

UDK 539.433:669

Obnašanje kovin pri dinamičnih obremenitvah*

ANTON KUHELJ, ml. — IGOR EMRI

**1. DINAMIČNE OBREMENITVE
V STROJNIŠTVU**

Gibanje strojnih delov in strojev povzroča obremenitve, ki se s časom spreminjajo. V strojništvu prevladujejo dinamične obremenitve, kljub temu pa so vse do pred kakimi sto leti vse obremenitve upoštevali le kot mirujoče — statične. Šele raziskave v zadnjih sto letih so pokazale, da smemo za smotrno dimenzioniranje preračunati dinamično obremenjene dele le redko po zakonih, ki veljajo za statične obremenitve. Poskusi, da bi pri dinamičnih obremenitvah uvedli le nek dinamični faktor in računali z neko manjšo dopustno napetostjo, če so obremenitve dinamične, se v večini primerov niso obnesli. Za dimenzioniranje glede na dinamične obremenitve so potrebni največkrat popolnoma drugačni načini preračuna. Tako je na primer z vidika statike nerazumljivo, da je včasih mogoče zmanjšati napetosti v materialu tudi z zmanjšanjem prereza dinamično obremenjenega dela.

Metode dinamičnega preračuna so izredno izpolnili na področju vozil, predvsem letal in raket. Pri zračnih vozilih zahteva po čim manjši teži ni samo vprašanje ekonomičnosti, ampak je to hkrati tudi ključno vprašanje uspešnega ali neuspešnega delovanja. Znano je na primer, da je pri izstrelitvi satelita v gibanje okrog zemlje ali zunaj dosega zemeljske privlačnosti eden od bistvenih pogojev za doseg zadostne hitrosti majhno razmerje končne, koristne mase in začetne mase ob izstrelitvi. Zato so prav na področju letal in raket razvili najnovejše in najpopolnejše metode preračuna, meritev in izvedb, ki se od tam širijo tudi na druga področja tehnike, kakor so na primer cestna vozila. Z druge strani pa statistična obdelava vzrokov poškodb, zlomov in porušitev strojev in konstrukcij kaže, da so le izjeme primeri, ko je vzrok statična, mirujoča obremenitev in še v teh izjemnih primerih je zvečine mogoče dokazati, da so bile povod v bistvu banalne subjektivne napake v preračunu, izvedbi in podobno. Zato je opaziti v zadnjem času prizadevanja, da bi tudi klasične statične preračune, npr. jeklenih stolpov ali mostov dopolnili še z dinamičnimi preračuni. Enako prizadevanje je opaziti tudi v gradbeništvu, ki je bilo izrazito področje mirujočih obremenitev. V zadnjem času pa tudi gradbeniki vedno bolj upoštevajo dinamične obremenitve, kakršne so potresi.

* To raziskavo je sofinancirala Raziskovalna skupnost Slovenije.

Razlike v metodah preračuna, meritev in izvedb pri dimenzioniranju in oblikovanju delov, ki so izpostavljeni statičnim ali dinamičnim obremenitvam, so velike in številne. Na tem mestu se v te razlike ne bomo spuščali, zaradi zanimivosti naj omenimo le to, da danes pri zahtevnem dimenzioniranju glede na dinamične obremenitve ni več vprašanje, s kakšno varnostjo trdimo, da bo del vzdržal, ampak skušamo določiti, kolikšna je verjetnost, da bo nek del vzdržal zaželeni (običajno omejeni) obratovalni čas. V nadaljnjem se bomo omejili na obravnavanje ene lastnosti večine tehnično uporabnih materialov, zaradi katere je dimenzioniranje in oblikovanje dinamično obremenjenih delov znatno bolj zapleteno, kakor pri statičnih obremenitvah. Izkušnje in raziskave so namreč pokazale, da pride do porušitve materialov, ki so izpostavljeni časovno spreminjajoči se obremenitvi dlje časa, že pri napetostih, ki so bistveno manjše od porušilne napetosti pri statični obremenitvi. Pokazalo se je, da se pod vplivom daljše dinamične obremenitve spremenijo mnoge lastnosti materiala in pravimo, da se zaradi teh obremenitev material utruja. Praktično je zelo pomembno poznati spremembe, ki se v materialu dogajajo med utrujanjem in na podlagi teh sprememb skušati ugotoviti tudi stopnjo utrujenosti materialov.

