

## PONAŠANJE METALA PRI UDARNOM OPTEREĆENJU BEHAVIOUR OF METALS AT IMPACT LOADING

Stručni rad / Professional paper

UDK / UDC 620.178.7:669

Rad primljen / Paper received: 2.6.2001.

Adresa autora / Author's address:

Dejan Momčilović, dipl.ing, IMS, Vojvode Mišića 43, Beograd  
Božidar Delić, dipl.ing, Mostogradnja, Batajnica  
dr Vencislav Grabulov, Vojnotehnički Institut VJ, Žarkovo

### Ključne reči

udarno opterećenje, velika brzina deformacije, udarni talasi, adijabatske trake smicanja, procena oštećenja

### Izvod

*Ponašanje materijala u uslovima velike brzine deformacije od praktičnog je značaja za probleme otpornosti konstrukcija prilikom eksplozije i probijanja projektilom, određivanja kontaktnih napona ležajeva za velike ugaone brzine, problema pri brzoreznoj obradi i eksplozivnom zavarivanju. Osnovna razlika impulsnog opterećenje, u odnosu na statičko, je da se njegovo dejstvo ne prenosi odmah po celoj zapremini čvrstog tela. Deformacija i napon stvoreni kratkim impulsnim opterećenjem prenose se kroz konstrukciju u obliku talasa koji se nazivaju udarni talasi. Pri prostiranju udarnih talasa, posebno povratnih, može doći do rasprskavanja u konstrukciji. Pri kratkom vremenu impulsnog opterećenja, na primer od  $10^{-4}$  do  $10^{-6}$  sekundi za eksploziju, moguće je stvaranje napona u konstrukciji i do 10 GPa. S druge strane, prilikom prodiranja projektila može doći do lokalnog stvaranja tzv. adijabatskih traka smicanja, zbog veoma intenzivne lokalne deformacije. Sve je ovo osnova za procenu stepena oštećenja metalnih konstrukcija izazvanih NATO bombardovanjem. U radu su, pored elementarnih teorijskih osnova mehanizama oštećenja, navedeni i primeri iz prakse vezani za ispitivanje elemenata bombardovanjem oštećenih konstrukcija.*

### Keywords

impact loading, high strain rate, shock waves, adiabatic shear bands, damage assessment

### Summary

*Material behaviour under high strain-rate conditions is of practical importance in such problems as the response of structures to blast and impulsive loads, contact stresses under high-speed bearings, high-speed machining and explosive welding. The basic difference of impuls loading, compared to static loading, is that its effect is not instantaneously transmitted to all parts of solid body. The deformation and stress produced by the impuls load move through the body in a form of a wave so called shock waves. During spread of these waves, and their reflection the the development of spall of construction is possible. Consequently, during short typical time of shock loading, for example from  $10^{-4}$  to  $10^{-6}$  seconds for explosion, development of stresses of magnitude up to 10 GPa is possible. On the other hand, penetration of projectiles can develop adiabatic shear bands, as a result of an very intensive local deformation. All of the mentioned above presents the basis for damage assessment of metallic constructions as result of NATO bombing. This paper describes basic theoretical mechanisms of damage under high-strain rate deformation and examples of case studies from testing of such damaged construction components.*

### UVOD

Klasičan pristup proračunima metalnih konstrukcija zasniva se na pretpostavci da su materijali homogeni i izotropni. Zatezne karakteristike određuju se na epruvetama, a odabrani stepen sigurnosti obuhvata ono što se o ponašanju materijala ne zna dovoljno. Ovakav pristup ne daje pravu sliku sigurnosti konstrukcije /1/.

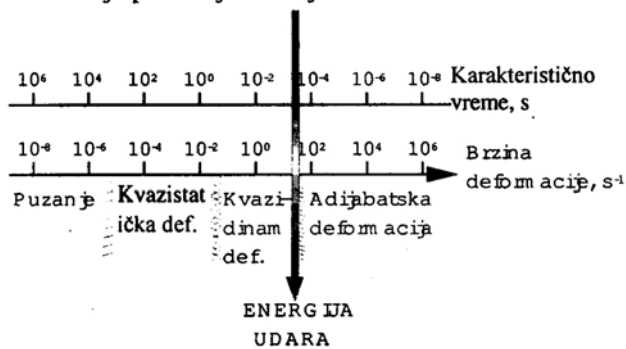
Međutim, praksa je pokazala da i pored ispunjenja strogih zahteva u pogledu sigurnosti, princip konstruisanja na bazi dopuštenog napona i stepena sigurnosti nije dovoljno pouzdan. Lomovi se u eksploataciji konstrukcija javljaju i pri naponima koji su niži od dopuštenih. Osnovni razlog za to su greške u materijalu konstrukcija, od kojih su najopasnije greške tipa prslina.

