukupno 440 okretanja). Obično se bruse 3 plohe kocke, ako se materijal smatra izotropnim, ili se brusi samo ona ploha koja će biti izložena habanju. Trošenje se određuje vaganjem uzorka prije i nakon ispitivanja, te se iz razlike težina određuje istrošeni obujam. To je mjera trošenja. Obično se tako ispituju kocke s bridovima od 7,07 cm, zato da površina plohe iznosi 50 cm². Tako se ispituju i drugi građevni materijali.

Otpor ivica ispituje se na kockama s bridom od 5 cm, i to u tzv. valovitom čeličnom bubnju (sa 5 valova u radijalnom smjeru) ili u Devalovom bubnju s kosom osovinom, ali bez valova. Obično se ispituje 5 kocka koje se zatvore u bubanj koji se okreće određenom brzinom vrtnje i ondje ostaju obično 1 sat. Mjeri se gubitak težine i kao rezultat iskazuje se postotak gubitka prema početnoj težini. Kocke moraju biti suhe.

Erozija materijala ispituje se vodenim ili zračnim mlazom pod tlakom u koji se dodaje oštri pijesak. Mlaz se usmjerava okomito na površinu uzorka i kroz određeno vrijeme. Mjeri se dubina odnesenog sloja ili gubitak težine i promjer erodirane plohe, pa se iz tih podataka, poznavajući gustoću, izračunava debljina sloja.

Ispitivanje djelovanja kavitacije. Slično se ispituje i djelovanje kavitacije na građevne materijale. U posebnim kanalima moguće je uz određene brzine vode postići pulzaciju vode zbog koje se sloj vode odljepljuje od površine uzorka i uzrokuje razaranje površine zbog pojave kavitacije. Građevni materijali ispituju se u kanalima za kavitaciju u brogarskim laboratorijima.

Otpornost prema smrzavanju ispituje se na uzorcima koji mogu imati različite oblike: betonske kocke s bridom od 15...20 cm, kamene kocke s bridom 4...6 cm, a koji put to mogu biti prizme ili valjci. Kako je proces raspadanja materijala zbog smrzavanja ovisan o količini vode koju je materijal upio, potrebno je prije ispitivanja zasiti uzorke vodom do stalnosti

težine. U takvom stanju uzorci se ohlade na temperature $-15 \dots -30^\circ\text{C}$ (obično -20°C) u posebnim hladionicima i tamo ostave obično 4 sata. Nakon toga se stave u vodu da se otmrnu. Taj se postupak ponavlja nekoliko puta (već prema klimatskim prilikama). U nas je uobičajeno 20-kratno smrzavanje, dok se npr. u SSSR smrzava i više od 100 puta. Mjera otpornosti prema smrzavanju je također različita. Često se vizuelnim pregledom utvrđuju oštećenja (naprsline, otpadanje pojedinih dijelova, naročito ivica i rubova). Gubitak težine je također dobar podatak, ali se najčešće uspoređuju čvrstoće smrzavanih i nismrzavanih uzoraka. Smatra se da je materijal otporan prema smrzavanju ako smanjenje čvrstoće nije veće od 25%. U novije vrijeme tokom smrzavanja prati se ultrazvukom promjena modula elastičnosti na duguljastim uzorcima. Tada se može utvrditi naglo smanjenje modula, kao posljedica raspadanja strukture uzorka. To je ispitivanje dugo (jedno smrzavanje u radnom danu) pa se nastoje pronaći drugi postupci. Neki su od njih bezrazorni, a neki razorni.

Proces je smrzavanja površinski proces, koji sa sniženjem temperature napreduje od površine prema unutrašnjosti tijela. Najprije se stvori ledeni omotač na površini, a voda je zatvorena u šupljinama u unutrašnjosti tijela. Ako u tijelu ima dovoljno šupljina koje nisu ispunjene vodom, voda će se moći proširiti prijelazom u led, jer led ima oko 9% veći obujam od vode. Tada materijal neće biti oštećen. S tog stanovišta otpornost prema smrzavanju može se procijeniti tzv. Hirschwaldovim koeficijentom koji je omjer između prividne i apsolutne šupljikavosti. Uzima se da je materijal otporan ako je taj koeficijent manji od 0,85, tj. kad se u unutrašnjosti nalazi 15% šupljina neispunjenih vodom.

Novija su ispitivanja, međutim, pokazala da ta granična vrijednost ne vrijedi za sve materijale, već ona iznosi 0,75...0,95, i preporuča se da se za svaki materijal posebno utvrdi ta granica pokusom potpunog smrzavanja. Razlike u rezultatima nastaju zbog različitog određivanja prividne šupljikavosti na atmosferskom tlaku i apsolutne šupljikavosti kuhanjem u vodi, u vakuumu eksikatora, pod tlakom u autoklavu itd. Praksa je pokazala da su obično materijali koji upijaju manje od 0,5% vode postojani na temperaturi smrzavanja. Čvrstoća materijala nema gotovo nikakva utjecaja na otpornost materijala prema smrzavanju.

Od razornih, kratkotrajnih, ispitivanja upotrebljava se *Brardov postupak*. Uzorak se kuha, oko pola sata, u vodenom otopini natrij-sulfata, zasiti otopinom, u njoj se ohladi, zatim se izvadi i ostavi stajati neko vrijeme. Zatim se opet stavi u otopinu. Tada se stvaraju kristali koji povećavaju obujam te se postiže sličan učinak kao prilikom smrzavanja. U novije vrijeme upotrebljavaju se i druge otopine. Pokazalo se da su posljedice takvih ispitivanja na većini građevnih materijala nepovoljnije nego ispitivanja smrzavanjem.