**2. SPREMEMBE V MIKRO SESTAVI KOVIN —
INTERKRISTALNE SPREMEMBE**

Vse do štiridesetih let tega stoletja je bila identifikacija utrujenosti omejena samo na odkrivanje razpok, ki so se pojavljale kot posledica zunanje dinamične obremenitve. Vzroke za to je treba iskati v slabem poznavanju interkristalnih razmer v materialu in ne nazadnje tudi v tem, da se material do pojava razpok na videz ne spreminja. Nove možnosti raziskav na omenjenem področju je dala skupina znanstvenikov s področja fizike trdne snovi, ki so v letu 1934 postavili teorijo dislokacij. Naj omenimo samo najvidnejše: Taylor, Orowan, Polanyi, Prandtl, Dehlinger, Burgers, idr. Omenjeni so ugotovili, da so mehanske lastnosti materiala v veliki meri odvisne od interkristalnih napak, med katerimi so najpomembnejše dislokacije.

Do premika in gibanja dislokacijskih linij pride pod vplivom primerno velike zunanje obremenitve, ki je dana z izrazom

$$\frac{W}{L} = \frac{\mu b^2}{4\pi(1-\nu)} (1 - \nu \cos^2 \Theta) \ln \frac{R}{5b} \quad (2.1)$$

Pri tem je W/L energija na enoto dolžine dislokacijske linije, μ modul striga, b intenzivnost Burgersovega vektorja (za večino kovin je $b \approx 0,3$ mm), ν Poissonov koeficient, Θ kot, ki ga oklepa Burgersov vektor z dislokacijsko linijo in R polmer območja delovanja zunanje obremenitve.

V primeru, če je zunanja obremenitev dinamična, se dislokacije ne gibljejo zvezno, ampak prihaja samo do delnih premikov. Dislokacije se na svoji poti med seboj seštevajo, uničujejo in prepletajo v mreže najmanjše potencialne energije (mreže Franka), ki pomenijo najstabilnejšo strukturo dislokacij v materialu. Če je amplituda dinamične obremenitve premajhna, se bo gibanje dislokacij ustavilo — material je dosegel trajno dinamično trdnost. Premiki dislokacij do trenutka zaustavitve, ki so lokalne plastične deformacije v kristalu, pa bodo zmanjšali mejo porušitve materiala. Navedeno domnevo potrjujejo rezultati preizkusov, ki kažejo, da je meja trajne dinamične trdnosti nižja od statične. Število nihajev N , potrebnih za formiranje stabilne mreže Franka, je odvisno od vrste materiala in od dinamične obremenitve. Znano je, da je za večino kovin pri mejni amplitudi dinamične obremenitve $N = 10^6 \dots 10^7$ nihajev.

Da dosežemo nadaljnje širjenje dislokacij po materialu, mora biti energija dinamične obremenitve večja od energijskega praga Frankove mreže, ki je dan z enačbo

$$\frac{W}{L} = \frac{\mu b^2}{4\pi} \frac{1 - \frac{v^2}{c_t^2}}{\left(1 - \frac{v^2}{c_t^2}\right)^{1/2}} \ln \frac{R}{5b} + \frac{\mu b^2}{\pi} \frac{c_t^2}{v^2} \ln \frac{R}{5b} \cdot \left[\frac{\frac{c_e^2}{c_t^2}(\gamma_e^2 - 1)}{\gamma_e} + 4\gamma_e + \frac{(1 + \gamma_t^2)^4}{2^5} \cdot \left(\gamma_t + \frac{1}{\gamma_t^3} + \frac{6}{\gamma_t} - \frac{(1 + \gamma_t^2)^2}{\gamma_t} - (1 + \gamma_t^2)^2 \gamma_e \right) \right] \quad (2.2)$$

Pri tem so v hitrost širjenja dislokacij, c_t hitrost transverzalnega širjenja zvoka in c_e hitrost longitudinalnega širjenja zvoka v materialu. Veličini γ_t in γ_e pa sta dani z izrazoma

$$\gamma_t = \left(1 - \frac{v^2}{c_t^2}\right)^{1/2} \quad (2.3)$$

$$\gamma_e = \left(1 - \frac{v^2}{c_e^2}\right)^{1/2}$$

V primeru, če je dinamična obremenitev premajhna, do nadaljnjega širjenja dislokacij ne bo

prišlo, ampak bodo le-te nihale okrog ravnotežnih leg kakor prednapete strune. Lastna frekvenca transverzalnih nihanj dislokacijske linije je