Danas praktično ne postoji konstrukcija gde se kao jedan od postupaka oblikovanja ili spajanja ne primenjuje zavarivanje, a sam zavareni spoj, koliko god uspešno bio izveden, po svom karakteru je greška u materijalu jer narušava njegovu homogenost. U zavarenom spoju, kao mestu lokalne geometrijske i mikrostrukturne nehomogenosti, moguća je pojava inicijalnih prslina koje deluju kao koncentratori napona i omogućuju da stvarni napon lokalno prevaziđe veličinu napona za njen nestabilan rast. Prisustvo prslina bitno utiče na ponašanje materijala, odnosno na pojavu loma, koji je u početnoj fazi pojava lokalnog karaktera. Potpuna karakterizacija metalnih materijala podrazumeva i sagledavanje njihovog ponašanja u prisustvu grešaka, tj ocenu njihove otpornosti prema iniciranju i razvoju prslina kao najopasnije vrste greške. Upravo zato, veoma je važno oceniti materijal sa stanovišta njegovog ponašanja u prisustvu greške.

Kao posledica NATO bombardovanja 1999. godine, napred navedeno se dodatno komplikuje usled izloženosti metalnih konstrukcija probojima i eksplozijama, različitim projektilima i najčešće pratećim požarima. Procena stepena oštećenja tako oštećenih konstrukcija nije tema ovog rada, ali takva procena se mora zasnivati na multidisciplinarnom pristupu, pre svega kroz poznavanje mehanizama razaranja metala izloženog udarnim opterećenjem. Tema ovog rada je upoznavanje šire stručne javnosti sa osnovnim mehanizmima oštećenja pod dejstvom udarnog opterećenja.

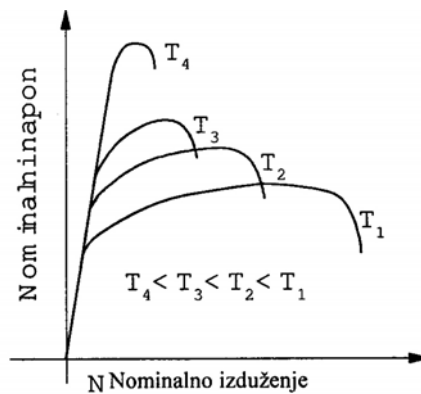
Pod udarnim opterećenjem podrazumeva se veliki broj različitih postupaka ispitivanja pri različitom spektru brzina deformacija. U priručniku za mehanička ispitivanja ASM Handbook /2/, unutar odrednice "ispitivanja pri velikim brzinama deformacije", odnosno udarno opterećenje, nalazi se oko petnaest različitih postupaka ispitivanja. Mada se ispitivanja velikim brzinama deformacije najčešće vezuju za namenske programe, razumevanje ponašanja materijala pri ovakvim uslovima ima veliki značaj i u obradi metala struganjem i postupcima plastične deformacije metala.

Spektar brzina deformacija i karakterističnih vremena, koja se koriste pri ispitivanjima metala, prikazan je na sl. 1. Najjednostavnije i najrasprostranjenije ispitivanje udarom je ispitivanje energije udara (udarne žilavosti) po Šarpiju. Sa pomeranjem brzine deformacije od kvazistatičke (ispitivanje zatezanjem) do kvazidinamičke kod čelika, napon tečenja i zatezna čvrstoće rastu, uz smanjenje izduženja, kao što je prikazano na sl. 2. Međutim, pri većim brzinama deformacije, reda veličine prostiranja udarnog talasa usled eksplozije, dolazi do drugačijih pojava koje se podvrgavaju drugim zakonitostima i kod kojih uobičajene inženjerske veličine, kao što su napon tečenja, zatezna čvrstoća, izduženje i žilavost loma, nisu dovoljne pri razmatranju ponašanja materijala.