Propusnost vode kroz građevne materijale ispituje se na uzorcima s najmanje jednom ravnom plohom na koju djeluje voda pod tlakom. Nakon određenog vremena, na prepolovljenom uzorku, mjeri se dubina prodiranja vode. U nekim postupcima tlak se postepeno povećava, a mjeri se količina protekle vode. Prema *Grafovu postupku* tlak vode u prva 24 sata iznosi 0,1 MPa u slijedeća 24 sata 0,3 MPa i u posljednja 24 sata 0,7 MPa. U SSSR je uobičajeno da se tlak svakih 8 sati povećava za 0,1 MPa sve do trenutka dok ne probije voda kroz cilindrički uzorak promjera 150 mm i visine 150 mm. Kao mjera nepropusnosti uzima se posljednji tlak pri kojemu još voda nije probila kroz uzorak. Tako se ispituju materijali (npr. betoni, mortovi i sl.) na koje u praksi doista djeluju povećani tlakovi (npr. materijali za brane, vodotornjeve, bazene itd.).

Propusnost bez povećanja tlaka ispituje se na materijalima, koji dolaze u dodir s vodom, ali na njih ne djeluju povećani tlakovi, npr. crijep, fasadna opeka i materijali za zaštitu od oborina. Tada se nepropusnost ispituje tako da se rubovi uzorka ograde plastelinom ili glinom te se nalije voda do visine od 1...5 cm. Za crijep je mjera propusnosti izražena vremenom t , nakon kojeg se pojavljuju prve kapi vode na donjoj strani, prema izrazu: $6/t$, gdje je 6 sati najduže vrijeme koje crijep treba zadržavati vodu. Najkraće vrijeme nakon kojeg se voda

smije pokazati iznosi 2 sata, pa je najveća dopuštena propusnost $6/2 = 3$.

Za ispitivanje *nepropusnosti za zrak* ima više tipova uređaja i više postupaka. Za sve je zajedničko da imaju dio kojim se nadoknađuje gubitak zraka i dio kojim se tlak zraka održava stalnim. Gubici zraka se mjere.

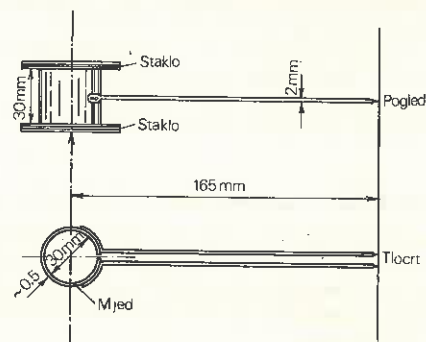
Konzistencija se ispituje dok su građevni materijali (beton, mort i sl.) u svježem, nevezanom stanju. Ona u određenoj mjeri predstavlja njihovu pokretljivost i obradivost. Ima mnogo postupaka ispitivanja konzistencije i oni se međusobno znatno razlikuju, tako da usporedbe među njima nisu moguće. Upotrebljavaju se slijedeći postupci za određivanje konzistencije: a) Postupak prodiranja utiskivača u svježu masu smještenu u posudi. Utiskivač može biti čelična kugla koja se spušta s određene visine u svježi beton. Mjeri se dubina prodiranja. Utiskivač može biti čelični štap promjera 16 mm, pri vrhu zaobljen, po kojemu klizi uteg koji se spušta s određene visine. Mjeri se broj udaraca za određenu dubinu probijanja. b) Postupak slijeganja svježe mase bez potresanja. Svježi beton sabije se u tri sloja u limeni kalup u obliku krnjeg stošca visine 30 cm, s gornjim promjerom od 10 i donjim od 20 cm. Nakon uklanjanja kalupa mjeri se vrijeme slijeganja. c) Postupak slijeganja s potresanjem. Postoji više postupaka, ali uvijek je oblik svježe mase jednak i dobiva se sabijanjem betona u stožasti kalup visine od 20 cm, gornjeg promjera od 13 cm i donjeg od 20 cm. U nas je prihvaćen tzv. *VE-BE-postupak*, prema kojem se mjeri vrijeme potrebno da svježi beton od oblika krnjeg stošca prijeđe u oblik valjka i ispunji posudu u kojoj se nalazi, a koja se potresa frekvencijom od 50 Hz. Može se osim toga pustiti da beton pada zajedno s podložnom pločom s visine od 4 cm, pa se nakon 15 padova mjere promjeri rasprostrtog betona u dva međusobno okomita smjera.

Konzistencija mortova ispituje se rasprostiranjem morta na staklenoj ploči. Početni oblik je krnji stožac visine 60 mm, s gornjim promjerom od 70 mm i donjim od 100 mm. Ploča se s mortom pusti da 15 puta padne s visine od 1 cm. Mjeri se rasprostiranje morta.

Konzistencija cementne kaše (mješavina cementa i vode) radi utvrđivanja potrebne količine vode ispituje se *Vicatovim valjčićem* promjera od 1 cm. Valjčić mase od 300 g pusti se da padne s površine u kašu koja ispunjava kalup od tvrde gume u obliku krnjeg stošca. Konzistencija se ocjenjuje prema dubini prodiranja valjka u kašu, a standardna je kad se valjčić zadrži 5...7 mm iznad dna.

Brzina vezanja cementa. Na istom uređaju ispituje se i *brzina vezanja cementa* tako da se valjak zamijeni iglom mase 300 g s tupim vrhom površine presjeka od 1 mm^2 , koja se spušta s površine kaše da vlastitom težinom prodre u kašu. Početak vezanja je trenutak kad se vrh igle zadrži 3...5 mm ispod površine, a svršetak vezanja kad na okrenutom stvrđnutom uzorku ne prodire više od 1 mm.