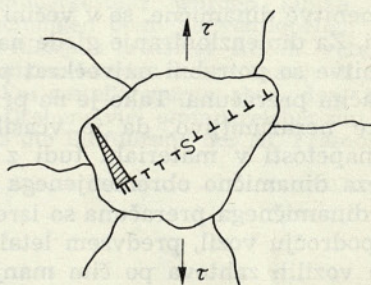
$$f_0 = \left(\frac{2\mu}{\pi^2 \rho}\right)^{1/2} \frac{1}{l_0} \quad (2.4)$$

Pri tem je l_0 dolžina nedeformirane dislokacijske linije, ρ pa je masa na enoto dolžine.

V primeru dovolj velike zunanje obremenitve se dislokacije torej premaknejo iz stabilne mreže Franka in se gibljejo skozi kristal. Mreža Franka je sedaj vir razmnoževanja dislokacij. Omenjeni fenomen sta leta 1950 odkrila Frank in Read.

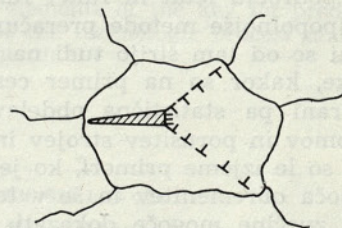
Dislokacije pod vplivom zunanje obremenitve potujejo skozi kristal in se akumulirajo na meji kristala oziroma površini materiala.

Ko je število akumuliranih dislokacij dovolj veliko, pride do pojava razpok. Stroh je izdelal model formiranja razpoke na meji kristala, ki slovi na domnevi, da bo prišlo do pojava razpoke takrat, ko bo postala sila na dislokacije tako velika, da bo združila dve oziroma več dislokacij (sl. 2.1).



Sl. 2.1. Strohov model formiranja razpok

Cottrell je predpostavil, da pride lahko do formiranja razpoke ne samo na meji kristalov oziroma površini materiala, ampak tudi v točki, kjer se sekata dve dislokacijski ravnini (sl. 2.2.).



Sl. 2.2. Cottrellov model formiranja interkristalnih razpok

Pojav mikroskopskih razpok v materialu povzroča spremembo notranjega deformacijskega, napetostnega in energijskega stanja v materialu.

Med prvimi je omenjeni problem rešil Mushelišvili, ki je obravnaval problem eliptične luknje v neskončni statično natezno obremenjeni ravnini. Uporabil je teorijo kompleksnih spremenljivk in dobil

$$2\mu(u + iv) = -\sigma(1 - 2\nu)x + i2\sigma(1 - \nu)\frac{a}{b}y$$

$$\sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} = \sigma \frac{1 - m^2}{(r^2 - m)^2} \cdot \left[1 + r^2 + 2 \frac{r^2(1 - r^2)}{r^2 - m} \right] \quad (2.5)$$

Pri tem sta u in v pomika v smeri osi x oziroma y , σ_x , σ_y in τ_{xy} pa so ustrezne komponente napetostnega tenzorja za ravninsko napetostno stanje, σ je zunanje napetostno stanje, m , r , a in b so realne konstante, ki so odvisne od oblike razpoke, ν pa je Poissonov koeficient. Pojav razpok povzroča tudi spremembo notranje energije

$$\Delta W = \pi \sigma^2 a^2 (1 - \nu^2) \mu^{-1} \quad (2.6)$$

Notranje napetostno in deformacijsko stanje, ki se pojavlja v okolici razpok, nasprotuje širjenju dislokacij, zato se lahko zgodi, da se proces razmnoževanja in širjenja razpok ustavi.

Navzočnost mikroskopskih razpok torej še ne pomeni porušitve materiala.

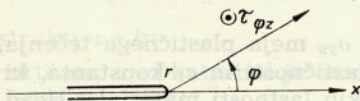
Omenjeno dejstvo potrjuje vrsta primerov iz prakse, kjer se je pokazalo, da je neki mehanski element, ki je vseboval celo večje število mikroskopskih razpok, uspešno rabil svojemu namenu.

Mogoče pa je tudi, da je razpoka v materialu že v njegovem prvobitnem, nedeformiranem stanju, kar je posledica napak pri litju oziroma poznejši obdelavi materiala.