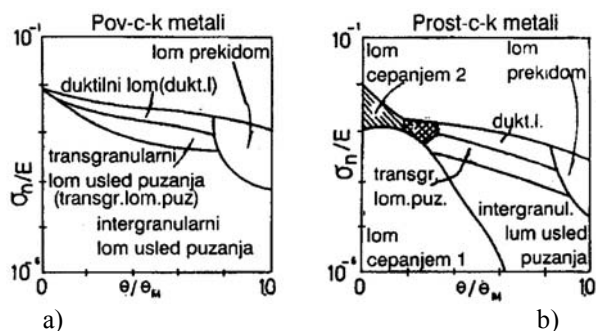


Slika 1. Spektar brzina deformacija i karakterističnih vremena pri ispitivanju metala /3/

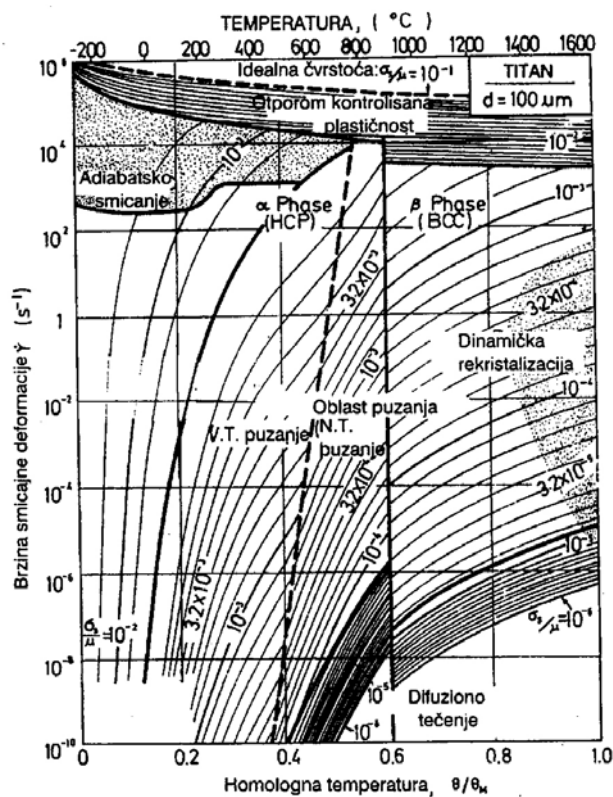
Drugi pogodan način za razjašnjenje različitih vrsta deformacije, koji pored brzine deformacije uzima u obzir i temperaturu, predložen je od strane Ešbija 1981. godine. Ove tzv. deformacione mape, sl. 3. i 4, daju pregled punog spektra mehanizama deformacije u zavisnosti od normalizovanog napona (odnosa napona i modula elastičnosti) i homologne temperature gde je  $\theta_m$  temperatura topljenja /5/.



Slika 2. Promena mehaničkih svojstava sa sniženjem temperature /4/



Slika 3. Deformacione mape za a) pov-c-k metale b) prost-c-k metale

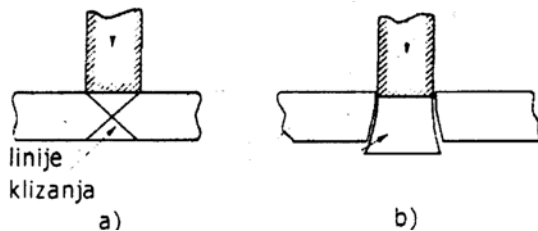


Slika 4. Deformaciona mapa za titan

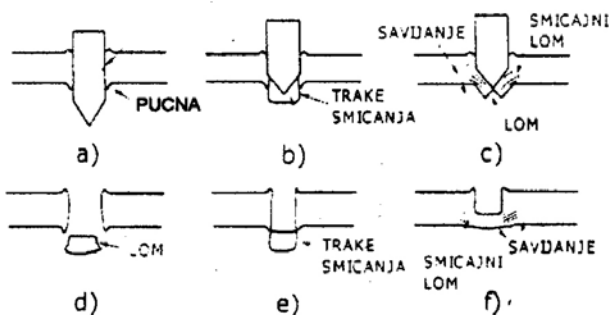
## KLASIFIKACIJA OŠTEĆENJA PRI VELIKIM BRZINAMA DEFORMACIJE

Ispitivanja puzanjem i kvazistatičkom deformacijom (zatezanjem) se izvode na servohidrauličnim i elektromehaničkim mašinama, pri čemu se inercijalni efekti mogu u potpunosti zanemariti. Toplota koja se javlja u uzorku pri ispitivanju zatezanjem, odnosno porast temperature u uzorku tokom ispitivanja, može se takođe zanemariti, što znači da se ispitivanje zatezanjem praktično izvodi pri izotermalnim uslovima. Pri ispitivanju po Šarpiju deformacija na vrhu zareza postaje adijabatska, što znači da se toplota stvara deformacionim radom i nema mogućnosti (odnosno vremena) za rasipanje u okolinu. Ovaj uticaj porasta temperature na napon tečenja se mora uzeti u obzir kada se porede svojstva materijala u zavisnosti od brzine deformacije.