Stalnost volumena cementa ispituje se na dva načina. Od cementne kaše standardne konzistencije izrade se pogačice promjera 9 cm, debljine 1,5 cm na podmazanoj staklenoj ploči te se ostave 24 sata da se stvrđnu. Jedna od njih kuha se u vodi. Tokom 28 dana dvije se takve pogačice promatraju: jedna je čuvana na zraku sobne temperature, bez propuha, a druga u



Sl. 43. Le Chatelierov prsten za određivanje stalnosti obujma cementa

vodi. Cement je stalnog volumena ako se ni na jednoj od poglačica ne pojave naprsline. U drugom postupku cementnom se kašom standardne konzistencije ispune kalupi u obliku valjčića promjera i visine 3 cm, koji je po izvodnici prerezan i ima na tim mjestima kazaljke (sl. 43). Mjeri se razmak kazaljki odmah nakon izradbe. Uzorci, pokriveni staklenim pločama na otvorenim pobočkama valjaka ostave se u vodi sobne temperature 24 sata, te se ponovno mjeri razmak kazaljki. Zatim se kuhaju 2,5 sata u vodi, ostave ohladiti i ponovno se mjeri razmak. Smatra se da je cement stalnog volumena, ako promjena razmaka posljednjih dvaju mjerenja nije veća od 10 mm. Uzima se srednja vrijednost od 3 uzorka.

Izbijanje vapna i soli, uobičajeno je ispitivanje opeka. Događa se da glina od koje se proizvode opeke, crepovi i drugi keramički materijali sadrži zrna vapnenca, koja se pečenjem opeke na temperaturi višoj od 800 °C pretvaraju u živo vapno. Ako opeka s takvim zrnima dođe u dodir s vodom, vapno se gasi. Tada se nekoliko puta povećava obujam i na tim se mjestima opeka razara. Ispituje se tako da se nekoliko opeka stavi u vlažnu komoru iznad razine vode i ostavi stajati nekoliko dana, ili se opeke natope vodom i stave u autoklav sa zasićenom parom i pod tlakom od 0,3 MPa kroz 3 sata. Ako opeka sadrži vapna, pokazat će se razaranja opeke ili krateri na površini koje su izbacila zrna vapna.

Ispitivanje geometrijskih karakteristika. Za mnoge proizvode u graditeljstvu propisuju se oblik i dimenzije, no kako su pri proizvodnji neizbježna odstupanja, propisuju se uvijek i *dopuštena odstupanja* ili *tolerancije*, koja iznose od 1 mm do nekoliko desetaka mm. Tim tolerancijama moraju odgovarati i instrumenti kojima se kontoliraju dimenzije. Za mjerenja s točnošću od 1 mm upotrebljavaju se pomična mjerila s nonijem, no za mnoga mjerenja dostaju metalna mjerila s milimetarskom podjelom.

Vitoperost se u nekih proizvoda (opeka) utvrđuje provlačenjem uzorka između paralelnih ploča ili se utvrđuje na ravnoj ploči tako da se uzorak položi na ploču i mjeri odstupanje od ravnine. Neravnosti se utvrđuju prislanjanjem, obično metalnog, ravnala i mjerenjem razmaka između ravnala i uzorka na mjestu gdje je on najveći.

Izgled površine (glatka, hrapava, valovita i sl.) ocjenjuje se obično vizuelno, iako za slična mjerenja u ostalim granama tehnike postoje posebni uređaji pomoću kojih se mogu mjeriti neravnosti i izraziti se brojčano.

Oblik se zrna granulata (šljunka, pijeska, prašinstih materijala) obično ocjenjuje vizuelno i klasificira ga se kao obli ili uglasti, duguljasti, plosnati, štipićasti itd. Postoje ipak postupci pomoću kojih je moguće oblik izraziti brojčano i najviše se upotrebljavaju dva takva postupka. U prvom postupku odabere se iz granulata više zrna (30 i sl.) takvih dimenzija da ih se može mjeriti (obično veća od 8 mm) pa se izmjeri najveća i najmanja dimenzija. Omjer d_{min}/d_{max} jest koeficijent oblika zrna; aritmetička sredina omjera za sva izabrana zrna jest koeficijent oblika za čitav skup. U drugom postupku mjeri se obujam izabranih zrna volumetrom ili se on izračuna iz mase izabranih zrna i njihove gustoće. Zatim se izmjeri najveća dimenzija svakog zrna i izračuna obujam kugle opisane oko zrna. Zbroje se volumeni kugala i izračuna tzv. volumetrijski koeficijent, $v = V_z/V_k$, gdje je V_z volumen zrna, a V_k ukupni volumen kugala opisanih oko svih zrna. Često granulometrijski sastav usitnjenih ili prašinstih materijala ima znatan utjecaj na svojstva konačnog proizvoda, pa se tada utvrđivanju granulometrijskog sastava posvećuje velika pažnja.

Z. Kostrenčić

ISPITIVANJE GRAĐEVNIH KONSTRUKCIJA

Ispitivanje građevnih konstrukcija i njihovih elemenata obuhvaća niz postupaka kojima se utvrđuje njihovo ponašanje pri djelovanjima, u prvom redu mehaničkih vanjskih sila. Na temelju rezultata ispitivanja utvrđuje se podobnost konstrukcija za svrhu za koju su namijenjene.

Ispitivanja mogu biti: a) znanstvenoistraživačka, kad se želi ispitati ponašanje nove konstrukcije s obzirom na njezine deformacije i nosivost; b) kon-

trojna, kad se u nizu redovnih kontrola materijala i izvedbe u industrijskoj proizvodnji građevnih elemenata i konstrukcija ispituje i njihova nosivost; c) prethodna, prije prelaska na serijsku proizvodnju i d) ostala, kada se vrednuje samo određena konstrukcija, bilo zbog utvrđenih nedostataka u izradbi, bilo zbog nepoznanica s obzirom na očekivana svojstva. S obzirom na način opterećivanja, konstrukcija se ispituje statički ili dinamički. Ispitivanje može biti razorno ili bezrazorno, a s obzirom na mjesto gdje se ispitivanje provodi ono je terensko ili laboratorijsko. Ispitivanja se provode na modelima (izvedenim u nekom mjerilu s obzirom na stvarnu konstrukciju) ili na prototipovima.