Ne glede na vir pa pomenijo razpoke v materialu napako, ki vpliva na njegove mehanske lastnosti.

Mimo tega, da razpoke zmanjšujejo velikost koristnega prereza mehanskega elementa, vplivajo tudi na porazdelitev notranjih napetosti in povzročajo koncentracijo napetosti v določeni smeri.

Omenjeni fenomen sta med prvimi matematično formulirala Broberg in Craggs, ki sta obravnavala strižno obremenjeno razpoko v neskončni ravnini.



Sl. 2.3. Analiza ravninskega napetostnega stanja v okolici razpoke

Predpostavila sta, da se razpoka giblje s konstantno hitrostjo v_0 pravokotno na smer zunanje obremenitve in dobila

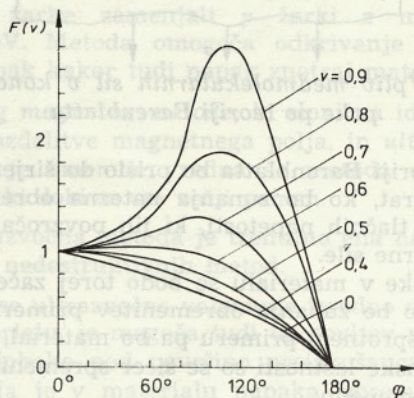
$$F(v) = \frac{\tau_{\phi z} \left(\frac{2a}{a} \right)^{1/2}}{q} \frac{\pi}{K(v) \sqrt{1 - v^2}} =$$

$$= \left[\cos \frac{\psi}{2} \cos \varphi + \frac{\sin \frac{\psi}{2} \sin \varphi}{(1 - v^2)^{1/2}} \right] (1 - v^2 \sin^2 \varphi)^{-1/4} \quad (2.7)$$

$$\psi = \arctan [(1 - v^2)^{1/2} \tan \varphi]$$

Pri tem je $v = v_0/c_e$ razmerje hitrosti razpoke v_0 in hitrosti longitudinalnega širjenja zvoka c_e , q je velikost zunanje obremenitve, $K(v)$ eliptični integral prvega reda, katerega rešitev je konstanta, ki jo lahko določimo s preizkusi. Pomen drugih veličin je razviden s sl. 2.3.

Izraz (2.7) podaja porazdelitev napetostnega stanja v okolici gibajoče se razpoke.



Sl. 2.4. Diagram porazdelitve intenzivnosti napetostnega stanja $F(v)$ v odvisnosti od kota φ in razmerja hitrosti v

S sl. 2.4. je razvidno, da je smer koncentracije napetosti v materialu odvisna od razmerja v , ki je odvisno od velikosti zunanje obremenitve.

Koncentracija napetosti v okolici razpoke v določeni smeri zmanjšuje velikost zunanje obremenitve, ki je potrebna za širjenje razpok v materialu.

Do širjenja razpok pride v primeru, ko doseže zunanja obremenitev neko kritično vrednost, ki je odvisna od velikosti in števila razpok v materialu. Izkušnje kažejo, da je napetost lahko bistveno manjša od dopustnih napetosti za neki material.

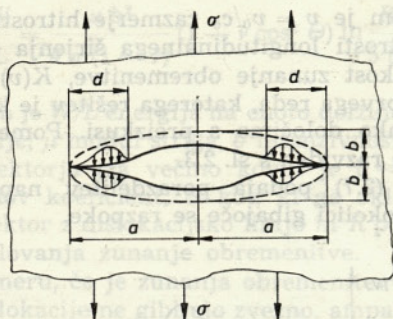
Griffith je omenjeno kritično napetost izračunal na osnovi energijske bilance in dobil

$$\sigma_{kr}^2 = 2E\gamma [\pi(1 - \nu^2)a]^{-1} \quad (2.8)$$

Pri tem je E modul elastičnosti materiala, γ je notranja energija kristala, $2a$ pa dolžina razpoke. Druge veličine so bile definirane že v prejšnjih odstavkih tega poglavja.

Izkušnje kažejo, da zgornja vrednost precej odstopa od realnih vrednosti.

