UDK 539.432:539.42:539.37

Metoda za ocenjevanje dobe trajanja na podlagi lokalnih raztezkov

BORIS PUKL

1.0. UVOD

Dobo trajanja dinamično obremenjenih konstrukcij lahko ocenjujemo z različnimi računskimi in preizkusnimi metodami. Danes sta znani dve temeljni metodi za računsko ocenjevanje dobe trajanja: metoda na podlagi imenskih napetosti in metoda na podlagi lokalnih raztezkov. Poleg računskih postopkov se uporabljajo tudi različne preizkusne metode s celotnim simuliranjem obremenitev in drugih razmer, ki se pojavljajo med obratovanjem. Pri preizkusnih metodah je napoved dobe trajanja tem bolj zanesljiva, čim bolj natančno simuliramo dejanske obremenitve. Zanesljivost take napovedi je odvisna tudi od števila preizkušenih vzorcev, saj je zaradi velikega razsipanja izmerkov treba s statističnimi metodami oceniti verjetnost loma oz. porušitve konstrukcije. Zaradi dragih preizkuševalnih naprav, dolgotrajnih preiskav in večjega števila potrebnih vzorcev so take preiskave na elementih oz. konstrukcijah izredno drage in tudi ne vedno gospodarsko upravičljive.

Z metodo na podlagi imenskih napetosti ocenjujemo dobo trajanja po izmerjenih ali definiranih kolektivih obremenitev in Wöhlerjevih krivuljah dinamične vzdržljivosti. Za merilo kritične poškodbe konstrukcije uporabljamo »tehnično« razpoko ali porušitev. Dobo trajanja običajno računamo na podlagi hipoteze linearne akumulacije poškodb po Palmgren-Minerju ali njenih modifikacij.

Postopek ocenjevanja dobe trajanja na podlagi lokalnih raztezkov se je razvil iz teoretičnih raziskav na področju mehanike materialov. Vzdržljivost dinamično obremenjenih konstrukcij je odvisna od elastoplastičnega napetostno-deformacijskega stanja, ki se pojavlja v najbolj obremenjeni točki sistema. Na tem spoznanju temelji domneva, da je mogoče dobo trajanja takšnih konstrukcij napovedati, če poznamo časovni potek raztezkov v točki, kjer pričakujemo porušitev, kakor tudi lastnosti materiala pri cikličnem utrujanju v elastoplastičnem področju in lastnosti materiala z vidika mehanike loma. Dobo trajanja do nastanka razpoke ocenjujemo z uporabo kolektiva lokalnih raztezkov in Wöhlerjeve krivulje raztezkov do nastanka razpoke. Poškodbe konstrukcije računamo na podlagi hipoteze linearne akumulacije poškodb po Palmgren-Minerju.

Metoda ocenjevanja dobe trajanja na podlagi lokalnih raztezkov se uporablja v glavnem pri elementih in konstrukcijah različnih naprav v procesni tehniki, kemični industriji in energetiki (visokotlačne posode, cevovodi itd.), kjer se pojavljajo velike obremenitve v elastoplastičnem področju, do približno $5 \cdot 10^4$ nihajev (nizkociklična trdnost) [3,4]. Razmeroma majhne izkušnje pa imamo pri ocenjevanju vzdržljivosti konstrukcij v področju obratovalne trdnosti. V [9] so opisane raziskave na litih in kovanih platiščih avtomobilskih koles iz aluminijevih zlitin. V okviru teh raziskav je bila ocenjena doba trajanja platišč z metodo na podlagi lokalnih raztezkov. Primerjana je bila ocenjena doba trajanja z rezultati preizkusov dobe trajanja na platiščih in gladkih preizkušancih. Ugotovljeno je bilo, da se preizkusi na preizkušancih razmeroma dobro ujemajo z rezultati preizkusov na platiščih. S preizkusi na preizkušancih je bila ocenjena nekoliko krajša ali pa tudi nekoliko daljša doba trajanja v primerjavi s preizkusi na platiščih, odvisno od tega, katera dolžina razpoke je bila ugotovljena kot kritična poškodba. Z metodo na podlagi lokalnih raztezkov (hipoteza linearne akumulacije poškodb po Palmgren-Minerju; vsota poškodb 1) je bila napovedana do dvakrat daljša doba trajanja, kakršna je bila preizkusno ugotovljena na platiščih. Ob upoštevanju vsote poškodb 0,5 pa se preizkusni in računski rezultati dovolj dobro ujemajo.

Opisane raziskave kažejo, da je, v določenih okoliščinah, ta postopek mogoče uporabljati tudi za ocenjevanje vzdržljivosti konstrukcij v področju obratovalne trdnosti, kjer smo do sedaj uporabljali običajne metode. Zaradi pomanjkanja izkušenj je treba od primera do primera preverjati zanesljivost metode ter pri tem upoštevati vse, za dobo trajanja pomembne vplive.