Ispitivanjem građevnih konstrukcija mogu se utvrditi: podobnost preuzimanja predviđenih opterećenja, progibi i deformacije pojedinih elemenata ili čitave konstrukcije, posljedice dugotrajnog djelovanja opterećenja (puzanje, tečenje), brzina porasta deformacija, trajektorije naprezanja, pogreške u izradbi i spojevima elemenata, otpornost na slom, ponašanje i otpornost na djelovanje prirodnih utjecaja (vlastita težina, snijeg, vjetar, potres, temperatura), otpornost na kemijske utjecaje (korozija), funkcionalnost konstrukcije te otpornost na djelovanje udara, eksplozije itd.

Ispitivanja građevnih konstrukcija opterećenjem. Svrha je pokusnih opterećenja građevnih konstrukcija da se utvrdi stvarno ponašanje konstrukcija ili elemenata određivanjem njihove nosivosti ili upotrebljivosti mjerenjem progiba, deformacija i eventualnih defekata nastalih djelovanjem opterećenja. Pokusno opterećenje mora biti što sličnije očekivanom opterećenju konstrukcije, uzimajući u obzir stalna i pokretna opterećenja te njihovu raspodjelu. Pokusno se opterećenje provodi: a) do sloma konstrukcije ili njenog dijela da se utvrdi njena granična nosivost i b) do opterećenja kojim će se utvrditi njena upotrebljivost s obzirom na sposobnost nošenja određenog tereta, na krutost (progib) ili na pojavu deformacija i pukotina.

Pokusnim opterećenjem dobivaju se podaci o podobnosti novih konstrukcija, onih koje se znatno razlikuju od uobičajenih i konstrukcija kojima se naprezanja mogu samo približno proračunati.

Pokusno opterećenje može poslužiti i kao osnova za odluku o daljoj upotrebljivosti postojećih konstrukcija ako se sumnja: a) u nosivost konstrukcija koje su dugo izložene prirodnim ili umjetnim agensima; b) u njihovu nosivost zbog pretrpljenih preopterećenja koja su nastala djelovanjem potresa, vjetra, eksplozije, naleta vozila i sl., te c) u nosivost konstrukcije oštećene vatrom, kad postoje vidljivi nedostaci s obzirom na propise i prihvaćenu praksu.

Priprema pokusnog opterećenja počinje detaljnim pregledom konstrukcije. Detaljno se pregledavaju svi dijelovi konstrukcije, i to osobito: odstupanja u obliku, deformacije, kvaliteta materijala, količina, vrsta i položaj armature, broj i promjeri spojnih sredstava čeličnih i drvenih konstrukcija, kvaliteta zavaranja i dr. Kontroliraju se svi raspoloživi podaci dobiveni ispitivanjem građevnih materijala u toku građenja, a ocjenjuje se i moguće ponašanje konstrukcije za vrijeme ispitivanja. Svi se vidljivi nedostaci označuju na konstrukciji i na skicama. Definira se način i program ispitivanja. U pripremu se mogu uključiti i neka bezrazorna ispitivanja materijala.

Provedba pokusnog opterećenja. Konstrukcija se ispituje tek nakon što su ispunjeni uvjeti s obzirom na kvalitetu materijala i način izradbe i kad prođe dovoljno vremena da ugrađeni materijal očvrstne. U toku ispitivanja mjere se pomaci i deformacije pojedinih elemenata, na kojima se očekuju znatnija naprezanja. Uvijek se moraju utvrditi progibi, vrijeme i mjesto



Sl. 44. Primjer opterećenja pri statičkom ispitivanju konstrukcija

gdje se pojavljuju prva oštećenja i tok njihova razvoja (pukotine, pojave nestabilnosti i sl.).

Za opterećenje pri statičkom ispitivanju upotrebljavaju se komadi poznate mase kojima se lako rukuje (čelični ili olovni ingoti, betonske prizme, cement u vrećama, opeka i sl., sl. 44). Katkada se upotrebljava voda u bačvama ili sloj vode potrebne visine. Ako se želi postići opterećenje koncentričnim silama, upotrebljavaju se hidrauličke preše. U laboratoriju to se postiže sustavom sila (sl. 45). Hidraulička preša odupire se o čelični okvir usidren u kruti pod, koji mora biti izveden tako da može preuzeti sa sigurnošću sile što nastaju tokom ispitivanja. Na krutim podovima mogu se ispitivati do sloma gotovo sve građevne konstrukcije koje se na njih mogu smjestiti.



Sl. 45. Primjer opterećenja konstrukcije u laboratoriju

Teška vozila, valjci i tenkovi služe za pokusno opterećenje cestovnih, a lokomotive i natovareni vagoni za pokusno opterećenje željezničkih mostova. Izborom vozila i njihovom raspodjelom (sl. 46) nastoji se postići najveće i najnepovoljnije opterećenje mosta i pojedinih njegovih dijelova (štapovi, stupovi, sekundarni nosači i dr.).



Sl. 46. Pokusno opterećenje mosta vozilima

Opterećenje se postepeno nanosi na konstrukciju. Svaki put se dodaje $1/4 \dots 1/5$ od ukupno predviđenog tereta. Opterećenje se povećava nakon što su prirasti progiba konstrukcije ili deformacija bitno umanjeni. Smatra se da je to postignuto kad je prirast deformacije za vrijeme od 5 min manji od 15% prirasta u prethodnom vremenskom razdoblju istog trajanja ili kad je taj prirast manji od točnosti podatka mjernog instrumenta.