Barenblatt je omenjena odstopanja pojasnil s predpostavko, da je treba v vrhu razpoke upoštevati vpliv medmolekularnih sil, ki ustvarjajo tlačne obremenitve in s tem zmanjšujejo vpliv zunanjih nateznih obremenitev. Omenjeni vpliv medmolekularnih sil je tem večji, čim večja je elastičnost materiala. Omenjeno domnevo je s preizkusi potrdil Simeon (doktorska disertacija, Stanford University 1966), ki je ugotovil, da Griffithova teorija drži slabo pri zelo elastičnih materialih, kamor spadajo vsi konstrukcijski materiali, je pa sprejemljiva za neelastične materiale.



Sl. 2.5. Vpliv medmolekularnih sil v koncih razpoke po teoriji Barenblatta

Po teoriji Barenblatta bo prišlo do širjenja razpoke takrat, ko bo zunanja natezna obremenitev večja od tlačnih napetosti, ki jih povzročajo medmolekularne sile.

Razpoke v materialu se bodo torej začele širiti takrat, ko bo zunanja obremenitev primerno velika. V nasprotnem primeru pa bo material, katerega mehanske lastnosti so se sicer spremenile, rabil svojemu namenu.

Če predpostavimo, da je zunanja obremenitev p večja od kritične p_{kr}

$$p_{kr} = n p ; n \leq 1 \quad (2.9)$$

se bodo razpoke začele širiti z neko hitrostjo, ki se bo časovno povečevala in limitirala k neki končni vrednosti.

Mott je omenjeno spreminjanje hitrosti izračunal na osnovi energijske bilance in dobil

$$\dot{a} = \left\{ \frac{2 \pi E}{k' \varrho} \left(1 - \frac{a_0}{a} \right) \left[1 - (2n^2 - 1) \frac{a_0}{a} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.10)$$

Pri tem je k' konstanta, ki je odvisna od vrste materiala in jo je treba določiti s preizkusi, a_0 je prvotna dolžina razpoke, ϱ pa masa na enoto površine materiala, v kateri pride do širjenja razpoke.

Iz relacije (2.10) je razvidno, da se hitrost razpoke za $a \gg a_0$ približuje neki končni konstantni vrednosti v_T

$$v_T = \left(\frac{2 \pi E}{\varrho k'} \right)^{1/2} \quad (2.11)$$

Ker je

$$c_0 = \left(\frac{E}{\varrho} \right)^{1/2}$$

hitrost zvoka v materialu izhaja iz tega, da se hitrost razpoke z njeno rastjo približuje hitrosti zvoka v materialu, ki pomeni mejno hitrost širjenja razpok.

Z rastjo razpok se zmanjšuje koristen prerez mehanskega elementa, kar povzroča rast notranjega napetostnega stanja. V trenutku, ko ta doseže mejo porušitve materiala, pride do »trenutne« porušitve (statični zlom) materiala — hitrost širjenja razpok doseže mejno hitrost v_T .

Širjenje razpok in »trenutna« porušitev torej nista ločena procesa ampak sta samo dva skrajna primera istega zveznega procesa.

3. METODE OPAZOVANJA UTRUJANJA

Pojav utrujenosti lahko torej opišemo kot kombinacijo mikroplastičnih deformacij, ki so posledica delne rasti razpok, ki so že v materialu oziroma se pojavljajo zaradi akumuliranja dislokacij.

Iz navedenega izhaja, da lahko proces utrujanja razdelimo na fazo formiranja razpok, fazo širjenja razpok in fazo »trenutne porušitve«, do katere pride v eni polovici cikla dinamične obremenitve.

V uvodu je bilo že povedano, da ima problem identifikacije stopnje utrujanja izreden tehniški pomen. Znanе metode pa imajo precej pomanjkljivosti. Skoraj vse do sedaj znane metode opazovanja utrujanja omogočajo namreč opazovanje utrujanja v drugi oziroma tretji fazi procesa utrujanja, ki pa, kakor kažejo rezultati preizkusov, pomenita samo približno tretjino celotne dobe trajanja nekoga mehanskega elementa.

Vse omenjene metode lahko razdelimo v čisto preizkusne in preizkusno analitične.