2.0. METODA NAPOVEDI DOBE TRAJANJA NA PODLAGI LOKALNIH RAZTEZKOV

2.1. Opis metode

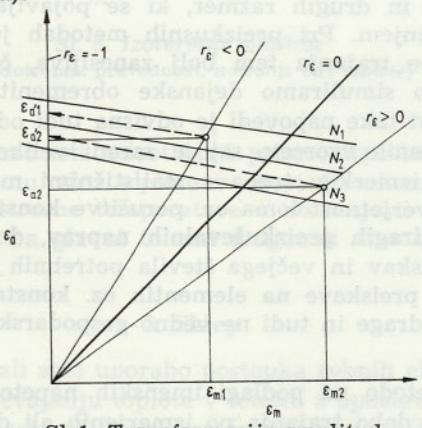
Metoda temelji na domnevi, da se med obratovanjem material v konstrukciji obnaša tako kakor gladki preizkušanec pri enakih obremenitvah. Razpoka v materialu naj bi se pri enakem napetostno-deformacijskem stanju pojavila na preizkušancu in konstrukciji po enakem številu nihajev obremenitve. Pri tej metodi se kot merilo kritične poškodbe uporablja »prva« razpoka in nikoli porušitev. Raziskave so namreč pokazale, da se lahko pri preizkušancih pojavi znatna razlika v dobi trajanja do porušitve v primerjavi s konstrukcijo. Ta razlika gre predvsem na račun faze širjenja razpoke do loma, čeprav so manjše razlike mogoče tudi v fazi nastajanja razpoke [2, 3, 5].

Po metodi na podlagi lokalnih raztezkov je mogoče napovedati dobo trajanja, če poznamo zunanje sile, ki delujejo na konstrukcijo in njihov časovni potek, obliko konstrukcije in njene dimenzije, tehnologijo izdelave in podatke o lastnostih materiala (ciklična krivulja $R - \varepsilon$, Wöhlerjeva krivulja raztezkov do nastanka razpoke ter podatki z vidika mehanike loma glede hitrosti napredovanja razpoke). V najbolj obremenjeni točki konstrukcije (na mestu koncentracije napetosti) se pojavlja elastoplastično deformacijsko stanje, ki lahko prekorači tudi 0,2-odstotno mejo raztezkov. To deformacijsko stanje pri ponavljajočih se obremenitvah primerjamo z vzdržljivostjo materiala pri cikličnem utrujanju v elastoplastičnem področju. Dobo trajanja ocenjujemo na podlagi podatkov o lastnostih materiala in znanega deformacijskega stanja v konstrukciji, za določen potek obremenitev.

Lastnosti materiala pri cikličnem utrujanju v elastoplastičnem področju določamo s preizkusi na preizkušancih, pri čemer moramo upoštevati vse vplive, ki izvirajo iz tehnologije izdelave in razmer obratovanja: anizotropija, stanje površine, predobdelava, velikost obremenitev, hitrost spremembe obremenitev, čas mirovanja na določenem nivoju obremenitve, poprejšnja obremenitev, temperatura itd. Preizkušanci naj bi bili, če je to mogoče, odvzeti iz obravnavane konstrukcije. V fazi snovanja, ko prototip še ni izdelan, odvzemamo preizkušance iz materiala, ki ima glede predobdelave, tehnologije izdelave in zgodovine obremenitev enake lastnosti kakor material konstrukcije, za katero ocenjujemo dobo trajanja.

Velikost in porazdelitev raztezkov sta odvisni od oblike konstrukcije in njenih dimenzij ter od zunanjih sil, ki delujejo na konstrukcijo. Pri obremenitvah v elastoplastičnem področju so lokalni raztezki odvisni tudi od oblike ciklične krivulje $R - \varepsilon$ materiala. Navadno je deformacijsko stanje v konstrukciji večosno in le izjemoma enoosno. Takega večosnega napetostno-deformacijskega stanja ne moremo neposredno primerjati z raztezki pri enoosnem stanju v preizkušancu. Zato je potrebno iz posameznih komponent raztezkov izračunati komponente glavnih raztezkov (v nekaterih primerih jih je mogoče tudi meriti). Iz komponent glavnih raztezkov izračunamo po eni od veljavnih hipotez primerjalni raztezek ter določimo njegov časovni potek. Primerjalni raztezek pa lahko primerjamo z raztezki pri enoosnem deformacijskem stanju v preizkušancu.

Dobo trajanja do nastanka razpoke ocenjujemo na podlagi diagrama pogostosti amplitud primerjalnega raztezka in Wöhlerjeve krivulje raztezkov do nastanka razpoke. Če je srednja vrednost primerjalnega raztezka $\varepsilon_m = 0$, tedaj lahko poškodbe računamo z Wöhlerjevo krivuljo za $r_\varepsilon = \varepsilon_{min}/\varepsilon_{maks} = -1$. V primeru pa, ko je srednja vrednost primerjalnega raztezka $\varepsilon_m \neq 0$, moramo preveriti občutljivost materiala za srednjo vrednost raztezkov M_ε. Občutljivost na srednjo vrednost raztezkov lahko določimo, če imamo na voljo Wöhlerjevi krivulji pri $r_\varepsilon = -1$ i n $r_2 = 0$. Če je $M_\varepsilon \approx 0$, lahko poškodbe računamo z Wöhlerjevo krivuljo pri $r_\varepsilon = -1$. V nasprotnem primeru pa, ko je $M_\varepsilon > 0$, moramo preslikati amplitude pri ugotovljenih razmerjih r_ε v ekvivalentne amplitude pri $r_\varepsilon = -1$. Amplitude primerjalnega raztezka preslikamo na podlagi Haighovega diagrama (sl. 1). Namesto s preslikanimi amplitudami lahko poškodbe računamo tudi z ustreznim parametrom poškodb (npr. parameter po Smithu, Watsonu in Topperju).