Postupci ispitivanja i kriteriji vrednovanja konstrukcija definiraju se tehničkim propisima. Navode se podaci prema RILEM (Rèunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions), 1975.

Najkraće trajanje opterećenja konstrukcije iznosi: za armiranobetonske konstrukcije 16 sati, zidane i od lakog betona 48 sati, drvene 72 sata, čelične 1 sat, od lakih legura 3 sata, a od plastičnih materijala sve do stabilizacije deformacija (obično duže od 72 sata). Podaci vrijede za objekte visokogradnje. Mostovi se opterećuju kraće vrijeme.

Pri ispitivanju konstrukcije razlikuje se pokusno opterećenje do sloma od opterećenja kojim se vrednuje nosivost konstrukcije.

Smatra se da je postignuto opterećenje sloma: a) ako nastupi slom cijele konstrukcije ili njenog dijela (presjeka ili armature), b) ako nastupi gubitak stabilnosti, c) ako nastupi lokalni slom koji se povećava bez povećanja opterećenja, d) ako se prirast deformacija pod istim opterećenjem povećava, e) ako je progib veći od $1/50$ raspona, f) ako nastanu pukotine šire od 1,5 mm ili dulje od 200 mm (armirani beton), g) ako nastupi slom veze betona i armature (armirani beton) i h) ako nastupi posmični slom (armirani beton).

Smatra se da ispitana konstrukcija zadovoljava: a) kad su progibi i deformacije u okviru projektnih vrijednosti ili su zbog sekundarnih utjecaja neznatno veći, b) kad trajni, plastični progibi i deformacije nisu veći od određenog postupka izmjerenih elastičnih deformacija, i c) kad su pukotine na armiranobetonskoj konstrukciji uže od 0,3 mm za konstrukcije zaštićene od vanjskih utjecaja, od 0,2 mm za nezaštićene konstrukcije, a od 0,1 mm za one na koje djeluju agresivni agensi. Pokusno opterećenje treba ponoviti, ako su trajne deformacije veće od vrijednosti iz tabl. 7. Nakon ponovljenog ispitivanja trajne deformacije treba da zadovolje uvjet iz tabl. 7. U protivnom, smatra se da ispitana konstrukcija ne zadovoljava. Ona nije dovoljno kruta (izmjereni progibi su znatno veći od proračunskih), ne može preuzeti predviđena opterećenja (trajni progibi su veći od dopustive granice) i ne zadovoljava s obzirom na otvaranje i širenje pukotina (velike pukotine se ne zatvaraju nakon rasterećenja).

Ispitivanje trajnih deformacija. Funkcionalni i estetski razlozi zahtijevaju ograničene ukupne progibe građevnih konstrukcija. Dopušteni progibi ovise o rasponu i upotrijebljenom materijalu i iznose $L/200 \dots L/1000$ (L je raspon). Ukupni progib sastoji se od elastičnog (reverzibilnog) i plastičnog (ireverzibilnog) dijela. Elastični progib nastaje prilikom nanošenja opterećenja, a plastična se komponenta pojavljuje kasnije i ovisi o reološkim svojstvima materijala. Plastični dio progiba nastaje djelovanjem vlastite težine konstrukcije i drugih stalnih i trajnih opterećenja,

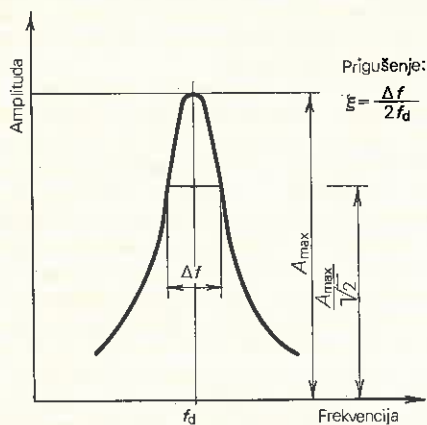
Tablica 7

VRIJEDNOSTI TRAJNIH DEFORMACIJA PRI POKUSNOM OPTEREĆENJU GRAĐEVNIH KONSTRUKCIJA

| Vrste konstrukcija | Dopuštena vrijednost trajnih deformacija u postotku od izmjerenih % | Gornja granica trajnih deformacija pri kojoj treba ponoviti ispitivanje % | Dopuštena vrijednost trajnih deformacija nakon drugog ispitivanja % |
|--------------------------------------|---|---|---|
| Čelične | 15 | 40 | 7,5 |
| Prednapregnute betonske | 20 | 50 | 10 |
| Armiranobetonske, zidane i spregnute | 25 | 50 | 12,5 |
| Drvene | 40 | 60 | 15 |
| Plastične i slične | 40 | 60 | 20 |

a svoju konačnu vrijednost dostiže nakon više mjeseci (armirani beton) ili više godina (plastični materijali), već prema viskoznosti. O plastičnim deformacijama čelika v. *Čelik*, TE3, str. 72, a o puzanju betona v. *Beton*, TE2, str. 21. Ispitivanje trajnih progiba provodi se u laboratorijima na posebno izrađenim elementima konstrukcija (pločama, gredama, stupovima) u normalnim klimatskim uvjetima (temperatura, vlažnost). Konstrukcije se opterećuju stalnim teretom ili posebnim hidrauličkim prešama. Jednostavniji uređaji rade na principu opruga koje opterećuju konstruktivni element. Mjerenja su obično jednostavna. Mjere se progibi i deformacije. Pouzdanost je mjernih podataka vrlo važna, jer su mjerenja dugotrajna i neponovljiva. Ispitivanje je dovršeno kad se kroz duže vremensko razdoblje progibi praktički ne mijenjaju.