Za slednje je značilno iskanje odvisnosti rasti razpok od števila ciklov zunanje obremenitve v obliki funkcije da/dn . Pri tem je $2a$ dolžina razpoke, n pa število ciklov zunanje obremenitve. Eden prvih, ki se je ukvarjal z omenjeno problematiko je bil Head, ki je obravnaval neskončno ploščo s centralno nameščeno razpoko dolžine $2a$, obremenjeno z enoosno harmonično obremenitvijo amplitude σ . Na osnovi preizkusnih rezultatov je prišel do sklepa, da ima na hitrost širjenja razpoke največji vpliv koncentracija napetosti v vrhu razpoke in predlagal odvisnost

$$\frac{da}{dn} = \frac{c_1 \sigma^3 a^{3/2}}{(\sigma_{ys} - \sigma) p^{1/2}} \quad (3.1)$$

Kjer je σ_{ys} meja plastičnega tečenja, p velikost območja plastičnosti in c_1 konstanta, ki je odvisna od mehanskih lastnosti materiala. Head je predpostavil, da je p konstantna veličina, ki ni odvisna od velikosti razpoke.

Omenjeno trditev sta pozneje popravila Frost in Dugdale, ki sta s preizkusi pokazala, da se koeficient p z rastjo razpoke spreminja. Predlagala sta odvisnost

$$p = \sigma^2 \cdot a \quad (3.2)$$

Lin je opravljal preizkuse z zelo elastičnimi materiali in ugotovil, da je hitrost širjenja (rasti) razpok sorazmerna kvadratu amplitude zunanje obremenitve

$$\frac{da}{dn} = c_3 \sigma^2 a$$

Pri tem je c_3 spet konstanta, ki je odvisna od vrste materiala.

Podobno kakor Head trdita McEvily in Illg, da je za hitrost širjenja razpoke odločilna največja napetost, ki se pojavlja v vrhu razpoke. Po naročilu ameriške vojske sta preizkušala posebne aluminijeve zlitine (z označbo 2024-T3 po NACA) in predlagala model

$$\lg \left(\frac{d a}{d n} \right) = 0,00509 K_s \sigma - 5,472 - \frac{34}{K_s \sigma - 34} \quad (3.3)$$

Pri tem je K_s koeficient intenzivnosti napetostnega stanja v vrhu razpoke.

Paris in Erdogan sta ugotovila, da lahko za večino kovin podamo koeficient intenzivnosti K_s z relacijo

$$K_s = \sigma \sqrt{a} \quad (3.4)$$

Koeficient intenzivnosti se torej spreminja sorazmerno z obremenitvijo in korenomo velikosti razpoke.

Ker so v tehniški praksi lahko obremenitve zelo različnega tipa, je očitno, da je treba konstante, ki se pojavljajo v prej navedenih enačbah, določiti posebej za vsak primer.

To dejstvo seveda bistveno zmanjšuje praktično vrednost omenjenih metod. Kljub temu pomenijo pomemben korak pri proučevanju obnašanja utrujenega materiala. Če poznamo namreč za neki mehanski element model, ki podaja širjenje razpok v odvisnosti od števila ciklov, lahko od trenutka, ko se pojavi dinamična razpoka (tj. razpoka, ki ima tendenco širjenja), naprej napovemo, kdaj bo prišlo do porušitve tega mehanskega elementa.

Pri odkrivanju razpok smo vezani na čisto preizkusne metode, ki spadajo med najstarejše in imajo z razvojem merilnih instrumentov vse večji pomen.

Vse preizkusne metode lahko načeloma razdelimo na:

- nedestruktivne in
- destruktivne, med katerimi je omembe vredna metoda fotoelastičnosti.

Med najstarejše nedestruktivne metode spada vizualna metoda, ki omogoča izključno odkrivanje površinskih napak. Natančnost metode je v veliki meri odvisna od načina osvetlitve in ne nazadnje od kakovosti mikroskopa, ki zamenjuje opazovanje s prostim očesom. Dopolnitev prve metode je metoda pronicujočih tekočin. Bistvo metode je v tem, da na primerno obdelano površino zlijemo barvno ali fluorescenčno tekočino z majhno gostoto in površinsko napetostjo. Tekočina zaradi kapilarnega efekta zalije razpoke in omogoči lažjo identifikacijo. Nekoliko globlje v material lahko sežemo s toplotno metodo, ki sloni na identifikaciji temperaturne porazdelitve v materialu. Vemo namreč,

da se v primeru stacionarnega stanja temperatura porazdeljuje v materialu brez napak linearno. Če material vsebuje kakršne koli napake na površini oziroma njeni neposredni bližini, se omenjena linearnost poruši. Iz nelinearnosti temperaturne porazdelitve sklepamo na velikost in lego razpoke. Slaba stran metode je zahtevna identifikacija porazdelitve temperature. Med zelo uspešne metode spada še vedno metoda radiografije, kjer so rentgenske žarke zamenjali γ žarki z močjo do $30 \cdot 10^6$ eV. Metoda omogoča odkrivanje površinskih napak kakor tudi napak znotraj materiala.