Sl. 1. *Transformacija amplitud*

Pomembno vlogo pri natančnosti metode ima kolektiv obremenitev, s katerim je definirana porazdelitev pogostosti amplitud. Oblika kolektiva je odvisna od značilnosti časovnega poteka obremenitev in od postopka štetja amplitud. Različni postopki štetja lahko privedejo do znatnih razlik v porazdelitvi pogostosti amplitud. Če je srednja vrednost primerjalnega raztezka $\varepsilon_m \approx 0$, se navadno uporablja metoda štetja prekoračitve razredov ali pa postopek območnih dvojic. Pri $\varepsilon_m \neq 0$ je treba uporabiti katerega od dvoparametričnih postopkov.

Doba trajanja do porušitve konstrukcije pri številu nihajev N je sestavljena iz števila nihajev do nastanka razpoke N_R in iz števila nihajev faze napredovanja razpoke N_L. Dobo trajanja do nastanka razpoke računamo na podlagi hipoteze linearne akumulacije poškodb po Palmgren-Minerju [2, 3, 5, 6]:

$$\sum_{i=1}^{j} \left(\frac{n}{N}\right)_i \leq D \qquad (1)$$

pri čemer pomenita n število nihajev pri določenem nivoju obremenitev, D pa vsoto poškodb; ta je navadno enaka 1, lahko pa ima tudi kakšno drugo vrednost. Dobo trajanja faze napredovanja razpoke do loma pa ocenjujemo na podlagi podatkov o lastnostih materiala glede na hitrost napredovanja razpoke.

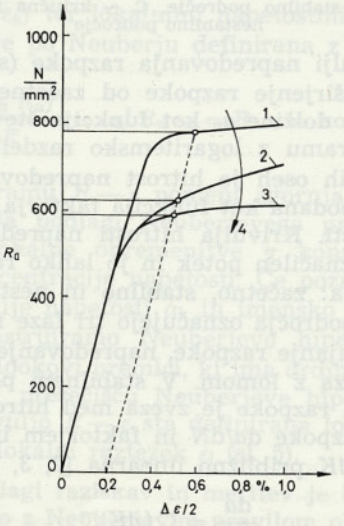
2.2. Lastnosti materiala pri cikličnem utrujanju v elastoplastičnem področju

Za zanesljivo in optimalno dimenzioniranje dinamično obremenjenih konstrukcij običajni podatki o lastnostih materiala, kakor so meja plastičnosti, natezna trdnost, razteznost pri pretrgu, zoženje pri pretrgu in udarna žilavost, ne zadoščajo. Pri metodi ocenjevanja dobe trajanja na podlagi lokalnih raztezkov so potrebni še drugi podatki o lastnostih materiala: ciklična krivulja $R - \varepsilon$, Wöhlerjeva krivulja raztezkov do nastanka razpoke, podatki o lastnostih materiala glede hitrosti napredovanja razpoke in lomna žilavost. Ti podatki natančno označujejo lastnosti in vzdržljivost materiala pri cikličnem utrujanju v elastoplastičnem področju ter so pomembni za pravilno izbiro materiala glede na določen namen uporabe.

2.2.1. Ciklična krivulja $R - \varepsilon$

Ciklična krivulja $R - \varepsilon$ (sl. 2) opisuje zvezo med napetostmi in raztezki pri ponavljajočih se obremenitvah v elastoplastičnem področju ter označuje spremembe trdnostnih lastnosti materiala pri cikličnem utrujanju v primerjavi s krivuljo prve obremenitve. Krivuljo prve obremenitve in ciklično krivuljo $R - \varepsilon$ določamo s preizkusi na gladkih preizkušancih brez zareze ($\alpha_k = 1$). Za zdaj ne obstajajo predpisi ali standardi glede oblike in velikosti preizkušancev, ki imajo lahko krožni ali pravokotni prerez. Ciklično krivuljo $R - \varepsilon$ določamo po metodi naraščajočih korakov ali po njeni obratni metodi, in sicer na preizkuševalnih strojih z možnostjo za krmiljenje raztezkov. Oba postopka sta nadrobno opisana v [12 in 13].

Ciklična krivulja $R - \varepsilon$ je definirana z enačbama [1, 3, 13]:



Sl. 2. *Ciklična krivulja $R - \varepsilon$ in krivulja prve obremenitve*
1 — krivulja prve obremenitve, 2 — ciklična krivulja $R - \varepsilon$, 3 — ciklična krivulja stabiliziranega stanja, 4 — ciklično mehčanje

$$\varepsilon = \frac{R}{E} + \left(\frac{R}{K}\right)^{1/n} \tag{2}$$

oz.

$$\varepsilon = \frac{R}{E} + 0{,}002\left(\frac{R}{R_{p0,2}}\right)^{1/n} \tag{3}$$

kjer je E modul elastičnosti, $R_{p,02}$ dogovorna napetost pri raztezku $\varepsilon = 0{,}2$ odstotka, koeficient K in utrjevalni eksponent n pa sta konstanti materiala. Z enačbama (2) in (3) je opisan potek krivulje $R - \varepsilon$ v elastičnem in plastičnem področju.

S primerjavo ciklične krivulje $R - \varepsilon$ in krivulje prve obremenitve lahko ugotovimo, kako se spreminjajo trdnostne lastnosti materiala pri cikličnem utrujanju v elastoplastičnem področju. Glede na obliko in potek ciklične krivulje $R - \varepsilon$, v primerjavi s krivuljo prve obremenitve, ločimo [2, 3, 5]:

— ciklično utrjevanje: trdnost materiala se povečuje,

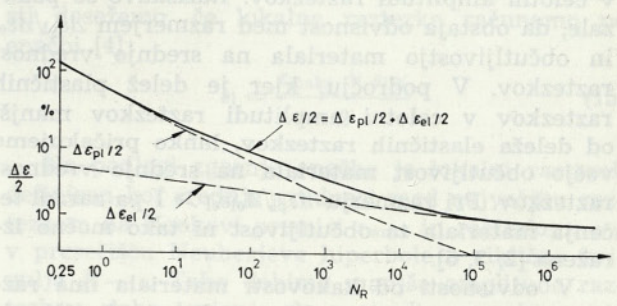
— ciklično mehčanje: trdnost materiala se zmanjšuje in

— neutralno obnašanje: trdnost materiala se ne spreminja.

Spremembe trdnostnih lastnosti pri cikličnem utrujanju so odvisne od kakovosti materiala in tehnologije izdelave.

2.2.2. Wöhlerjeva krivulja raztezkov do nastanka razpoke

Wöhlerjeva krivulja raztezkov do nastanka razpoke označuje vzdržljivost materiala pri ponavljajočih se obremenitvah v elastoplastičnem področju. Wöhlerjeva krivulja raztezkov opisuje odvisnost amplitude raztezkov od števila nihajev do nastanka razpoke: $\Delta\varepsilon/2 = f(N_R)$ (sl. 3). Določamo jo s pulziranjem gladkih preizkušancev krožnega ali pravokotnega prereza. Epruvete navadno pulziramo na treh različnih stopnjah obremenitev s po tremi do petimi preizkušanci na stopnjo [12, 13]. Pulziranje je enostopenjsko s konstantno amplitudo raztezkov pri razmerju $r_\varepsilon = -1$ ali $r_\varepsilon = 0$. Rezultati preiskav so navadno podani s krivuljo 50-odstotne verjetnosti nastanka razpoke in ustreznima mejama zaupanja.



Sl. 3. *Wöhlerjeva krivulja raztezkov do nastanka razpoke*

Odvisnost amplitude raztezkov $\Delta\varepsilon/2$ od števila nihajev do nastanka razpoke N_R lahko zapišemo z enačbo [3, 4]:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = T\,N_R^{-t} + S\,N_R^{-s} \tag{4}$$

Celotna amplituda raztezkov je sestavljena iz amplitude plastičnih raztezkov:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{pl}}{2} = T\,N_R^{-t} \tag{5}$$

in iz amplitude elastičnih raztezkov:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{el}}{2} = S\,N_R^{-s} \tag{6}$$

Konstante s, t, S in T določamo s preizkusi iz Wöhlerjeve krivulje. Za približno presojo vzdržljivosti in poteka Wöhlerjeve krivulje raztezkov do nastanka razpoke lahko pri jeklu računamo z vrednostmi $t = 0{,}6$, $s = 0{,}12$, $T = 0{,}5$ $\{\ln[1/(1 - Z)]\}^{0{,}6}$ in $S = 1{,}75\,R_m/E$, kjer je $Z = (S_0 - S_u)/S_0$ kontrakcija materiala, $R_m = F_m/S_0$ pa natezna trdnost [2, 3, 4, 5].

S pulziranjem preizkušancev pri različnih amplitudah raztezkov lahko določimo tudi ciklično krivuljo $R - \varepsilon$, ki označuje trdnostne lastnosti stabiliziranega stanja materiala (sl. 2). Stabilizirano stanje je definirano z napetostno-deformacijskim stanjem, ki je doseženo pri polovičnem številu nihajev do nastanka razpoke $N_R/2$. Z doseženo amplitudo napetosti pri določeni amplitudi raztezkov je definirana ena točka ciklične krivulje $R - \varepsilon$ stabiliziranega stanja materiala. Celoten potek krivulje dobimo, če med seboj povežemo točke pri različnih amplitudah raztezkov [12].

Iz enačb (5) in (6) lahko izrazimo število nihajev do nastanka razpoke N_R ter obe vrednosti izenačimo. Tako dobimo enačbo krivulje $R - \varepsilon$ stabiliziranega stanja materiala [3]:

$$R_a = S\,E\left(\frac{\varepsilon_{a,pl}}{T}\right)^{s/t} \tag{7}$$

Pomembne lastnosti materiala ugotavljamo na podlagi deleža elastičnih in plastičnih raztezkov v celotni amplitudi raztezkov. Raziskave so pokazale, da obstaja odvisnost med razmerjem $\Delta\varepsilon_{pl}/\Delta\varepsilon_{el}$ in občutljivostjo materiala na srednjo vrednost raztezkov. V področju, kjer je delež plastičnih raztezkov v celotni amplitudi raztezkov manjši od deleža elastičnih raztezkov, lahko pričakujemo večjo občutljivost materiala na srednjo vrednost raztezkov. Pri razmerju $\Delta\varepsilon_{pl}/\Delta_{el}\varepsilon_{el} > 1$ pa zaradi tečenja materiala ta občutljivost ni tako močno izražena [2, 3, 5].

V odvisnosti od kakovosti materiala ima razmerje $r_\varepsilon = \varepsilon_{min}/\varepsilon_{maks}$ različen vpliv na število nihajev do nastanka razpoke. Ta vpliv je definiran z občutljivostjo materiala na srednjo vrednost raztezkov [2, 3, 5].

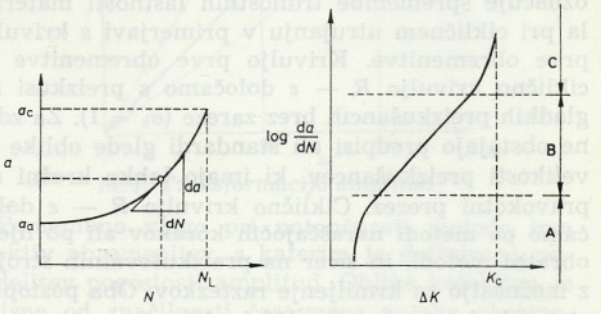
$$M_\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon_{(r_\varepsilon=-1)} - \Delta\varepsilon_{(r_\varepsilon=0)}}{\Delta\varepsilon_{(r_\varepsilon=0)}} \tag{8}$$

V področju nizkociklične trdnosti vpliva tudi frekvenca na število nihajev do nastanka razpoke. Pri normalnih atmosferskih razmerah lahko pričakujemo, da bo pri višjih frekvencah dosežena daljša doba trajanja do nastanka razpoke. Vpliv frekvence na dobo trajanja je v tesni zvezi s korodiranjem materiala. Pri nižjih frekvencah je material dalj časa izpostavljen okoliškim korozivnim snovem [2, 3, 5].

2.2.3 Hitrost napredovanja razpoke

Hitrost napredovanja razpoke je odvisna od intenzivnosti napetosti v konici razpoke ΔK. Intenzivnost napetosti je funkcija razpona imenske napetosti v konici razpoke $\Delta R = R_{maks} - R_{min}$, dolžine razpoke a in geometrijske funkcije $f(a/b)$ [2, 3, 5, 13]:

$$\Delta K = \Delta R\sqrt{a}\,f(a/b) \tag{9}$$



Sl. 4. *Napredovanje razpoke*
a — $a = f(N)$
b — hitrost napredovanja razpoke $da/dN = C(\Delta K)^m$
A — nastajanje razpoke, začetno področje, B — napredovanje razpoke, stabilno področje, C — kritična faza z lomom, nestabilno področje

V krivulji napredovanja razpoke (sl. 4) je ponazorjeno širjenje razpoke od začetne dolžine a_0 do kritične dolžine a_c kot funkcija števila nihajev N. V diagramu z logaritemsko razdelbo na obeh koordinatnih oseh je hitrost napredovanja razpoke da/dN podana kot funkcija faktorja intenzivnosti napetosti. Krivulja hitrosti napredovanja razpoke ima značilen potek in jo lahko razdelimo na tri področja: začetno, stabilno in nestabilno področje. Ta področja označujejo tri faze razvoja razpoke: nastajanje razpoke, napredovanje razpoke in kritična faza z lomom. V stabilnem področju napredovanja razpoke je zveza med hitrostjo napredovanja razpoke da/dN in faktorjem intenzivnosti napetosti ΔK približno linearna [2, 3, 5, 13]:

$$\frac{da}{dN} = C\,(\Delta K)^m \tag{10}$$

kjer sta koeficient C in eksponent m konstanti materiala.

Iz enačb (8) in (9) lahko izračunamo število nihajev faze napredovanja razpoke [2, 3, 5]:

$$N_L = N - N_R = \frac{(\Delta R)^m}{C} \int_{a_0}^{a_c} [f(a/b)]^{-m} a^{-m/2} \, da \qquad (11)$$

Pri kritični dolžini razpoke a_c pride do porušitve. V konici razpoke je tedaj dosežen kritični faktor intenzivnosti napetosti ΔK_c [13]:

$$\Delta K_c = \Delta R \sqrt{a_c} f(a_c/b) \qquad (12)$$

Pomembna veličina, ki označuje lastnost materiala je tudi lomna žilavost K_{IC}, s katero je definiran začetek nestabilnega širjenja razpoke. Lomna žilavost je lahko enaka ali manjša od kritičnega faktorja intenzivnosti napetosti [13]:

$$K_{IC} \leqq K_c. \qquad (13)$$

2.3. Napetostno — deformacijsko stanje v konstrukciji

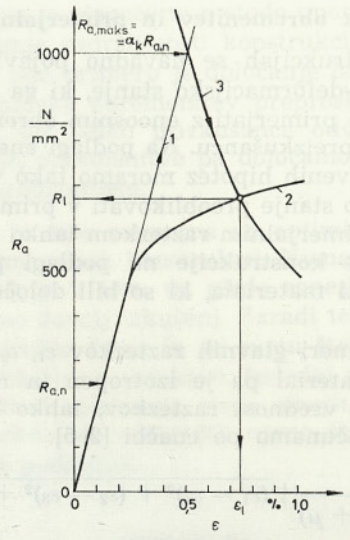
Zunanje sile povzročajo elastoplastično napetostno — deformacijsko stanje v konstrukciji, ki lahko prekorači 0,2-odstotno mejo raztezkov. Obremenitve v konstrukciji so odvisne od velikosti zunanjih sil ter od oblike in dimenzij konstrukcije.

Splošna analitična rešitev zveze med obtežbo in napetostno-deformacijskim stanjem za poljubno obliko konstrukcije ni znana. Numerični izračuni po MKE so v načelu mogoči, vendar so razmeroma dragi in precej zamudni. Zaradi tega se v praksi pogosto uporabljajo približne rešitve. Najbolj znana je približna rešitev, ki jo je predlagal Neuber. Zveza med imenskimi obremenitvami (R_n in ε_n) ter lokalnimi napetostmi in raztezki (R_l in ε_l) je po Neuberju definirana z enačbo [10, 13]:

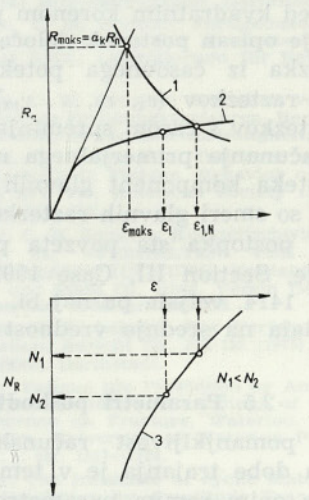
$$\frac{(\alpha_k R_n)^2}{E} = \alpha_k^2 R_n \varepsilon_n = R_l \varepsilon_l = \text{konst.} \qquad (14)$$

V diagramu $R - \varepsilon$ pomeni zgornja enačba hiperbolo. Na podlagi Neuberjevega pravila lahko ocenimo lokalne obremenitve v konstrukciji na mestu koncentracije napetosti. Če poznamo faktor koncentracije napetosti α_k in imensko napetost R_n lahko konstruiramo Neuberjevo hiperbolo skozi točko na Hookovi premici, ki ima ordinato $R_{maks} = \alpha_k R_n$. V presečišču Neuberjeve hiperbole s ciklično krivuljo $R - \varepsilon$ sta definirana lokalna napetost R_l in lokalni raztezek ε_l (sl. 5).

Na podlagi raziskav in meritev je bilo ugotovljeno, da so z Neuberjevim pravilom običajno ocenjene nekoliko prevelike vrednosti lokalnih raztezkov. Pri večjih amplitudah raztezkov pa je število nihajev do nastanka razpoke manjše (sl. 6). Zaradi



Sl. 5. *Neuberjevo pravilo*
1 — Hookova premica, 2 — ciklična krivulja $R - \varepsilon$, 3 — Neuberjeva hiperbola $\alpha_k^2 R_n \varepsilon_n = R_1 \varepsilon_1 = \text{konst.}$



Sl. 6. *Lokalni raztezki in število nihajev do nastanka razpoke*
1 — Neuberjeva hiperbola, 2 — ciklična krivulja $R - \varepsilon$, 3 — Wöhlerjeva krivulja

tega so z raztezki, ki so določeni na podlagi enačbe (14), praviloma ocenjene krajše dobe trajanja. Boljše ujemanje izračunanih in dejanskih vrednosti dosežemo, če lokalne raztezke računamo po enačbi [4]:

$$\varepsilon_l = \frac{\varepsilon_{maks} + \varepsilon_{l,N}}{2} \qquad (15)$$

Na podlagi zgornje enačbe je lokalni raztezek definiran kot srednja vrednost med največjim raztezkom na Hookovi premici ε_{maks} in raztezkom $\varepsilon_{l,N}$ v presečišču Neuberjeve hiperbole s ciklično krivuljo $R - \varepsilon$. Tako dobimo manjše amplitude raztezkov, doba trajanja do nastanka razpoke pa je daljša (sl. 6).

2.4. Potek obremenitev in primerjalni raztezek

V konstrukcijah se navadno pojavlja večosno napetostno-deformacijsko stanje, ki ga ne moremo neposredno primerjati z enoosnim obremenitvenim stanjem v preizkušancu. Na podlagi ene od veljavnih porušitvenih hipotez moramo tako večosno deformacijsko stanje preoblikovati v primerjalni raztezek. S primerjalnim raztezkom lahko ocenjujemo vzdržljivost konstrukcije na podlagi podatkov o vzdržljivosti materiala, ki so bili določeni na preizkušancih.

Če so smeri glavnih raztezkov ε_1, ε_2 in ε_3 konstantne, material pa je izotropen in ni občutljiv na srednjo vrednost raztezkov, lahko primerjalni raztezek računamo po enačbi [2, 5]:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\sqrt{2}\,(1+\mu)} \sqrt{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2} \tag{16}$$

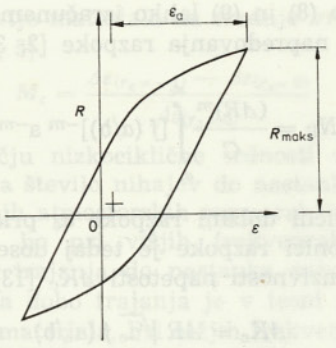
kjer je μ rezultirajoče število prečne kontrakcije, sestavljeno iz deležev plastičnih in elastičnih raztezkov. V pretežno plastičnem področju je $\mu \approx 0{,}5$, pa izraz pred kvadratnim korenom preide v $\sqrt{2}/3$. V [2 in 5] je opisan postopek določanja primerjalnega raztezka iz časovnega poteka posameznih komponent raztezkov (ε_x, ε_y, ... γ_{zx}), če se smeri glavnih raztezkov s časom spreminjajo, kakor tudi postopek računanja primerjalnega raztezka iz časovnega poteka komponent glavnih raztezkov (ε_1, ε_2 in ε_3), če so smeri glavnih raztezkov konstantne. Predlagana postopka sta povzeta po priporočilih ASME Code, Section III, Case 1592-7, točka TN 1413 in TN 1414, veljala pa naj bi, če je občutljivost materiala na srednjo vrednost raztezkov zanemarljiva.

2.5. Parametri poškodb

Glavna pomanjkljivost računskih postopkov ocenjevanja dobe trajanja je v tem, da poškodbe računamo z enim samim parametrom, ki je običajno amplituda obremenitev. Kakor vemo, je proces utrujanja materiala odvisen od številnih dejavnikov, ki v večji ali manjši meri vplivajo na vzdržljivost konstrukcije. Zaradi tega tak proces ne moremo v vseh primerih zadovoljivo opisati z eno samo spremenljivko.

Pri računanju akumulacije poškodb v področju elastoplastičnih obremenitev uporabljamo različne parametre poškodb. Če je občutljivost na srednjo vrednost raztezkov zanemarljiva, lahko akumulacijo poškodb računamo z amplitudami (primerjalnega) raztezka. Nasprotno pa, če je $M_\varepsilon > 0$, moramo uporabiti parameter poškodb, s katerim bo zajet vpliv srednje vrednosti raztezka na akumulacijo poškodb. Poleg še nekaterih drugih je najbolj znan parameter po Smithu, Watsonu in Topperju. Definiran je kot funkcija napetosti in raztezka [1, 6, 9 ,11]:

$$P_{SWT} = \sqrt{R_{maks}\,\varepsilon_a\,E} = \sqrt{(R_m + R_a)\,\varepsilon_a\,E} \tag{17}$$



Sl. 7. *Parameter poškodb po Smithu, Watsonu in Topperju* $P_{SWT} = R_{maks}\,\varepsilon_a\,E$

Parameter poškodb po Smithu, Watsonu in Topperju ustreza delu, ki je vloženo v material. Največjo napetost R_{maks} in amplitudo raztezka ε_a določamo za vsako sklenjeno histerezno zanko (sl. 7). Za določen potek obremenitev dobimo različne vrednosti parametra, s katerimi računamo akumulacijo poškodb. Dobo trajanja ocenjujemo na podlagi Wöhlerjeve krivulje vzdržljivosti, ki pa mora biti izražena z istim parametrom.

V področju elastoplastičnih obremenitev, kjer je delež elastičnih obremenitev večji od deleža plastičnih obremenitev, vpliv občutljivosti materiala na srednjo vrednost raztezkov ni več mogoče zadovoljivo obravnavati z opisanim parametrom. V čisto elastičnem področju preide parameter poškodb po Smithu, Watsonu in Topperju v funkcijo napetosti. Tedaj je treba upoštevati občutljivost materiala na srednjo vrednost napetosti.

3.0 DEJAVNIKI, KI VPLIVAJO NA DOBO TRAJANJA

Dejavniki, ki vplivajo na dobo trajanja konstrukcije so: material, konstrukcijska izvedba (oblika in dimenzije), obremenitve, tehnologija izdelave, razmere obratovanja in okolje. Vsi vplivi so med seboj povezani in jih ne moremo obravnavati ločeno.

Lastnosti materiala pri cikličnem utrujanju v elastoplastičnem področju so zelo pomembne za vzdržljivost konstrukcij pod vplivom dinamičnih obremenitev. Od teh lastnosti je odvisna pravilna izbira materiala za določen namen uporabe. Material izbiramo že v fazi snovanja konstrukcije, in sicer glede na razmere obratovanja in tehnologijo izdelave. Poleg zadostne trdnosti mora material imeti čim višje, od števila nihajev odvisno, razmerje med deležema plastičnih in elastičnih raztezkov $\Delta\varepsilon_{pl}/\Delta\varepsilon_{el}$ ter mora pri določeni amplitudi raztezkov vzdržati čim večje število nihajev do nastanka razpoke. Material mora imeti tudi veliko lomno žilavost, pri določenem faktorju intenzivnosti napetosti ΔK pa čim nižjo hitrost napredovanja razpoke da/dN [3, 4].

Pri dinamičnih obremenitvah v elastoplastičnem področju je doba trajanja do nastanka razpoke odvisna od velikosti najbolj obremenjenega prostorninskega elementa materiala, nanjo pa vplivajo tudi nehomogene trdnostne lastnosti materiala, ki so posledica predelave ter mehanske in toplotne obdelave. Na fazo napredovanja razpoke vplivajo oblika in dimenzije konstrukcije, kakor tudi porazdelitev raztezkov vzdolž področja širjenja razpoke.

Tehnologija izdelave ima velik pomen za vzdržljivost konstrukcij in njihovo dobo trajanja. Različni postopki preoblikovanja ter mehanske in toplotne obdelave vplivajo na trdnostne lastnosti materiala ter na spreminjanje teh lastnosti v odvisnosti od smeri. Pri hladnem preoblikovanju se lahko, glede na stopnjo preoblikovanja in vrsto materiala, doba trajanja konstrukcije v področju nizkociklične trdnosti skrajša, podaljša ali pa ostane nespremenjena. Prav tako površinska hrapavost močno vpliva na vzdržljivost konstrukcije. V splošnem velja: čim večja je površinska hrapavost, tem krajša je doba trajanja do nastanka razpoke.

V področju nizkociklične trdnosti so vplivi okolja v tesni zvezi s hitrostjo spreminjanja obremenitev oz. s frekvenco. Različne snovi (zrak, plini in tekočine) kakor tudi tlak in temperatura pospešujejo korodiranje v materialu. Ti procesi so bolj izraziti pri nižjih frekvencah in daljših časih mirovanja na določeni stopnji obremenitev. Še zlasti škodljivo vplivajo agresivne snovi, pri nizkih frekvencah in visokih obremenitvah.

Pri metodi ocenjevanja dobe trajanja na podlagi lokalnih raztezkov je treba analizirati vse dejavnike, ki vplivajo na dobo trajanja ter jih upoštevati pri preiskavah za določanje lastnosti materiala. Ti vplivi so pomembni pri določanju oblike in velikosti in števila preizkušancev ter pri določanju pogojev preiskav (frekvenca, temperatura itd.). Na rezultate preiskav vpliva tudi material za izdelavo preizkušancev, saj je pomembno, na katerem mestu in v kateri smeri je bil odvzet.

4.0 SKLEP

Z opisano metodo je mogoče že v fazi snovanja in dimenzioniranja oceniti dobo trajanja konstrukcije, kar ni primer pri drugih računskih in preizkusnih metodah. Ker v tej fazi razvoja prototip še ni izdelan, obremenitev ne moremo meriti. Zaradi tega jih določamo analitično ali pa izkustveno na podlagi znanih potekov zunanjih sil oz. obremenitev za podobne konstrukcije. Pri tej metodi v načelu ne potrebujemo prototipa ali serijskega izdelka; konstrukcijo potrebujemo za preverjanje zanesljivosti metode in potrditev napovedane dobe trajanja.

Seveda pa je mogoče to metodo uporabljati tudi za ocenjevanje vzdržljivosti konstrukcij v serijski izdelavi. V tem primeru je določanje lastnosti materiala in poteka obremenitev preprostejša in zanesljivejša, saj lahko prizkušance odvzemamo iz konstrukcije, obremenitve pa določamo z meritvami med obratovanjem.

Metoda je zelo primerna za optimiranje dinamično obremenjenih konstrukcij. Njena glavna pomanjkljivost je v tem, da glede zanesljivosti metode nimamo dovolj izkušenj. Zaradi tega potekajo na tem področju doma in po svetu številne teoretične in aplikativne raziskave. Izsledki teh raziskav naj bi razširili spoznanja glede omejitev pri uporabi te metode ter omogočili njeno širšo uporabo na različnih področjih.

LITERATURA

[1] O. Baxbaum, H. Oppermann, H.-G .Köbler und D. Schütz (LBF) Chr. Boller, P. Heuler und T. Seeger (THD): Vergleich der Lebensdauervorhersage nach dem Kerbgrundkonzept und dem Nennspannungskonzept. Bericht Nr. FB-169 (1983); Fraunhofer — Institut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt.

[2] V. Grubišić, C. M. Sonsino: Festigkeitsbeurteilung von Bauteilen aus Stahl in Bereich der Kurzzeitschwingfestigkeit. Bericht Nr. TB-134 (1977); Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt.

[3] V. Grubišić, C. M. Sonsino: Festigkeit von Hochdruckbehältern für neuartige Fertigungsverfahren. Bericht Nr. FB-148 (1979); Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt.

[4] V. Grubišić, C. M. Sonsino: Influence of Local Strain Distribution on Low-Cycle Fatigue. Behavior of Thick-Walled Structures ASTM STP 770; American Society for Testing and Materials, 1982, str. 612—629.

[5] V. Grubišić, C. M. Sonsino: Kurzzeitschwingfestigkeit bei Raumtemperatur. In: »VERHALTEN VON STAHL BEI SCHWINGENDER BEANSPRUCHUNG« Kontaktstudium Werkstoffkunde Eisen und Stahl III, Hrsg. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf 1979, str. 308—318.

[6] E. Haibach, H. P. Lehrke: Das Verfahren der Amplituden-Transformation. Bericht Nr. FB-125 (1975); Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt.

[7] E. Haibach: Fatigue life Prediction by Amplitude Transformation. In: »Fracture 1977«; Proceedings of the Fourth International Conference on Fracture, Waterloo, June 1977; Ed. by D. M. R. Taplin, University of Waterloo Press, Waterloo, Ontario 1977, Vol. 2, str. 1117—1124.

[8] E. Haibach: The Influence of cyclic Material Properties on Fatigue Life Prediction by Amplitude Transformation. In: »APPLICATIONS OF COMPUTERS IN FATIGUE«; str. 11.1 do 11.25; S. E. E. International Conference 3—6th April 1978, University of Warwick, Coventry.

[9] H. Lowak, V. Grubišić: Möglichkeiten zur Lebensdauervorhersage für Bauteile aus Aluminiumlegierungen. Materialprüfung Band 27 (1985), št. 11, str. 337—343.

[10] H. Neuber: Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentrationen bei Festigkeitsberechnungen. Konstruktion 20 (1968), št. 7, str. 245—250.

[11] K. N. Smith, P. Watson, T. H. Topper: A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals. Journal of Materials 5 (1970), št. 4, str. 767—778.

[12] C. M. Sonsino: Bedeutung von Aufnahmenverfahren zur Ermittlung von zyklischen Spannungs — Dehnungs — Kurven. In: »Kurzzeit — Schwingfestigkeit und elasto-plastisches Werkstoffverhalten-; 5 Sitzung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit 8./9. 10. 1979 in Stuttgart, Hrsg.: K.-T. Rie u. E. Haibach, Deutscher Verband für Materialprüfung, Berlin (1979), str. 221—229.

[13] C. M. Sonsino: Ermittlung anwendungsrelevanter Werkstoffkenngrössen für schwingbeanspruchte pulvermetallurgische Bauteile. Powder Metallurgy International 14 (1982), št. 4, str. 20—22; 15 (1983), Nr. 1, str. 1—3; (1983), št. 2, str. 9—13.

Avtorjev naslov: mag. Boris Pukl, dipl. inž.,
Zavod za raziskavo materiala
in konstrukcij
Ljubljana, Dimičeva 12