Dinamička ispitivanja građevnih konstrukcija provode se da bi se utvrdila njihova dinamička svojstva: periode vibracija za osnovnu i više harmonijske frekvencije, oblik vibracija i prigušenje. Konstrukcija se dovodi pomoću vibratora u rezonanciju (izjednačenje frekvencije vibratora i vlastite frekvencije konstrukcije). Ako se može vrlo fino mijenjati frekvencija vibratora, može se dobiti točna frekventna krivulja, a iz nje utvrditi i prigušenje (sl. 47). Dinamička se svojstva mogu dobiti i jednostavnije, npr. natezanjem konstrukcije užetom i iznenadnim presijecanjem tog užeta, nakon čega nastaju slobodne vibracije konstrukcije. Vibracije se mjere akcelerometrima (v. *Električna mjerenja*, TE3, str. 661).

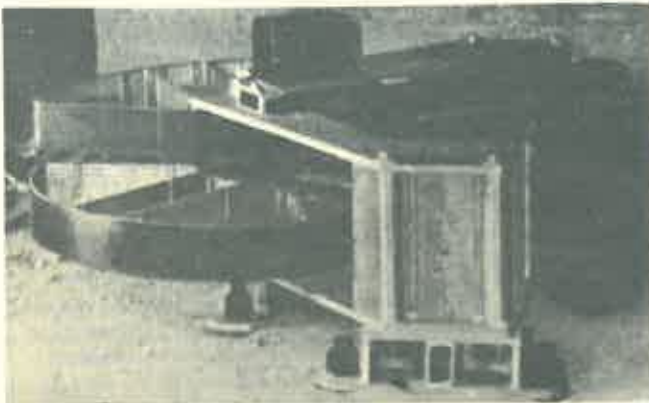


Sl. 47. Određivanje prigušenja iz rezonantne krivulje

Izvori vibracija za postojeće konstrukcije mogu biti strojevi koji su već ugrađeni u konstrukciju ili posebno postavljeni generatori vibracija. Tada se konstrukcija ispituje i u normalnom radnom pogonu.

Za pobuđivanje vibracija većih zgrada i mostova potrebni su veliki uređaji (sl. 48). Vozila koja služe za dinamičko ispitivanje mostova kreću se obično različitim brzinama i na određenom razmaku prema programu ispitivanja.

Kvazidinamička ispitivanja. Dinamičkim se ispitivanjima utvrđuju svojstva konstrukcije u elastičnom području relativno ma-



Sl. 48. Uređaj za pobuđivanje vibracija

lih naprezanja. Da se utvrdi ponašanje konstrukcije u plastičnom području, provode se kvazidinamička ispitivanja. Tada su amplitude sila znatno veće i uzrokuju tečenje u dijelovima konstrukcije, a sila se mijenja vrlo sporo (trajanje periode 1...10min). Ispitivanjem se može utvrditi nosivost, slabljenje čvrstoće i krutosti, sposobnost apsorpcije energije, prigušenje, defekti (plastično izvijanje, pojava pukotina, smanjenje prionljivosti čelika i betona). Takva su ispitivanja potrebna za određivanje seizmičke otpornosti građevnih konstrukcija i često se provode na velikim modelima.

Ispitivanja na modelima obuhvaćaju pokuse i mjerenja na modelima konstrukcija ili njihovih elemenata (greda, stupova, spojeva i sl.) sa svrhom da se dobiju podaci koji će upotpuniti, potvrditi ili zamijeniti proračun. Ispitivanja na modelima, u usporedbi s ispitivanjima prototipa, jeftinija su i jednostavnija, a omogućuju ponavljanje i variranje eksperimenata na više jednakih ili različitih modela i dr. Dimenzioniranje modela temelji se na teoriji sličnosti (v. *Dimenzijska analiza*, TE3, str. 340). Teži se da se što više elemenata (duljina, širina i visina, površina, sila, naprezanje, masa, ubrzanje, periode oscilacije i druge veličine) preslika s prototipa na model. Model se izrađuje bilo od istog materijala kao i prototip, bilo od nekog drugog materijala (metal, plastika, smole), što ovisi o mjerilu u kojem se model izvodi, potrebi modeliranja spojeva, razini opterećenja modela i dr. Modeli građevnih konstrukcija mogu se ispitivati i u zračnim tunelima (v. *Aerotunel*, TE1, str. 31), na vibroplattformama i fotoelasticimetrijski (v. *Fotoelasticimetrija*, TE5, str. 525).

Bezrazorna ispitivanja. Bezrazorna ispitivanja mogu se obaviti na konstrukcijama u njihovoj redovitoj eksploataciji jer se konstrukcije ne oštećuju i ne gube svoju nosivost.

Prednosti takvih ispitivanja jesu: a) dobivaju se informacije o svojstvima materijala i napregnutom stanju u svakom konačnom broju mjesta, čime se dobiva i informacija o homogenosti materijala od kojeg je izrađena konstrukcija; b) dobivaju se one informacije o konstrukciji, koje se ne mogu dobiti razornom metodom (defektna mjesta i sl.); c) bezrazorna ispitivanja su po opsegu jednostavnija, brža i ekonomičnija. Bezrazornim ispitivanjima ne dobivaju se dovoljno precizne informacije, osobito za konstrukcije od materijala manje homogenosti i ne mogu potpuno zamijeniti razorne metode, koje daju jasniju sliku o cjelovitom stanju i ponašanju konstrukcije. Navedene mane tih ispitivanja mogu se nadoknaditi istodobnim bezrazornim ispitivanjem na dva i više načina.

Metode bezrazornih ispitivanja. Sve metode bezrazornog ispitivanja imaju zajedničko svojstvo da se one primjenjuju na određeno mjesto (presjek) ili element konstrukcije (između dva presjeka štapa i sl.) ili čak teorijski samo na jednu točku konstrukcije. Zbog toga je ispitivanje konstrukcija tim metodama potpuno istovjetno ispitivanju pojedinih građevnih materijala.

Kontrola ispitivanja u građevnoj industriji. Kad se konstrukcijski elementi i nosive konstrukcije proizvode u velikim serijama, potrebno je da produkciju permanentno kontroliraju proizvođači, a povremeno i ovlaštene organizacije. Ispitivanje sastavnih materijala od kojih se elementi sastoje još ne garantira da gotovi produkt udovoljava s obzirom na pojavu pukotina, krutost, podobnost za nošenje tereta, sigurnost od sloma, stabilnost, otpornost na dinamička djelovanja i dr. I uz nepromijenjena svojstva sastavnih materijala, kvaliteta proizvoda može znatno varirati jer ovisi o kvaliteti izradbe, njezi (za beton), spajanju dijelova, savjesnosti neposrednog izvodioca, načinu uskladištenja, transporta itd. Kontrolira se dnevno i tjedno tako da se slučajno izaberu elementi i konstrukcije iste serije (šarže) koji se ispituju u laboratorijima proizvođača. Kontrola ovlaštene organizacije obuhvaća ispitivanja pokusnim opterećenjem radi izdavanja atesta proizvoda i provodi se 1...2 puta godišnje na više odabranih uzoraka. Negativni rezultat ispitivanja u laboratorijima proizvođača dovodi u sumnju samo onu seriju na koju se odnosi, ali negativan rezultat ispitivanja u ovlaštenim organizacijama diskreditira cijelu višemjesečnu proizvodnju takve konstrukcije. Vjerojatnost p da će se među n slučajno izabranim uzoraka naći barem jedan uzorak koji ne udovoljava postavlj-

nim kriterijima kvalitete, ako je poznat udio škarta s , iznosi: $p = 1 - (1 - s)^n$.

Instrumenti za mjerenja. Za ispitivanje građevnih konstrukcija potrebna su mjerenja sljedećih veličina: sile, flaka, pomaka, kuta, deformacije, temperature, a za dinamička ispitivanja još i brzine, akceleracije, periode i prigušenja. Sve se više mjerni instrumenti konstruiraju tako da se mehaničke veličine odmah pretvaraju u električne, što omogućuje obradbu podataka na elektroničkim računalima. Za dinamička ispitivanja na vibroplatformama upotrebljavaju se i kompjuterski upravljani sustavi. Instrumenti su prikazani u člancima *Aerotunel*, TE1, str. 39, *Brane, osmatranje*, TE2, str. 133, *Dalekovodi*, TE3, str. 153, *Digitalna računala*, TE3, str. 318, *Električna mjerenja*, TE3, str. 601...661.

Ispitivanje građevnih konstrukcija u Jugoslaviji. Način ispitivanja armiranobetonskih konstrukcija propisan je Pravilnikom o tehničkim mjerama za beton i armirani beton (1971), a prednapregnutih betonskih konstrukcija Pravilnikom o tehničkim mjerama za prednapregnuti beton (1971). Obvezna su kontrolna pokusna opterećenja svih mostova s rasponom većim od 15 m, kranskih staza, sportskih građevina, kazališta, kina, brana i elemenata brana, hangara, dalekovodnih stupova, međukatnih konstrukcija sustava koji se prvi put primjenjuju, specifičnih i osobito složenih građevina, građevina koje su izvedene novim tehnološkim postupcima i građevina za koje projekt predviđa obvezno pokusno opterećenje.

Način ispitivanja čeličnih konstrukcija propisan je Tehničkim propisima za pregled i ispitivanje nosivih čeličnih konstrukcija (1965). Obvezna su kontrolna pokusna opterećenja mostova, kranova i kranskih staza, tlačnih cjevovoda, dalekovodnih stupova, a pokusna opterećenja zgrada samo u posebnim slučajevima.

D. Aničić

LIT.: K. Fink, Ch. Rohrbach, Handbuch der Spannungs- und Dehnungsmessung. VDI-Verlag, Düsseldorf 1958. — R. L'Hermite, Methodes générales d'essai et de contrôle en laboratoire. Edition Eyrolles, Paris 1959. — Sigurnost konstrukcija. Građevinska knjiga, Beograd 1963. — H. E. Davis, C. E. Troxell, C. T. Wiskocil, The testing and inspection of engineering materials. McGraw-Hill Book Company, New York 1964. — Справочник по строительным материалам и изделиям. Будвелник, Киев 1966. — P. Vasić, M. Arsenjević, Ispitivanje materijala. Naučna knjiga, Beograd 1966. — V. Tufegdžić, Građevinski materijali — poznavanje i ispitivanje. Naučna knjiga, Beograd 1966. — T. Javor, L. Borovička, Nové metody v navrhování a v stavbě mostov. Slov. Vydavatelstvo Technickej Literatury, Bratislava 1967. — E. Pohl, Zerstorungsfreie Prüf- und Messmethoden für Beton. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1969. — S. Balan, M. Arcan, Essai des Constructions. Meridiane Bucarest — Eyrolles Paris 1972. — S. Ferušić, Radiografske metode u ispitivanju građevinskih materijala i zavarenih spojeva u konstrukcijama. Grad. fakultet, Sarajevo 1972. — K. Wesche, Baustoffe für tragende Bauteile, I—IV. Bauverlag GMBH, Wiesbaden und Berlin 1973—1975. — V. Tufegdžić, Građevinski materijali — ponašanje materijala u različitim sredinama. Naučna knjiga, Beograd, 1975. — Katalog jugoslavenkih standarda. Beogradski izdavačko-grafički zavod, Beograd 1975.