Poleg magnetne metode, ki sloni na identifikaciji porazdelitve magnetnega polja, in ultrazvočne metode je omembe vredna še metoda akustične emisije, ki dobiva vse večji pomen.

Ultrazvočna metoda je trenutno ena najučinkovitejših nedestruktivnih metod.

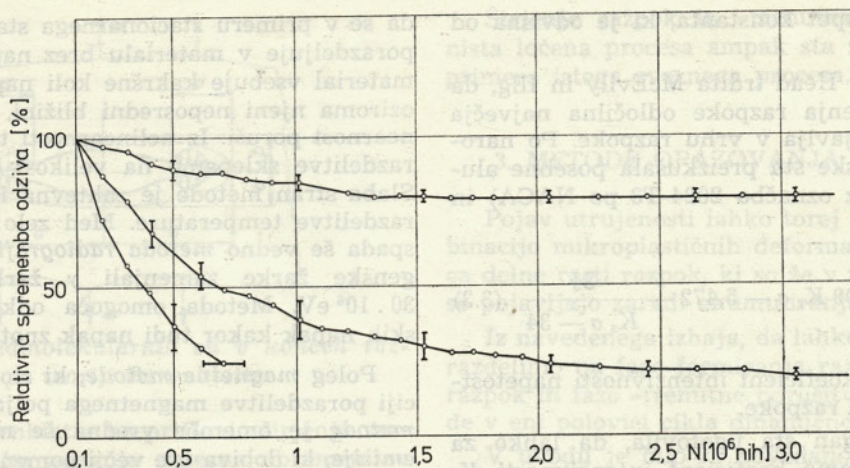
Ker se ultrazvočno valovanje izredno dobro širi po materialu, je mogoča tudi ugotovitev napak, ki ležijo globoko pod površino preizkušanca. V primeru, da je v materialu napaka, spremeni le-ta smer širjenja valovanja, ali ga celo onemogoči. Iz tega sklepamo o velikosti in legi razpoke.

Metoda akustične emisije omogoča izključno odkrivanje že gibajočih se razpok. Pri lokalnih porušitvah materiala v vrhovih razpok se sprosti ultrakratko valovanje, ki ga zaznamo s pomočjo posebnih senzorjev. Iz jakosti signala lahko sklepamo o velikosti porušitve in s tem hitrosti širjenja razpok. Slabost metode je v tem, da na kakovost meritve izredno vpliva navzočnost postranskih шумov, ki lahko skazijo dejanske merilne rezultate.

Med destruktivnimi metodami je vredno omeniti le metodo fotoelastičnosti, ki je pravzaprav edina metoda, ki je dejansko potrdila pravilnost domneve o koncentraciji napetosti in deformacij v vrhu razpoke. Metoda sloni na dejstvu, da je elektromagnetna prepustnost materiala odvisna od pripadajočega koeficienta elastičnosti, ki se v vrhu razpoke zaradi lokalnih elasto plastičnih deformacij spremeni. Glavna slabost metode je destruktivnost in ne nazadnje to, da je razmeroma zelo draga.

Iz pregleda uporabljenih metod za odkrivanje razpok lahko ugotovimo, da omogočajo opazovanje utrujenosti izključno le v končni fazi dobe trajanja trajno dinamično obremenjenega mehanskega elementa. Res je sicer, da je odkrivanje razpok praktično zelo pomembno, ker razpokam večinoma kmalu sledi porušitev. Vendar je iskanje razpok precej nerodna zadeva in tudi nevarna, če z iskanjem zamudimo.