Kao ilustracija osnovne razlike između kvazistatičke deformacije i deformacije koje se odvija velikom brzinom može poslužiti sl. 5, koja prikazuje razlike u mehanizmu deformacije, pri statičkom probijanju ploče i probijanju ploče projektilom. Pri statičkom probijanju, kao u slučaju sl. 5a, pre deformacije na frontu ispred trna dolazi do deformacije po linijama klizanja uz značajnu deformaciju okolnog materijala pre probijanja, dok pri probijanju ploče projektilom dolazi do lokalizovane deformacije i izbijanja čepa, na sl. 5b označenog strelicom. Na sl. 6. je prikazana klasifikacija lomova nastalih probijanjem projektila.



Slika 5. Poređenje između a) linija klizanja nastalih statičkim probijanjem i b) izbijanjem čepa pri udaru tupog projektila



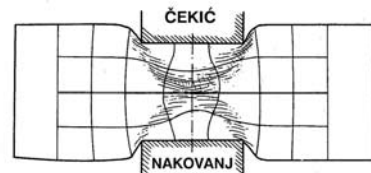
Slika 6. Klasifikacija lomova nastalih probijanjem projektila: a) duktilno obrazovanje proboja, b) probijanje čepa adijabatskim smicanjem, c) velika plastična deformacija i lom probijanjem, d) duktilno izbijanje čepa, e) izbijanje čepa adijabatskom smicanjem, f) velika plastična deformacija uz izbijanje čepa lomom

Pri gađanju određene konstrukcije projektilom, npr. rezervoara, po pravilu prvo dolazi do probijanja konstrukcije, zatim iniciranja eksplozivnog punjenja - odnosno eksplozije,

i naknadnog požara. Upravo tim redosledom biće obrađena oštećenja u čeliku, dakle oštećenja usled proboja projektila i/ili šrapnela, oštećenja nastala usled eksplozija/udarnog talasa i oštećenja usled požara. Ovakva podela je veoma gruba, s obzirom da se prilikom udara projektila i nepotpunog proboja takođe mogu javiti oštećenja kao posledica udarnog talasa.

## PROBOJNA OŠTEĆENJA

Pri probiju projektila, kao što je već dato na sl. 5 i 6, tokom proboja projektila dolazi do lokalizovane deformacije. Pri tome se lokalizovanje deformacije javlja kao tzv. adijabatska traka smicanja (ATS). Pojavu lokalizovane deformacije je prvi put uočio i objasnio krajem prošlog veka Treska. On je posmatrajući kovanje čelika zagrejanog na temperaturama preko 900°C primetio da se pri udarcima čekića u otkovak, na otkovku javljaju nešto svetlije trake duž kojih se otkovak deformiše u odnosu na okolinu otkovka, sl. 7. Modifikovani proračuni Treske iz tog doba ukazuju da se oko 90% ukupne energije utrošene za plastičnu deformaciju prevodi u toplotu, a oko 10% ostaje u deformisanom materijalu kao latentna energija plastične deformacije.



Slika 7. Trake smicanja pri kovanju

Interesantna je analiza energija potrebnih za probijanje čelične ploče "malom" i "velikom" brzinom. Pretpostavimo da se cilindar prečnika  $D$  utiskuje u čeličnu ploču. Zahtevana kinetička energija, u ovom slučaju, može da se proceni iz rada potrebnog za utiskivanje tela:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = F \cdot d = \sigma_f \pi \frac{D^2}{4} \cdot d \quad (1)$$

gde su  $F$  sila otpora i  $\sigma_f$  odgovarajući napon, a  $d$  dubina utiskivanja. Ako se ploča od istog materijala debljine  $b$  probija istim cilindrom, kao u prethodnom slučaju, ali do proboja dolazi izbijanjem "čepa", sl. 5b, zahtevana minimalna kinetička energija iznosi:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = F_p \cdot d_p = \tau_f \cdot \pi \cdot D \cdot b \cdot d_p \quad (2)$$

gde su  $F_p$  sila otpora smicanju,  $\tau_f$  smicajni napon i  $d_p$  kritična dubina utiskivanja potrebna za probijanje ploče izbijanjem čepa. Može da se prepostavi da je  $d_p$ :

$$d_p \approx \gamma_f \cdot w \quad (3)$$

gde je  $\gamma_f$  maksimalna smicajna deformacija koji dovodi do loma, a  $w$  širina adijabatske trake smicanja. Ukoliko je ulazna kinetička energija ista, potrebno je povezati dubinu utiskivanja  $d$  sa debljinom ploče  $b$ . Nakon zamene jedn. (3) u jedn. (2), dobija se:

$$d/b \approx (4\tau_f/\sigma_f) \cdot (\gamma_f \cdot w/D) \quad (4)$$

U cilju uproščavanja jednačina može da se pretpostavi da je  $\tau_f/\sigma_f \approx 1/2$  i  $\gamma_f \approx 5$  za čelike. Tada jedn. (4) postaje:

$$d/b \approx 10w/D \approx 0 \quad (10^{-2} \text{ do } 10^{-1}) \quad (5)$$

Širina adijabatskih traka smicanja u čelicima iznosi od deset do nekoliko stotina mikrona. Može da se kaže da kinetička energija potrebna za probijanje čelične ploče debljine 10 mm, izbijanjem "čepa", približno odgovara energiji potrebnoj da se cilindar prečnika D utisne u tu istu ploču za 1 mm. Pri tome se postavlja pitanje kako je moguće da energija potrebna za proboj "velikom" brzinom bude manja od energije potrebne za proboj ploče "malom" brzinom"?

Odgovor treba tražiti u činjenici da pri velikoj brzini deformacije lokalno dolazi do velikog zagrevanja duž adijabatskih traka smicanja. Porast temperature  $\delta\theta$ , kao rezultat plastične deformacije može da se odredi kao:

$$\delta\theta = \int_0^{\gamma_f} \frac{\tau \cdot d\gamma}{\rho \cdot c} \approx \frac{\tau_f \cdot \gamma_f}{\rho \cdot c} \quad (6)$$

gde je  $\tau_f$  napon tečenja, koji iznosi za čelike oko 400 MPa,  $\rho$  je gustina (za čelike  $\approx 7850 \text{ kg/m}^3$ ),  $c$  specifična toplota (za čelike  $\approx 450 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ) i  $\gamma_f \approx 5$ . Zamenom ovih vrednosti jedn. (6) daje lokalni porast temperature od oko 600 K, odnosno lokalno dostizanje temperature od oko 900 K. Ako  $\gamma$  pređe vrednost 8, kako je navedeno u literaturi na osnovu mnogobrojnih rezultata ispitivanja, lokalno dostignuta temperatura može biti i preko 1200 K, što znači da je dostignuta  $\alpha \rightarrow \gamma$  temperatura transformacije. Na tako lokalno zagrejanim mestima, zbog brzog odvođenja toplote od strane okolnog metala, dolazi do zakaljivanja strukture, što znači da lokalno u širini od stotinak mikrona postoji martenzitna struktura. Na osnovu toga, može da se kaže da adijabatske trake smicanja (ATS) u strogom smislu nisu greške tipa prslina, ali da zbog bitno različite mikrostrukture u odnosu na okolni materijal predstavljaju mesta iniciranja grešaka tipa prslina, odnosno daljeg krtog ili duktilnog loma. Veoma je važno napomenuti da se kod čelika ATS javljaju gotovo isključivo pri deformacijama gde je materijal izložen pritisnom opterećenju i/ili uvijanju. Razlog izostanka pojave ATS pri zateznom opterećenju treba tražiti u činjenici da se pri zatezanju materijal deformiše drugim mehanizmima, pre pojave ATS.

Osnovni problem pri razmatranju ATS je da uobičajene veličine, koje opisuju mehanička svojstva materijala (napon tečenja, zatezna čvrstoća, izduženje, žilavost loma), s obzirom na termomehaničku prirodu nastanka ATS, ne mogu dati odgovor ka sklonosti materijala ka nastanku ATS. Može se reći da sklonost ka nastanku ATS određuju pre svega:

- Svojstva materijala: gustina  $\rho$ , specifična toplota  $c$ , toplotna provodljivost  $\lambda$ , brzina deformacionog ojačavanja  $Q = (\partial\tau/\partial\dot{\gamma})$ , brzina omekšavanja materijala  $P = -(\partial\tau/\partial\theta)$
- Naponsko stanje: smicajni napon  $\tau$ , smicajna deformacija  $\gamma$ , brzina smicajne deformacije  $\dot{\gamma}$ , temperatura  $\theta$ , hidrostatički pritisak  $p$ .
- Mikrostruktura: veličina, oblik, međusobni razmak, orijentacija i raspodela sekundarnih faza, uključaka, taloga kao i tekstura i termička stabilnost mikrokonstituenata.

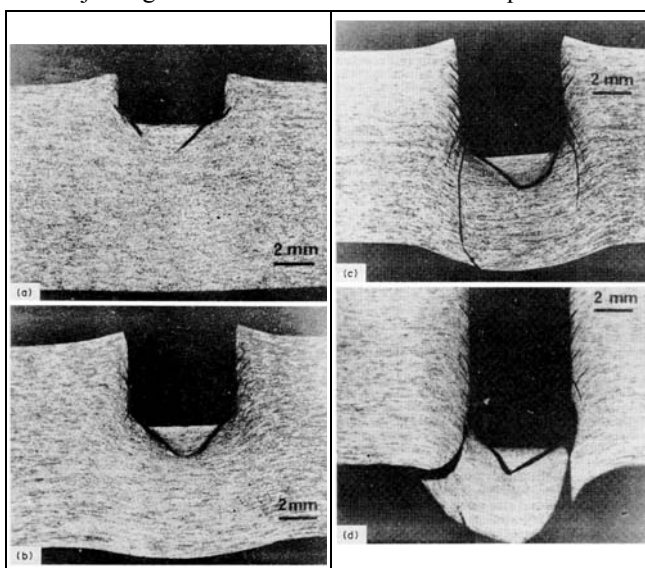
- Spoljni uslovi opterećenja: raspodela udarnog opterećenja

## OŠTEĆENJA USLED UDARNOG TALASA

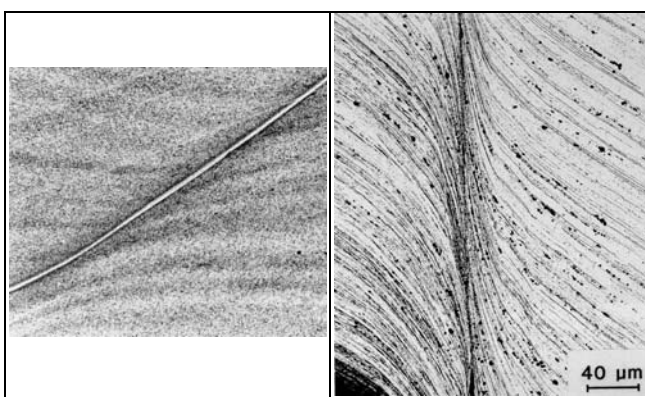
Pri dejstvu udarad od posebnog interesa je prostiranje plastičnih talasa, jer oni najčešće dovode do razaranja materijala. Za pojednostavljen slučaj da kriva napon-deformacija ne zavisi od brzine deformacije, brzina prostranja plastičnih talasa je data kao:

$$c_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon}} \quad (7)$$

gde je  $d\sigma/d\varepsilon$  nagib nominalne krive napon-deformacija. Tako svaki prirast plastične deformacije propagira različitom brzinom jer nagib krive  $d\sigma/d\varepsilon$  zavisi od veličine plastične



Slika 8. Uticaj brzine projektila na probijanje alumunijumske ploče, a) brzina projektila 196 m/s, b) 257 m/s, c) 315 m/s, d) 353 m/s



Slika 9. Transformisane, adijabatske trake smicanja nastale u čeliku pri brzini udara projektila od 3000 m/s, x252

Slika 10. Deformacione trake nastale u čeliku tvrdoće HV 80, pri brzini udara projektila od 311 m/s, x388

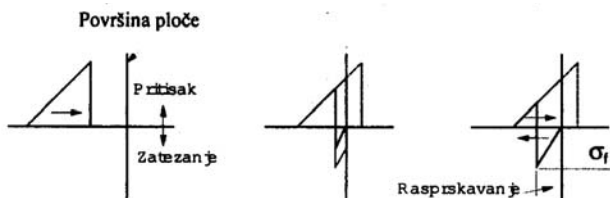
deformacije. Ovo znači da se oblik talasa menja sa njegovim prostiranjem. Brzine svake tačke u tako impulsno izloženoj konstrukciji je u vezi sa brzinom plastičnih talasa:

$$v_x = \int_0^{\epsilon} c_p d\epsilon = \frac{1}{\rho} \int_0^{\sigma} \frac{d\sigma}{c_p} = \int_0^{\epsilon} \left( \frac{d\sigma/d\epsilon}{\rho} \right) d\epsilon \quad (8)$$

Prva jednačina se koristi za određivanje deformacije ili napona u dinamički opterećenom materijalu. Druga jednačina vodi ka veoma značajnom zaključku da pri zateznoj čvrstoći materijala  $d\sigma/d\epsilon = 0$ , pa je i  $v_x = 0$ . Dakle, postoji veličina koja se naziva kritična brzina udara, pri kojoj dolazi do razaranja materijala. Ova kritična brzina za metale iznosi od 30 do 150 m/s. Najveće brzine deformacije se postižu eksplozivima, pri čemu je moguće postići udarne pritiske od 50 GPa.

Kao što je napred navedeno, sl. 3, postoje značajne razlike između karakteristika loma usled udarnog opterećenja i statičkog loma. Brzina prostiranja naponskih talasa u čvrstim telima je reda veličine 1 do 6 km/s, dok je brzina prostiranja prsline oko 2 km/s. Tako se ispitivanjima došlo do toga da postojeće prsline često nemaju vremena da propagiraju pre nego što se naponsko stanje promeni.

Do prelamanja naponskih ili udarnih talasa u konstrukciji dolazi na slobodnim površinama, na mestima promene površine poprečnog preseka i na mestima unutrašnjih grešaka u materijalu konstrukcije. Na sl. 11. je prikazano prostiranje jednog pritisknog talasa i njegove refleksije na slobodnoj površini. Očigledno je da usled promene znaka naponskog talasa na slobodnoj površini, može doći do lokalnog dostizanja napona loma  $\sigma_f$  i rasprskavanja metala na toj površini, iako mesto iniciranja naponskog talasa, odnosno udara, može da bude neoštećeno. U praksi ovo znači da oštećenje može da nastane i mestima udaljenim od mesta udara projektilom /4/.

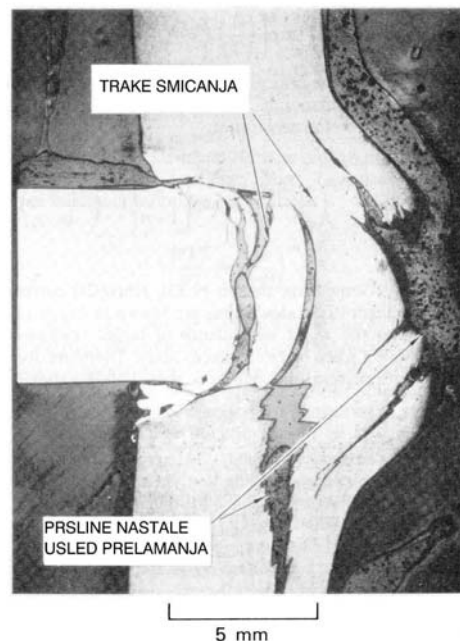


Slika 11. Shema prelamanja udarnog talasa na slobodnoj površini i pojava rasprskavanja

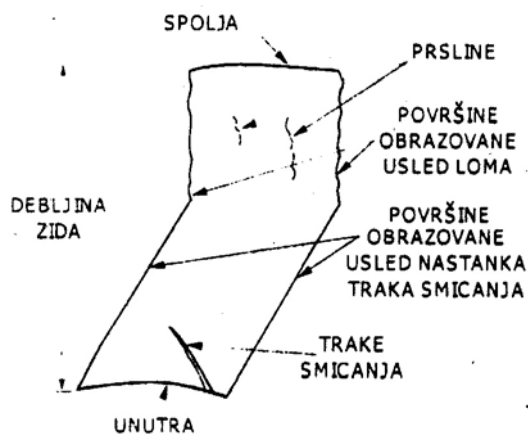
Na sl. 12. je prikazana kombinovana deformacija pri proboju projektilom. Jasno se uočava nastanak smicajnih traka i prsline na frontu projektila, nastalih prelamanjem talasa. Pri pojavi rasparčavanja, do oštećenja dolazi i na fragmentima konstrukcije. Shematski prikaz nastanka oštećenja na fragmentu eksplozivnog cilindra prikazan je na sl. 13 /5/.

Kod niskougleničnih nelegiranih konstrukcijskih čelika (npr. JUS C.B0.500) pri eksploziji dolazi do stvaranja prsline usled prelamanja naponskog talasa. Osobnost razaranja materijala usled prelamanja naponskog talasa, u odnosu na ATS, je da što su osnovna energija udara i žilavost loma veće, sklonost ka nastanku prsline je manja.

S obzirom da je pri razaranju materijala prelamanjem talasa dominantno zatezno opterećenje, jasno je da u ovom slučaju žilavost materijala ima presudnu ulogu na otpornost ka stvaranju prsline /4/.



Slika 12. Istovremeni nastanak traka smicanja i prsline usled prelamanja talasa na čeličnoj ploči



Slika 13. Poprečni presek tipičnog fragmenta nastalog iz eksplozivnog cilindra

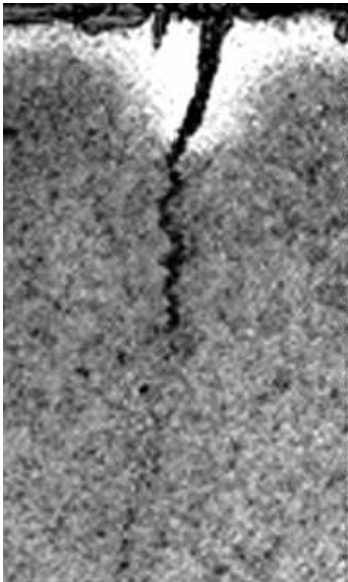
## OŠTEĆENJA USLED POŽARA

Osnovna oštećenja metala, nakon dejstva požara, mogu biti:

- razugljeničenje; i
- fazna transformacija prilikom gašenja požara.

Kako je zatezna čvrstoća čistog ferita oko 50 MPa, jasno je da i pri malim radnim opterećenjima, kod čelika sa razugljeničenim površinskim slojem, može doći do stvaranja inicijalnih prsline, sl. 14 /6,7/.

Dodatni problem, prilikom izloženosti konstrukcije požaru, može biti i sastav atmosfere proizvoda sagorevanja. Ukoliko postoje agresivni proizvodi sagorevanja, pored razugljeničenja, može se očekivati i pojava oksida po granicama zrna, na strani metala izloženoj požaru. Za razliku od razugljeničenja, pojava oksida po granicama zrna se teže utvrđuje metalografskim ispitivanjem.



Slika 14. Nastanak prsline iz razugljeničenog površinskog sloja

Visina temperature, dostignute požarom, od velikog je značaja iz dva razloga. Prvi razlog je mogućnost dostizanja temperature  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  transformacije, i samim tim mogućeg zakaljivanja tokom gašenja požara. Drugi razlog je što u slučaju više temperature (odnosno većih gradijenata temperature), grubo govoreći, može doći do termičkih šokova pri hlađenju konstrukcije i deformacije konstrukcije.

#### ZAKLJUČAK

1. Napred opisani tipovi oštećenja su pre svega razmatrani sa stanovišta osnovnog materijala. Kako je zavarivanje prisutno u izradi složenih konstrukcija i kako svaki zavarjeni spoj predstavlja mesto lokalne geometrijske i mikrostrukturne nehomogenosti, jasno je da je analiza mogućih oštećenja, kao posledice bombardovanja, još složenija.
2. Uobičajeni pristup problemu nastanka oštećenja u materijalu, u slučaju oštećenja nastalih nakon NATO

bombardovanja, nije primenljiv. Uobičajena svojstva materijala, kao što su napon tečenja, zatezna čvrstoća, izduženje i žilavost loma, nisu od pomoći pri razmatranju ponašanja materijala pri velikoj brzini deformacije.

3. Na osnovu dosadašnjih ispitivanja /8/ dostavljenih uzoraka nisu nađena navedena oštećenja. Ispitivanja materijala ČSN 11375.1, za potrebe GP "Mostogradnje" i NIS RN Rančevo, pokazala su da i pored izloženosti požaru, nije došlo do razugljeničenja i promene mehaničkih svojstava u odnosu na minimalno propisane.
4. Kako su oštećenja koja mogu nastati bombardovanjem, opisana u ovom radu, po svojim dimenzijama mala, vrlo se teško i nepouzdana određuju postojećim postupcima ispitivanja bez razaranja. Jedino probna opterećenja, kao npr. hidrottest, uz značajno korišćenje mernih traka, mogu pokazati prisustvo ovakvih grešaka. Tek uz kombinovanje ispitivanja mernim trakama i ispitivanja bez razaranja, moguće je dati, u određenom stepenu, odgovor na vrstu i obim oštećenja u materijalu, nastalih kao posledica bombardovanja.
5. S obzirom da je za procenu stepena oštećenja i mogućih kritičnih mesta za koje je saniranje neophodno, potrebno znati i vrstu ubojnog sredstva kojim je konkretna konstrukcija gađana, to znači da je potrebno angažovanje stručnjaka koji imaju više iskustva u ispitivanju i delovanju udarnog talasa ili kinetičkih udarnih projektila na materijal, kao i drugih specijalista, u cilju određivanja mogućih oštećenja u tako pogođenim konstrukcijama.

#### Literatura

1. Grabulov, V. "Određvanje parametara krive otpornosti primenom potenciometrijske metode za merenje rasta prsline", doktorska disertacija, TMF, Beograd, 1995.
2. ASM Handbook, Volume 8, Mechanical Testing, ASM International 1997, pp 187-288
3. Deiter, George E. "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill Book Company, 1988, pp 496-499
4. Drobnjak, Đ. "Fizička metalurgija", TMF, 1986, pp 180
5. Bai, Y., Dodd, B. "Adiabatic Shear Localisation", Pergamon Press, 1992
6. ASM CD-ROM, "Failure Analysis Library", ASM International, 1996
7. Honeycombe, R., Bhadeshia, H.K.D.H, "Steels - Microstructure and properties", Butterworth-Heinemann, 2000
8. Izveštaji Instituta za ispitivanje materijala broj 115-123 i 115-127 iz 1999. godine