D. Aničić Z. Kostrenčić

ISPREŠAVANJE, izdvajanje kapljevine iz materijala u kojima se one nalaze u šupljinama, porama ili kapilarama čvrste tvari, mehaničkim sredstvima (obično tlačenjem unutar kućišta sa stijenkama otpornim prema tlaku, najčešće krutim, ali propusnim za kapljevinu). Zbog toga se ponekad, naročito u anglosaskim zemljama, o isprešavanju govori kao o *mehaničkoj ekstrakciji*.

Odvajanje kapljevine od čvrste tvari kroz propusne stijenke čini isprešavanje do stanovite mjere sličnim filtriranjem (v. *Filtracija*, TE5, str. 398). Čak se o isprešanoj kapljevinu ponekad govori kao o filtratu, a o čvrstom ostatku kao o kolaču (pogači). Međutim, te se dvije operacije razlikuju ne samo time što se filtriranje odvija pod utjecajem hidrauličkog tlaka u materijalu koji se prerađuje, a isprešavanje pod utjecajem mehaničke sile, nego i mehanizmom procesa. Naime, barem kad se proces odvija normalno, kapljevine koja se odvaja isprešavanjem ne transportira čvrstu tvar, ili barem ne toliko da se, kao pri filtriranju, na stijenkama formira filtarski kolač. Osim toga, dok se filtriranjem razdvajaju kapljevine od čvrstih tvari, tj.

isključivo iz materijala koji se mogu transportirati pomoću crpki, isprešavanjem se mogu izdvajati i kapljevine iz materijala koji kao cjelina mogu biti čvrsti.

Općenito je, zbog manjeg utroška energije, za jednaku količinu odvojene kapljevine isprešavanje ekonomičnije od filtriranja. Međutim, da bi se kapljevine mogla isprešati iz nekog materijala, materijal mora imati specifična svojstva. Najvažnije je da se dade znatno deformirati kompresijom i pri tome zadržati dovoljnu propusnost za kapljevinu. Zbog toga isprešavanje je primjenljivo samo u dosta ograničenom području procesne tehnike, koje se može podijeliti na tri dijela: izdvajanje kapljevine iz dovoljno kapljevinom bogatih materijala s vlaknatom strukturom čvrste tvari, iz vrlo elastičnih poroznih materijala, te iz rastresitih elastičnih muljeva.

Najviše se isprešavanje upotrebljava u preradbi materijala iz prve od te tri skupine, osobito u prehrambenoj industriji za izdvajanje sokova iz voća i drugih dijelova biljaka i ulja iz sjemenja, ali dosta i u kemijskoj industriji, npr. za odvodnjavanje mokre celuloze.

U proizvodnji biljnih ulja isprešavanje je konkurentno luženju (ekstrakciji). Pri isprešavanju ulja iz sjemenja isrcpci su doduše manji nego pri luženju, ali je kvaliteta proizvoda viša. U proizvodnji biljnih ulja često se te dvije operacije kombiniraju. Svrha tih kombinacija jest da se procesom iskoriste sve prednosti, a eliminišu nedostaci tih operacija. Iz istog razloga kombinira se i isprešavanje soka šećerne trske i luženje ostatka vodom.

Mokri sintetski kaučuk i treset tipični su predstavnici elastičnih, poroznih tvari, odnosno rastresitih elastičnih muljeva preradivih isprešavanjem (oba, kao i mokra celuloza, radi odvodnjavanja).

Zbog neusporedivo manjeg utroška energije, u mnogim je slučajevima odvodnjavanje isprešavanjem konkurentno sušenju grijanjem. Zbog toga se isprešavanje vrlo često upotrebljava za tu svrhu. Naročito u kombinaciji sa sušenjem.

Isprešavanje je bilo poznato već u pretpovijesno doba. Do oko smjene prošlog i našeg stoljeća za isprešavanje su stajale na raspolaganju samo šaržne preše. Tada su se pojavili prvi strojevi za kontinualno isprešavanje. To su bile pužne preše (tzv. ekspeleri) konstruirane za industriju biljnih ulja. Otada su te i kontinualne preše konstruirane na drugim principima sve više istiskivale šaržne iz upotrebe, tako da danas šaržne preše, barem za industriju, imaju skoro još samo povijesno značenje.

ŠARŽNO ISPREŠAVANJE

Usprikladno dugoj upotrebi isprešavanja, teorija nije čak ni za šaržno isprešavanje uspjela dati matematičke izraze fizikalnih osnova te operacije, koji bi omogućili egzaktno projektiranje procesa i konstrukciju opreme. Zadržala se na ograničenom razvijanju sasvim pojednostavnjenih predodžbi.

Pri tome se obično polazi od hipoteze da promjena tlaka p nad materijalom iz kojega se može isprešati kapljevine uzrokuje proporcionalnu promjenu mase q_s čvrste tvari u jedinici volumena sustava, tj.

$$\frac{dp}{p} = K dq_s, \quad (1)$$

gdje je K konstanta ovisna o svojstvima materijala i uvjetima procesa.

Budući da je $q_s = \frac{1}{v}$, gdje je v specifični volumen materijala na bazi sadržaja čvrste tvari, iz (1) slijedi i

$$\frac{dp}{d\left(\frac{1}{v}\right)} = Kp. \quad (2)$$

Integracijom se iz (2) dobiva

$$\log p = k + \frac{k'}{v}, \quad (3)$$

(gdje su k i k' također konstante ovisne o svojstvima materijala i uvjetima procesa), prema čemu je međuovisnost tog tlaka i tog volumena koji se pod njim uspostavlja, eksponencijalna. Na temelju tih izraza izvedeni su brojni izrazi za različite specifične slučajeve, s empirijski određenim eksponentima.