Zato smo se pri svojih raziskavah opazovanja utrujanja materiala in identifikacije stopnje utrujenosti usmerili na drugo področje. Iz vseh v drugem poglavju opisanih sprememb je očitno, da se sestava snovi spreminja že od samega začetka delo-



Sl. 3.1. Relativna sprememba odziva kovinskega preizkušanca v odvisnosti od števila nihajev

vanja dinamične obremenitve. Zaradi spremembe sestave pa zanesljivo pride do sprememb fizikalnih lastnosti in tako lahko raziskujemo, katere spremembe fizikalnih lastnosti bi bilo mogoče uporabljati kot kriterij za določitev stopnje utrujenosti. Za zdaj smo se posvetili dvema vrstama meritev. Obema metodama je skupno to, da sta nedestruktivni, kontrolo pa opravljamo kar med samim procesom obremenjevanja. Obe metodi sta razmeroma preprosto uporabljivi. Druga skupna lastnost pa je ta, da so spremembe opazne ves čas utrujanja materiala in ne šele v fazi, ko nastajajo razpoke.

Pri prvem načinu merimo velikost notranjega trenja kovin med utrujanjem. Tu gre za majhne vrednosti, vendar nas bolj kakor absolutna vrednost zanima relativna sprememba notranjega trenja. Dosedanji rezultati kažejo, da so spremembe notranjega trenja znatne in ves čas opazne, ni pa še jasno, ali so dovolj značilne, da bi bile uporabne za naše namene.

Dlje smo že prišli pri drugi metodi. Tu merimo spremembe v dinamičnem obnašanju mehanskih elementov med utrujanjem. Pokazalo se je, da se odziv elementa na dinamično obremenitev spreminja zvezno in tipično, tako da bo — kakor kaže — mogoče iz meritev odziva mehanskega dela na dinamično obremenitev sklepati o njegovi zgodovini obremenitev in o stopnji utrujenosti. Spremembe so zvezne, enolične in regularne, tako da bo morda mogoče ne samo ugotoviti stopnjo utrujenosti, ampak tudi napovedati nadaljnji potek utrujanja, to se pravi, ali bo element zdržal te vrste obremenitev ali pa bo prišlo do porušitve. Za primer je prikazan na sliki 3.1 potek sprememb odziva jeklenega preizkušanca na dinamično obremenitev za tri različne jakosti obremenitve. Zgornja krivulja velja za majhno obremenitev, srednja je posneta pri obremenitvi, ki jo del še zdrži trajno, najnižja pa kaže potek za primer, ko pride do porušitve že po nekaj sto tisoč nihajih.

4. SKLEPI

Pojavi in težave v zvezi z utrujanjem materiala še niso zadovoljivo razčiščeni in pojasnjeni. Tudi iz prikazanega kratkega pregleda je razvidno, da smo predvsem pri dinamičnih obremenitvah kljub številnim dognanjem in domnevam še vedno vezani predvsem na preizkuse. Metode za opazovanje pojava utrujenosti so uporabne predvsem le v zadnjem obdobju, ko že nastanejo razpoke v materialu. Že od začetka obremenjevanja pa je mogoče ugotavljati stopnjo utrujenosti materiala z merjenjem sprememb notranjega trenja in odziva sistema na dinamične obremenitve. Predvsem druga metoda je po dosedanjih rezultatih sodeč dobro uporabna za ugotavljanje stopnje utrujenosti kovin.

LITERATURA

- [1] A. Kuhelj: Prenosne funkcije mehanskih sistemov pri dinamičnih obremenitvah — 1. del (poročilo o raziskavi).
- [2] A. Kuhelj: Prenosne funkcije mehanskih sistemov pri dinamičnih obremenitvah — 2. del (poročilo o raziskavi).
- [3] A. Kuhelj, I. Emri: Uporaba prenosnih funkcij pri zasledovanju utrujenosti dinamično obremenjenega mehanskega sistema (referat na 13. kongresu mehanike v Sarajevu).
- [4] Dislocation Dynamics; Battle Institute Materials Science Colloqui A; Seattle Washington, USA and Harrison, British Columbia, Canada, May 1—6 1975; McGraw Hill Book Company.
- [5] Mechanical Behavior of Materials under Dynamics Loads; Symposium Held in San Antonio, Texas, September 6—8, 1967, New York 1968.
- [6] Forsyth P. Y. E.: Proceedings of the Crack Propagation Symposium, Cranfield; The College of Aeronautics, Cranfield, 1962, p. 76.
- [7] Irwin G. R.: Fracture Dynamics, In »Fracturing of Metals«, p. 147, ASM, Cleveland 1948.

Naslov avtorjev: dr. mgr. Anton Kuhelj, dipl. ing., docent,
Igor Emri, dipl. ing., asistent,
oba: Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani