

UDK 539.424:624.014.25

Lomna žilavost — merilo za ocenjevanje kritičnosti planarnih diskontinuitet

VLADO GLIHA

1. UVOD

V zadnjem času projektirajo in gradijo v svetu kar se da obremenjene konstrukcije. Vzroki so komercialne narave. Iz enakih razlogov moramo tudi pri nas iti v korak s časom. Tovarna *Metalna* je eden večjih domačih izdelovalcev jeklenih konstrukcij. Pri gradnji močno obremenjenih konstrukcij smo začeli uporabljati vse debelejša materiale in materiale s povišano mejo plastičnosti. Pri teh konstrukcijah so diskontinuitete v zvarih zelo pomembne za njihovo varno uporabo. To so plinski vključki, vključki žlindre, zajede, neprevarjeni koreni, zlepljena mesta in razpoke. Znano je, da ni mogoče izdelovati popolnoma homogenih zvarov. Večje diskontinuitete je z neporušnimi preiskavami zvarov sicer mogoče odkriti. Če so prevelike, zvar popravimo, vendar lahko to pusti kvarne posledice za mehanske in metalurške lastnosti materiala. Te lastnosti v zvarih ne smejo biti slabše od lastnosti osnovnega materiala. Zato je treba poznati vse posledice znatnega lokalnega dovajanja toplote pri varjenju in hitrega neenakomernega ohlajanja takoj po njem. To ima za posledico precejšnje notranje napetosti in vrsto metalurških sprememb v osnovnem materialu in v samem zvaru. Pri večjih debelinah varjenih materialov so ti učinki še izrazitejši. Zato je osrednje vprašanje pri sami izdelavi močno obremenjenih konstrukcij prav tehnologija varjenja. Predpisi, ki govorijo o kakovosti zvarov za različne vrste konstrukcij, dopuščajo majhne prostorske diskontinuitete. Planarnih diskontinuitet, predvsem zlepljenih mest in razpok, ne dopuščajo. Zaznavnost neporušnih preiskav, ki omogočajo odkriti te diskontinuitete, je omejena. Zato je tudi ob najustreznejši tehnologiji varjenja in ob njenem doslednem izvajanju treba računati v zvarih zmeraj tudi s planarnimi diskontinuitetami. Niso redki primeri, da se zaradi neprimernih lastnosti materiala, zaradi planarnih diskontinuitet porušijo cele konstrukcije.

Za varnost zgrajene konstrukcije torej ni odločilna nosilnost osnovnega materiala, ampak pogostost, velikost in oblika diskontinuitet v zvarih. Zmanjšanje nosilnega prereza zvara, če so diskontinuitete majhne, ni veliko. Pomembnejši so učinki koncentracije napetosti, ki so najizrazitejši pri neugodno usmerjenih planarnih diskontinuitetah. Konstrukcijski materiali so zmožni deloma absorbirati koncentracijo napetosti ob konicah planarnih diskontinuitet. Če dosežemo, da so te lastnosti zadovoljive tudi pri zvaru, lahko vpliv majhnih diskontinuitet zanemarimo. Merilo za stabilnost planarne diskontinuitete je lomna žilavost materiala

v neposredni bližini njene konice. Že pri izbiri tehnologije varjenja je treba upoštevati lomne lastnosti materiala. Nato jih je treba med celotno gradnjo konstrukcije redno spremljati. Hkrati je treba z najprimernejšo metodo neporušnih preiskav kontrolirati kakovost izdelanih zvarov. Primerna stopnja lomnih lastnosti celotnega materiala ter omejeno in nadzorovano pojavljanje diskontinuitet v zvarih zagotavljata varnost pri dimenzioniranju konstrukcij.

Lom materialov zaradi planarnih diskontinuitet obravnava lomna mehanika, ki je posebno področje fizike trdne snovi. Za analitično izražanje preprostejša linearna lomna mehanika obravnava lom krhkih materialov ter lom materialov, ki so obremenjeni precej pod mejo plastičnosti. Nelinearna lomna mehanika upošteva tudi plastično preoblikovanje materialov in je primerna za obravnavo tako imenovanih polkrhkih materialov. V linearni lomni mehaniki je merilo za porušitev kritični faktor intenzivnosti napetosti K_I . V nelinearni lomni mehaniki kot merilo najpogostejše srečujemo kritično velikost odprtja konice razpoke δ_c (COD) in kritično vrednost krivuljnega integrala J_c .

Namen članka je seznaniti bralce z osnovami teorije loma obremenjenih materialov. V njem bomo obravnavali teoretične osnove in omenili eksperimentalne metode lomne mehanike.

2. ZLOM MATERIALA ZARADI PLANARNE DISKONTINUITETE

V primerjavi s homogenim zvarom se nosilnost zvarov s planarnimi diskontinuitetami zmanjša. Nosilni prerez zvara se zmanjša za samo velikost diskontinuitete. Ta s svojimi ostrimi konturami povzroča dodatno še koncentracijo napetostnih silnic. Teoretični faktor koncentracije napetosti K_t je odvisen od velikosti diskontinuitete a in od krivinskega radija konice ρ

$$K_t \propto \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (1)$$

S povečanjem ostrine planarne diskontinuitete se velikost krivinskega radija bliža ničli. Teoretični faktor koncentracije napetosti raste tako čez vse meje. V mejnem primeru vodikovih, vročih ali utrujenostnih razpok v idealno elastičnem materialu bi bile napetosti ob konici neskončne. Za razliko od idealno elastičnega se realni materiali od neke napetosti naprej plastično deformirajo. Nato se v odvisnosti od žilavosti pretrgajo. Zato pride ob konici planarne diskontinuitete najprej do tvorbe

plastične cone. Zaradi nje so napetosti ob konici diskontinuitete manjše. Z nadaljnjim povečevanjem obremenitve se plastična cona veča. V nekem, za lom kritičnem trenutku, se začne pojavljati razpoka. Razpoka raste najprej počasi. Ko postanejo njene dimenzije kritične, razpoka steče. Posledica tega je navidezni trenutni zlom konstrukcije.

Lom konstrukcijskih materialov je po značaju in po strukturi preloma krhek ali polkrhek. Pri prvem je plastična cona tako majhna, da jo lahko zanemarimo. Analitično lahko lom obravnavamo z linearno lomno mehaniko. Pri polkrhkem lomu je velikost plastične cone znatna, njenega vpliva pa ne moremo zanemarjati. V tem primeru je analitično lom mogoče obravnavati le z nelinearno lomno mehaniko.

Značaj loma določa velikost nastale plastične cone tik pred zlomom. Ta je odvisna od materialnih lastnosti, temperature materiala, hitrosti obremenjevanja in napetostnega stanja. Materiali so lahko bolj ali manj krhki. Pri nizkih temperaturah je krhkost bolj izrazita kakor pri visokih. Če naraste obremenitev hitro, se material obnaša bolj krhko kakor običajno. Troosno natezno napetostno stanje lahko povzroča krhek zlom tudi izrazito žilavih materialov.

Kdaj se material zaradi planarne diskontinuitete zlomi, ni odvisno samo od materialnih lastnosti in velikosti diskontinuitete. Tudi lega, usmerjenost in ostrina diskontinuitete vplivajo na zlom. Po velikosti enaka diskontinuiteta na površini materiala povzroči zlom dosti prej kakor tista v notranjosti. Material s planarnimi diskontinuitetami, ki niso pravokotne na napetostne silnice ali pa niso ostre, lahko prenaša večje obremenitve.

Zaradi varnosti pri dimenzioniranju konstrukcij ob upoštevanju lomnih lastnosti materiala, obravnavamo ponavadi v lomni mehaniki vse vrste planarnih diskontinuitet kot razpoke. Pri nekaterih preizkusih uporabljajo zarezo z definirano ostrino. Razpoka je diskontinuiteta z največjo ostrino konice. Njeni vplivi na poslabšanje nosilnosti so največji. Če so eksperimentalni ali pa teoretični podatki dobljeni na osnovi takšne diskontinuitete, ni možnosti, da bi nevarnost zloma podcenjevali. V eksperimentalni lomni mehaniki naredimo razpoko z utrujanjem pri majhni amplitudi. Material z razpoko nato obremenjujemo tako dolgo, da se začne razpoka večati. Velikost obremenitve ali pa kakšne druge veličine tik pred tem ter dimenzije razpoke omogočajo izračun lomne žilavosti.

Lomne lastnosti zvarov ugotavljamo na osnovi preizkušancev, ki jih izdelamo iz dovolj velikega varilnega talona. Med gradnjo konstrukcije zavarimo talon hkrati s preizkušanim zvarom. Celoten tehnološki postopek priprave talona mora biti ravno tak kakor pri pripravi zvarov na konstrukciji. Ker je talon velik, so tudi lastnosti obeh zvarov

enake. Pri izdelavi preizkušancev je treba paziti, da se zaradi mehanskih ali toplotnih vplivov lastnosti ne spremenijo.

Pri študiju lomnih lastnosti zvarov na konstrukciji moramo upoštevati tudi prispevek notranjih napetosti. Te je s preizkusi težko določiti. Njihov vpliv se včasih skuša zajeti že pri samem ugotavljanju lomnih lastnosti. V tem primeru morajo biti preizkušanci posebno veliki. Notranje napetosti so tako enake kakor v zvarih na konstrukciji. Zato lahko pri študiju upoštevamo samo vpliv zunanjih obremenitev. Vrednost lomne žilavosti zvarov na konstrukciji je za prispevek notranjih napetosti tako že korigirana.

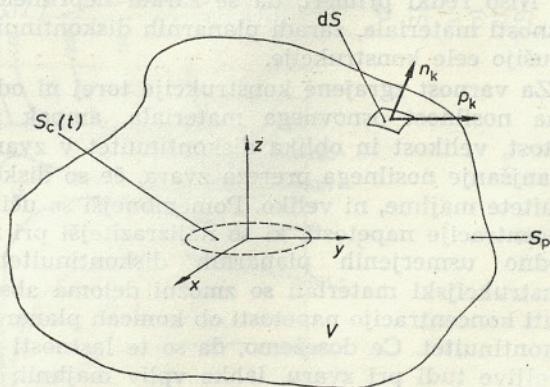
V eksperimentalni lomni mehaniki lahko preizkušance razdelimo na majhne (*small scale*), velike (*large scale*) in na modele v naravni velikosti (*full scale*). Večinoma so postopki za eksperimentalno določanje lomne žilavosti dobro vpeljani. Nekateri so že standardizirani [1, 2]. Najpogostejše srečujemo naslednje:

Majhni preizkušanci, kakršni so Charpyjevi, CT (*compact tension*), upogibni preizkušanci itd., omogočajo, da lahko določamo izključno lomne lastnosti samega materiala. Z velikimi preizkušanci, kakršni so DN (*deep notch*), WP (*wide plate*), CWT (*cross welded tension*) itd., zajamemo deloma tudi vpliv notranjih napetosti. Najkompleksnejše in najpopolnejše podatke dobimo s preizkusi, opravljenimi na modelih. Takrat so prav vsi parametri enaki kakor na konstrukciji. Takšni preizkusi pa so navadno izredno dragi.

3. ENERGIJSKO RAVNOTEŽJE — IZHODIŠČE ZA ŠTUDIJ LOMA

Namen tega dela je analitično popisati veličine, ki imajo odločilno vlogo pri lomu materialov.

Obravnavamo razpoko znotraj prostornine V (slika 1). Material naj bo homogen in izotropen. V vsakem trenutku so vse oblike energije v ravnotežju z opravljenim delom in dovedeno toploto.



Sl. 1. Razpoka $S_c(t)$ v prostornini V

Enakost velja tudi za njihove odvode:

$$\dot{A} + \dot{Q} = \dot{W}_n + \dot{W}_k + \dot{I} \quad (2)$$

kjer pomenijo:

A — delo, Q — toplota, W_n — notranjo energijo, W_k kinetično energijo in I — lomno energijo (energijo, potrebno za nastanek nove površine).

Usmerimo koordinatni sistem tako, da ležita osi x in y v ravnini razpoke. V prostornini V definiramo komponente napetosti σ_{jk} , raztezkov ε_{jk} , pomikov u_k in masne sile F_k . Vsi dovodi in odvodi toplote na enoto mase so q . Na površini S_p definiramo komponente normale n_k , napetosti p_k in gostote toplotnega toka j_k . Ko se razpoka večja, se spreminja njena površina $S_c(t)$. Postavimo, da to povečanje ne vpliva na povečanje prostornine V . Raztezki znotraj in na površini S_p so infinitezimalni. Zapišimo eksplicitno člene enačbe (2).

$$\dot{A}(t) = \int_{S_p} p_k \dot{u}_k dS + \int_V F_k \dot{u}_k dV \quad (3)$$

$$\dot{Q}(t) = - \int_{S_p} j_k n_k dS + \int_V \rho q dV \quad (4)$$

$$\dot{W}_n(t) = \int_V \dot{w}_n dV = \int_V \rho c \dot{T} dV + \int_V \sigma_{jk} \dot{\varepsilon}_{jk} dV \quad (5)$$

$$\dot{W}_k(t) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \dot{u}_k^2 dV = \int_V \rho \dot{u}_k \ddot{u}_k dV \quad (6)$$

$$\dot{I}(t) = \gamma \dot{S}_c(t) \quad (7)$$

kjer pomenijo:

ρ — gostoto mase, c — specifično toploto, w_n — gostoto notranje energije, γ — površinsko gostoto lomne energije.

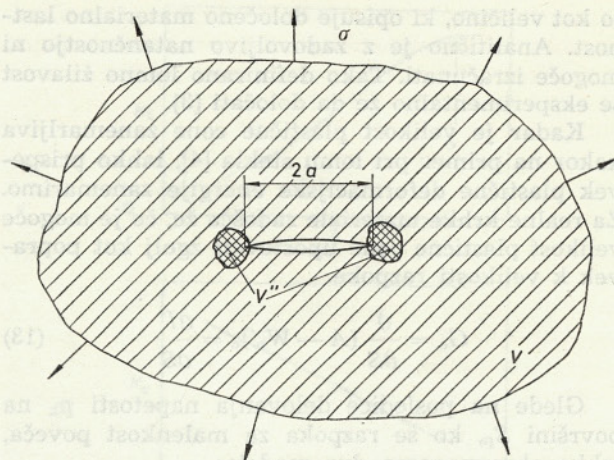
γ je količina energije, potrebna za nastanek nove enote površine. Idealno krhki lom ustreza cepljenju medatomskih vezi. Torej je konstanta γ odvisna samo od medatomskih sil. Pri lomu realnih materialov se pojavlja tudi plastična deformacija. Tako definirano konstanto γ_{ef} je treba zato določiti s preizkusi. Pogosto se vzame, da je γ_{ef} konstanta.

Del prostornine V ob konici razpoke, kjer pride do plastifikacije, označimo z V'' . Ostanek, kjer so deformacije samo v elastičnem območju, je V' (slika 2). Delež deformacijske notranje energije v W_n se da razdeliti v dva dela. Znotraj prostornine V'' so komponente deformacije ε_{jk} sestavljene iz elastičnega prispevka ε_{jk}' in plastičnega prispevka ε_{jk}''

$$\varepsilon_{jk} = \varepsilon_{jk}' + \varepsilon_{jk}'' \quad (8)$$

Zaradi tega lahko delež deformacijske notranje energije v enačbi (5) razstavimo:

$$\begin{aligned} W_n - W_n^T &= \int_V \sigma_{jk} \varepsilon_{jk} dV = \int_V \sigma_{jk} (\varepsilon_{jk}' + \varepsilon_{jk}'') dV = \\ &= \int_{V' + V''} \sigma_{jk} \varepsilon_{jk}' dV + \int_{V''} \sigma_{jk} \varepsilon_{jk}'' dV = W_n' + W_n'' \end{aligned} \quad (9)$$



Sl. 2. Elastične in plastične deformacije v prostornini V

kjer pomenijo:

W_n^T — notranjo energijo zaradi temperaturnega stanja, W_n' — deformacijsko notranjo energijo zaradi elastičnih deformacij, W_n'' — deformacijsko notranjo energijo zaradi plastičnih deformacij.

Spremembe posameznih energijskih prispevkov s časom v enačbi (2) lahko izrazimo kot spremembe z velikostjo razpoke.

$$\frac{\partial}{\partial t} = \dot{S}_c(t) \frac{\partial}{\partial S} \quad (10)$$

V fazi počasnega razširjanja razpoke, ko je $\dot{S}_c(t)$ različen od nič, lahko enačbo (2) zapišemo malo drugače:

$$\frac{\partial}{\partial S} (A + Q) = \frac{\partial}{\partial S} (W_n^T + W_n' + W_n'' + W_k + I) \quad (11)$$

Če povečujemo obremenitev na površini S_p zelo počasi ($\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \dots 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) je tudi razširjanje razpoke v področju počasnega razširjanja počasno. Hitrosti pomikov $\dot{u}_k$ so takrat majhne in lahko delež kinetične energije v enačbi (11) zanemarimo. Toplota, ki nastaja v plastični coni, se prenaša na okoliške elastično obremenjene predele. Ker drugih dovodov toplote ni, je delež toplote v enačbi (11) nič. Takšno razširjanje razpoke je izotermen pojav in je $\dot{T}$ nič. Notranjo energijo sestavljata le oba deformacijska prispevka. Ko se razpoka počasi večja, velja:

$$\tilde{G}_c = \frac{\partial}{\partial S} (A - W_n' - W_n'')_c = \frac{\partial I}{\partial S} \quad (12)$$

kjer pomeni, $\tilde{G}_c$ — kritično hitrost sproščanja deformacijske energije.

Zgornji izraz je najsplošnejša definicija lomne žilavosti za primer statičnega obremenjevanja. Hitrost sproščanja deformacijske energije, ko se lom prične, je odvisna od materiala. Obravnavamo

jo kot veličino, ki opisuje določeno materialno lastnost. Analitično je z zadovoljivo natančnostjo ni mogoče izračunati. Tako definirano lomno žilavost se eksperimentalno že da določati [3].

Kadar je velikost plastične cone zanemarljiva kakor na primer pri lomu stekla [4], lahko prispevek plastične deformacijske energije zanemarimo. Za realne krhke materiale zadošča že, če je mogoče velikost plastične cone upoštevati zgolj kot popravek k velikosti razpoke.

$$G_c = \frac{\partial}{\partial S} (A - W_n)_c = \frac{\partial \Gamma}{\partial S} \quad (13)$$

Glede na posledice delovanja napetosti p_k na površini S_p , ko se razpoka za malenkost poveča, lahko obravnavamo dva modela:

a) Pri infinitezimalnem povečanju razpoke so pomiki u_k in hitrosti pomikov $\dot{u}_k$ na površini S_p enaki nič. $\dot{A}$ je tako enak nič. Kritična hitrost sproščanja deformacijske energije G_c se da izraziti s prispevkom elastične deformacijske energije

$$G_c = - \frac{\partial W_n'}{\partial S} = \frac{\partial \Gamma}{\partial S} = \gamma \quad (14)$$

Za tvorbo nove površine se torej troši vskladiščena elastična deformacijska energija.

b) Pri infinitezimalnem povečanju razpoke se obremenitev p_k na površini S_p ne spremeni. Obremenitev opravi neko delo. Iz Clayperonovega teorema linearne elastostatike izhaja razmerje

$$\frac{\partial A}{\partial S} = 2 \frac{\partial W_n'}{\partial S} \quad (15)$$

Kritična hitrost sproščanja deformacijske energije G_c se da spet izraziti s prispevkom elastične deformacijske energije

$$G_c = + \frac{\partial W_n'}{\partial S} = \frac{\partial \Gamma}{\partial S} = \gamma \quad (16)$$

Dovedeno delo se porabi za tvorbo nove površine in za povečanje elastične deformacijske energije. Absolutna vrednost odvoda elastične deformacijske energije je torej statična lomna žilavost idealno krhkega materiala.

Pri hitrem povečevanju obremenitve ali pa pri hitrem razširjanju razpoke v idealno krhkem materialu ni mogoče v enačbi (11) zanemarjati prispevka kinetične energije. Ker do tvorbe plastične cone ne pride, je delež toplote nič. Pojav je izotermen.

$$\pm \frac{\partial W_n'}{\partial S} = \frac{\partial}{\partial S} (\Gamma + W_k) \quad (17)$$

Absolutna vrednost izraza na levi ima dimenzijo sile. Zato jo lahko obravnavamo kot posplošeno silo, ki v konici razpoke premaguje odpor materiala.

Pri hitrem povečevanju obremenitve ali pa pri hitrem razširjanju razpoke v realnih materialih ne moremo zanemarjati prispevka plastične deformacijske energije, prispevka toplote in povišanje ali znižanje temperature. Ta proces je zaradi hitrosti loma adiabaten. Temperatura materiala ob sami konici razpoke se zaradi hitrosti procesa ne more izravnati z okoliško. Tak lom je v primerjavi s statičnim znatno bolj krhek [5].

4. KRITIČNI FAKTOR INTENZIVNOSTI NAPETOSTI

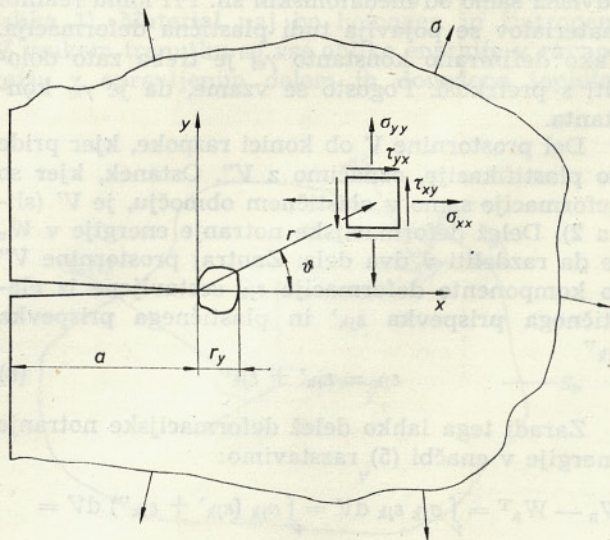
Kritični faktor intenzivnosti napetosti K_c je merilo za porušitev materiala, kadar pri lomu ni treba upoštevati vpliva plastične cone. Postavimo, da je velikost plastične cone r_y zanemarljiva. Napetosti zunaj nje lahko določamo na osnovi izključno elastičnih deformacij (slika 3). Rešitev ima več parametrov [6].

$$\sigma_{jk} = \frac{K}{\sqrt{2\pi a}} \sqrt{\frac{a}{r}} F_{jk}^{(1)}(\vartheta) \pm C_2 F_{jk}^{(2)}(\vartheta) + \sum_{n=3}^{\infty} C_n \left(\frac{r}{a}\right)^{\frac{n}{2}-1} F_{jk}^{(n)}(\vartheta) \quad (18)$$

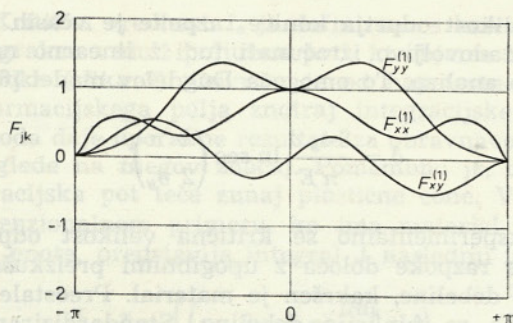
kjer pomenijo: $j, k = x, y$, $F_{jk}^{(n)}$ — funkcijo spremljivke ϑ , K, C_2, C_n — parametre, odvisne od relativne velikosti preizkušanca in razpoke ter od obremenitve.

Za majhna razmerja $\frac{r}{a}$ lahko razen prvega vse člene zanemarimo.

$$\sigma_{jk} = \frac{K}{\sqrt{2\pi a}} \sqrt{\frac{a}{r}} F_{jk}^{(1)}(\vartheta) \quad (19)$$



Sl. 3. Napetosti v bližini razpoke

Sl. 4. Kotna odvisnost funkcij $F_{jk}^{(1)}$

Funkcije $F_{jk}^{(1)}$ so na sliki 4. Parameter K je faktor intenzivnosti napetosti. Če je razmerje $\frac{r}{a}$ manjše od 0,02, se izrazi z enim parametrom (enačba 19) razlikujejo pri različnih oblikah preizkušancev od natančnih za manj ko 10 % [7]. Običajno razsipanje rezultatov presega to vrednost. Ker enačba (19) velja za majhna razmerja $\frac{r}{a}$, mora biti majhna tudi plastična cona r_y :

$$\frac{r_y}{a} < \frac{r}{a} \leq 0,02 \quad (20)$$

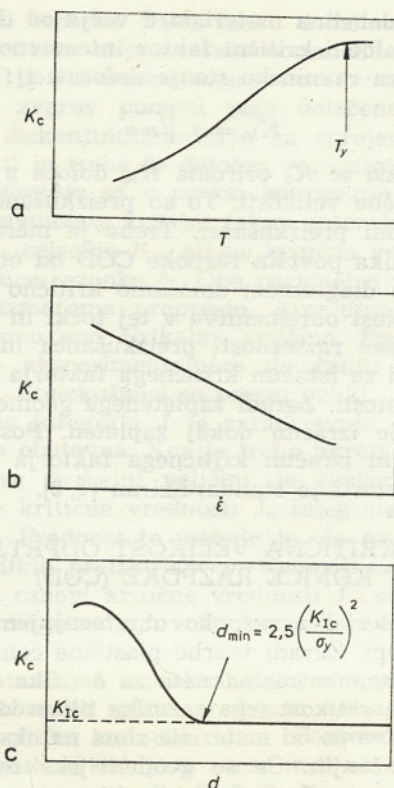
To je merilo za velikost plastične cone, ki jo je glede na natančnost meritve še mogoče dopuščati.

Faktor intenzivnosti napetosti se med povečevanjem obremenitve veča. Ko doseže kritično vrednost K_c , se začne razpoka širiti. Kritični faktor intenzivnosti napetosti K_c je odvisen od materiala, temperature, hitrosti obremenjevanja in napetostnega stanja. Napetostno stanje določajo oblika ter notranje in zunanje obremenitve. Na sliki 5 so te odvisnosti skicirane.

T_y na sliki 5 a je prehodna temperatura pri pojavu krhkega loma. Če je temperatura višja od T_y , do krhkega zloma ne pride, ker se telo prej plastično deformira. Prehodna temperatura pri pojavu krhkega loma pri statičnem obremenjevanju je za dano obliko razpoke odvisna od vrste materiala. Pri postavitvi meril za velikosti dopustnih diskontinuitet v zvarih se skuša doseči, da je T_y nižja od najnižje mogoče eksploatacijske temperature.

Če narašča obremenitev zelo hitro, se tudi izraziti plastični materiali zlomijo krhko. Tipična primera sta katran ali pa smola (slika 5 b).

S slike 5 c je razvidno, da na izmerjeno vrednost kritičnega faktorja intenzivnosti napetosti K_c razpoke skozi vso debelino vpliva debelina preizkušanca. Če debelino večamo, se K_c zmanjšuje vse do debeline d_{min} . Od te debeline dalje je vrednost K_c konstantna in enaka K_{Ic} . Ta vrednost je odvisna samo od materiala, hitrosti obremenjevanja in od temperature. Tak lom ustreza planarni deformacijski konfiguraciji. Takrat so izpolnjeni pogoji za

Sl. 5. Veličine, ki vplivajo na velikost kritičnega faktorja intenzivnosti napetosti K_c

- a) temperatura
- b) hitrost obremenjevanja
- c) debelina materiala

krhki lom, saj je ob konici razpoke troosno natezno napetostno stanje [8].

Kritična hitrost sproščanja energije G_c v enačbi (13) se da izraziti s faktorjem intenzivnosti napetosti

$$G_c = q \frac{K_c^2}{E} \quad (21)$$

kjer pomenita: $q = 1$ — ravninsko stanje napetosti, $q = 1 - \mu^2$ — ravninsko stanje deformacij.

Lahko rečemo, da je v primeru zanemarljive velikosti plastične cone kritični faktor intenzivnosti napetosti K_c lomna žilavost materiala.

Pri poskusih se kritični faktor intenzivnosti napetosti določa z razsežnostjo preizkušanca in razpoke ter kritično napetostjo. V primeru neskončne plošče debeline d z razpoko dolžine $2a$ je faktor intenzivnosti napetosti K najpreprosteje izračunati

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (22)$$

Ko napetost doseže kritično vrednost za pojav loma σ_c , smo določili kritični faktor intenzivnosti napetosti K_c .

$$K_c = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (23)$$

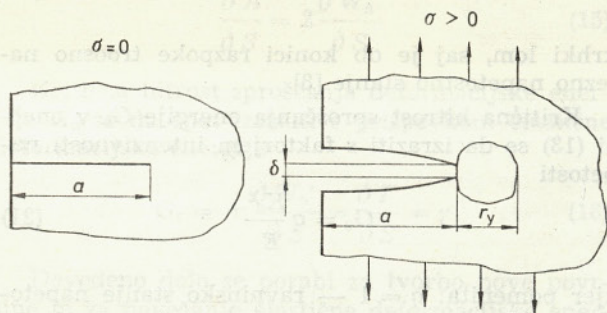
Če je debelina materiala d večja od $d_{\min}$ (slika 5), smo določili kritični faktor intenzivnosti napetosti K_{Ic} za ravninsko stanje deformacij:

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (24)$$

V praksi se K_{Ic} oziroma K_{Ic} določa s preizkušanci končne velikosti. To so preizkušanci CT ali pa upogibni preizkušanci. Treba je meriti odvisnost razmika površin razpoke COD od obremenitve. S tem diagramom določamo kritično točko za lom. Velikost obremenitve v tej točki in natančne geometrijske razsežnosti preizkušanca in razpoke so podatki za izračun kritičnega faktorja intenzivnosti napetosti. Zaradi zapletenega geometrijskega faktorja je izračun dokaj zapleten. Postopek za merjenje in izračun kritičnega faktorja intenzivnosti napetosti je standardiziran [1, 2].

5. KRITIČNA VELIKOST ODPRTJA KONICE RAZPOKE (COD)

Če material z razpoko obremenjujemo, njena konica otopi. Zaradi tvorbe plastične cone se tam površini razpoke razmakneta za δ (slika 6). Hipoteza, da je velikost tega razmika tik pred zlomom δ_c odvisna samo od materiala sloni na eksperimentalnih opažanjih. Če so geometrijske razsežnosti površinske razpoke znane, je velikost razmika mogoče meriti. To je ugodno predvsem pri materialih, ki se zlomijo polkrhko ali pa celo žilavo. Plastična cona je takrat velika, razmik pa znaten. Tako se ga da meriti z zadovoljivo natančnostjo.



Sl. 6. Razmik površin razpoke zaradi tvorbe plastične cone

Povezava te metode z linearno lomno mehaniko je mogoča, če je plastična cona majhna. Takrat je mogoče formalno kritično velikost odprtja konice razpoke δ_c izraziti s kritično, hitrostjo sproščanja energije G_c :

$$\delta_c = \alpha \frac{G_c}{\sigma_y} \quad (25)$$

kjer je α — numeričen faktor, odvisen od nape-
tostnega stanja.

Lahko rečemo, da je v primeru tvorbe znatne plastične cone kritična velikost odprtja konice razpoke δ_c lomna žilavost materiala.

Velikost odprtja konice razpoke je včasih mogoče zadovoljivo izračunati tudi z linearno nape-
tostno analizo. To omogoča Dugdelov model [6]

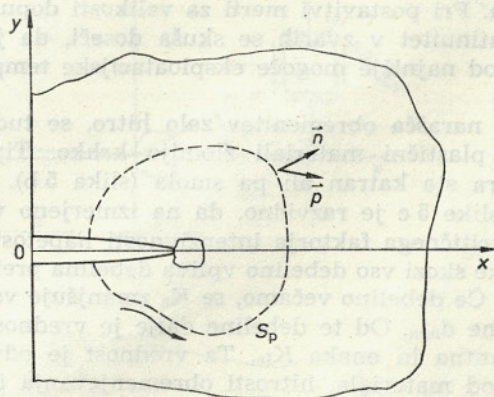
$$\delta = \frac{8 \sigma_y a}{\pi E} \ln \sec \left(\frac{\pi \sigma}{2 \sigma_y} \right) \quad (26)$$

Eksperimentalno se kritična velikost odprtja konice razpoke določa z upogibnimi preizkušanci enake debeline, kakršen je material. Preostale dimenzije so funkcije debeline. Standardiziranega postopka za eksperimentalno določanje δ_c še ni. Kot vodilo pri eksperimentalnem delu rabi predlog standarda BS [9]. Izmeriti je treba odvisnost razmika površin razpoke COD od obremenitve. S tem diagramom določamo kritično točko za lom. Velikost razmika COD v tej točki in natančne geometrijske razsežnosti preizkušanca in razpoke so podatki za izračun kritične velikosti odprtja konice razpoke δ_c .

O računskem postopku za njegovo določitev so mnenja strokovnjakov še deljena. Lega centra rotacije pri upogibnih preizkušancih je namreč odvisna od velikosti obremenitve [10]. V predlogu standarda BS [9] so predpostavili, da je center rotacije od obremenitve neodvisen.

6. KRITIČNA VREDNOST INTEGRALA J

Kritična velikost odprtja konice razpoke δ_c je parameter, ki se nanaša samo na plastično cono ob konici razpoke. Lastnosti znotraj plastične cone se precej spreminjajo. Posledica je znaten razsip rezultatov pri eksperimentalnem določanju kritične velikosti odprtja konice razpoke. Parameter, ki ne zajema samo vpliva plastične cone, je kritična vrednost krivuljnega integrala J_c . Metoda je zasnovana na energijskem modelu loma. Ker je obravnavana loma v njej nelinearno elastična, jo je mogoče zožiti na linearno elastično ali pa razširiti na elastoplastično obravnavo. Metoda pomeni povezavo med linearno in nelinearno lomno mehaniko.



Sl. 7. Integracijska pot krivuljnega integrala

Kritična vrednost J_c je definirana s krivuljnim integralom vzdolž poljubne poti, ki objame konico razpoke (slika 7). Odvisen je od napetostnega in deformacijskega polja znotraj integracijske poti. Metoda daje uporabne rezultate za obravnavo loma ne glede na njegov značaj. Pomembno je, da integracijska pot teče zunaj plastične cone. V dvo-dimenzionalnem primeru, ko ima material debelino enote, predstavlja integral J naslednji izraz:

$$J = \int_{S_p} \left(w_n dy - p_k \frac{\partial u_k}{\partial x} ds \right) \quad (27)$$

Integracija poteka nasprotno smeri gibanja urnega kazalca. Tik pred zlomom doseže vrednost integrala J kritično vrednost J_c . Ta pomeni splošno silo, delujočo na konico razpoke. Za plastično cono zanemarljivih razsežnosti je kritična vrednost integrala J identična kritični hitrosti sproščanja energije G_c .

$$J_c \equiv G_c \quad (28)$$

Lahko rečemo, da je tudi J_c lomna žilavost materiala.

Kadar je plastična cona majhna, je mogoče integral J definirati še drugače. Dve enaki telesi z razpokama različnih dolžin imata različni potencialni energiji. Potencialna energija je definirana takole:

$$W_p = W_n - A \quad (29)$$

Razlika potencialnih energij, če se razpoki minimalno razlikujeta je integral J

$$J = - \frac{\partial W_p}{\partial a} \quad (30)$$

Kritična vrednost J_c je identična zmanjšanju potencialne energije s povečanjem razpoke tik pred zlomom.

Kritično vrednost integrala J lahko izračunamo z metodo končnih elementov in numeričnim izračunom po enačbi (27). Prej je treba s poskusi določiti kritično obremenitev. S poskusi se določa J_c s preizkušanci CT ali upogibnimi preizkušanci. Hkrati je treba meriti pomikanje točke obremenjevanja in velikost obremenitve. Kritično vrednost integrala določimo po enačbi (30). Postopek še ni standardiziran.

7. SKLEP

Diskontinuitete v zvarih so za nosilnost zvarjenih konstrukcij zelo pomembne. Njihov vpliv na nosilnost omogočajo ocenjevati lomne in druge lastnosti najkritičnejših delov zvarov. Pri obremenitvi je treba upoštevati tudi morebitne notranje napetosti ter koncentracijo napetosti, ki so tudi lahko vzrok za porušitev zvarjene konstrukcije. Če je predvidena preizkusna obremenitev konstrukcije, ki je večja od delovne obremenitve, je treba

upoštevati tudi to. Tako lahko določimo velikost diskontinuitete, ki je za dano obremenitev še podkritična [11]. Pri vrednotenju rezultatov neporušnih preiskav zvarov pomeni tako določena kritična velikost diskontinuitete nivo za sprejem zvarov. Upoštevati je treba še določen varnostni faktor.

Najpogostejše se v praksi kot merilo za pojav loma obravnavata kritični faktor intenzivnosti napetosti K_c oziroma K_{Ic} ali pa kritična velikost odprtja konice razpoke δ_c . Oba parametra je mogoče meriti razmeroma preprosto. Absolutno je treba meriti samo eno fizikalno veličino. Postopki pri njihovem eksperimentalnem določanju so dokaj preprosti. Preizkušanci so precej veliki.

Metoda integrala J je zaradi svoje univerzalnosti zelo obetavna. Ker je treba hkrati absolutno meriti dve fizikalni veličini, je eksperimentalno določanje kritične vrednosti J_c integrala J precej zahtevno. Prednost te metode je, da ne terja posebno velikih preizkušancev. Kriteriji za lom, določeni na osnovi kritične vrednosti J_c , so navadno strožji in zagotavljajo večjo varnost zvarjene konstrukcije.

Na natančnost s poskusi določenih parametrov lomne mehanike vpliva predvsem način, kako določamo kritični trenutek loma. Ponavadi uporabljamo s poskusi dobljeno zvezo med obremenitvijo in odpiranjem razpoke [1, 2, 9]. Ker se pri lomu spreminjajo tudi nekatere druge fizikalne veličine, lahko tudi z njimi določamo kritični trenutek loma. Najpogostejše uporabljamo metodo detekcij akustične emisije, metodo replike, uporovno metodo in podobno.

LITERATURA

- [1] ASTM E 399-74: Standard Method of Test for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.
- [2] BS 5447: Methods of Test for Plane Strain Fracture Toughness (K_{Ic}) of Metallic Materials.
- [3] J. Eftis, D. L. Jones, H. Liebowitz: On Fracture Toughness in the Nonlinear Range, Engineering Fracture Mechanics, 1975.
- [4] B. R. Lawn, T. R. Wilshaw: Fracture of Brittle Solids, 1976.
- [5] G. R. Irwin: Comment on Dynamic Fracture Testing, International Conference on Dynamic Fracture Toughness, London 1976.
- [6] H. Liebowitz: Fracture II, Moskva 1976.
- [7] J. Eftiz, H. Liebowitz: On Fracture Toughness Evaluation for Semibrittle Fracture, Engineering Fracture Mechanics, 1975.
- [8] A. Nadai: Theory of Flow and Fracture of Solids, 1950.
- [9] BS Draft for Development: Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing.
- [10] B. A. Fields, K. J. Miller: A Study of COD and Crack Initiation by a Replication Technique, Engineering Fracture Mechanics, 1977.
- [11] F. M. Burdekin, M. G. Dawes: Practical Use of Linear Elastic and Yielding Fracture Mechanics with Particular Reference to Pressure Vessels, Institution of Mechanical Engineering, 1971.