

VEZA IZMEĐU TVRDOĆE I STEPENA DEFORMACIJE KOD ZAPREMINSKOG DEFORMISANJA CILINDRIČNIM ALATOM**HARDNESS – STRAIN RELATION IN A BULK FORMING WITH A CYLINDRICAL TOOL**Boško Vuković, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – PROIZVODNO MAŠINSTVO**

Kratak sadržaj – Delovi dobijeni hladnim deformisanjem metala odlikuju se povećanjem tvrdoće i čvrstoće, što je posledica deformacionog ojačavanja. U radu analizirana je promena tvrdoće po zapremini dela dobijenog hladnim deformisanjem cilindričnim alatom.

Ključne reči: Hladno deformisanje, Tvrdoća, Deformacija

Abstract – The main characteristic of cold formed metal parts is strain hardening which results in an increase of hardness and strength of material. In the paper hardness distribution within a part formed by a cylindrical tool is presented.

Keywords: Cold forming, Hardness, Strain

1. UVOD

Glavna karakteristika delova koji se dobijaju hladnim deformisanjem metala jeste deformaciono ojačavanje, što znači da su čvrstoća i tvrdoća materijala na kraju procesa deformisanja povećane u odnosu na čvrstoću i tvrdoću pre procesa deformisanja. Povećanje čvrstoće i tvrdoće metala nakon plastične deformacije objašnjava se na sledeći način. Glavni mehanizam plastičnog deformisanja predstavlja kretanje dislokacija koje međusobno reaguju, obrazuju nepokretne dislokacije ili grupe dislokacija koje predstavljaju prepreke za njihovo dalje kretanje. Kako se povećava stepen deformacije povećava se broj prepreka i gustina dislokacija. To za rezultat ima povećanje opterećenja potrebnog za nastavak procesa deformisanja, koje u stvari predstavlja deformaciono ojačavanje [1,2].

Merenje tvrdoće materijala predstavlja jedan od najčešće primenjivanih testova za ispitivanje materijala. Tvrdoća se može okarakterisati i kao otpor materijala prema plastičnoj deformaciji [3]. Tokom testa utiskivanja ispod utiskivača formira se plastična zona u kojoj se postepeno smanjuje veličina plastične deformacije [4,5].

U radu su analizirane vrednosti tvrdoće po zapremini dela koji je dobijen u eksperimentu sabijanja cilindričnim alatom. Metoda je izvedena u hladnom stanju tako da je u procesu deformisanja došlo do deformacionog ojačavanja što je uticalo i na povećanje vrednosti tvrdoće u deformisanom delu.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Miroslav Dramićanin, docent.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

U eksperimentalnom delu rada izvršena je provera zavisnosti između ostvarenog stepena deformacije i tvrdoće materijala. Deformisanje je ostvareno sabijanjem cilindričnim alatom, nakon čega je merena promena tvrdoće u zoni ispod delovanja žiga.

Za materijal je odabran konstrukcioni čelik S235. Na slici 1. prikazan je izgled uzorka pre sabijanja.



Slika 1. Izgled uzorka pre sabijanja

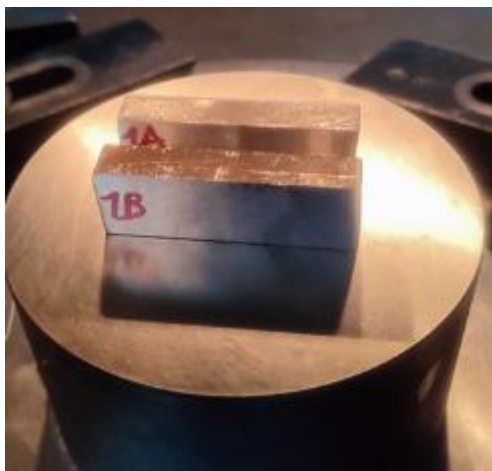
Mere uzoraka koji su ispitivani na sabijanje prikazane su u tabeli 1. Uzorci su sabijajni za različite stepene deformacije, odnosno za različite ostvarene hodove alata čije vrednosti su takođe prikazane u tabeli 1.

Tabela 1. Dimenzije uzoraka

Hod [mm]	Uzorak	Širina a [mm]	Visina b [mm]	Dužina l [mm]
2	1A	11,35	20,04	59,20
	1B	11,35	19,97	60,68
4	2A	11,35	20,00	59,43
	2B	11,35	20,05	58,46
6	3A	11,35	20,01	55,75
	3B	11,35	19,98	55,66
8	4A	11,35	20,03	59,14
	4B	11,35	19,97	56,85
10	5A	11,35	20,04	50,12
	5B	11,35	19,99	50,51

2.1. Eksperiment sabijanja

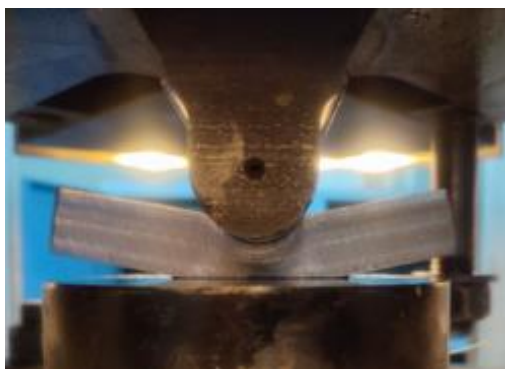
Alat korišten u eksperimentu sastojao se iz dva dela, donje ravne ploče (slika 2) i gornjeg cilindričnog žiga koji se utiskivao u materijal bočnom stranom cilindra (slika 3). Uzorci su sabijani za različite vrednosti hoda alata koji su prikazani u tabeli 1. Sam proces sabijanja (slika 4) je tekao na sledeći način. Po dva uzorka su postavljena u alat i sabijana za predviđenu vrednost hoda, pri čemu se sila očitavala na svakih 0,5 mm hoda.



Slika 2. Donja ploča alata



Slika 3. Utiskivanje žiga u materijal



Slika 4. Proces sabijanja uzorka

Nakon sabijanja svi uzorci imali su dodatnu deformaciju po širini usled tečenja materijala. Kako bi se izvršilo merenje promene tvrdoće po dubini uzorka, bilo je neophodno da se proširenje otkloni. Stoga se pristupilo obradi glodanjem da bi se uklonili krajevi koji su istisnuti,

a potom brušenju uzoraka, na mašini za brušenje, kako bi uzorci bili pripremljeni za merenje tvrdoće.

2.2. Metalografska ispitivanja

Metalografska priprema uzoraka ima tri osnovne faze: brušenje, poliranje i nagrizanje. Brušenje je izvedeno sa silicijum karbidnim brusnim papirima na uređaju za brušenje uzoraka sa dva diska. Korišteni su brusni papiri različite granulacije, od grublje ka finijoj. Prilikom brušenja uzorci su se konstantno hladili vodom kako bi se sprečila eventualna promena hemijskog sastava usled trenja između brusnog papira i površine metalnog uzorka i kako bi se odstranile nečistoće i produkti brušenja.

Nakon brušenja usledio je proces poliranja. Poliranje se izvodi tako što se na tkanine nanosi dijamantska suspenzija različitih granulacija, od veće ka manjoj. Uzorci su polirani sa svrhom uklanjanja ogrebotina nastalih brušenjem sve dok nije postignuta uglačana površina uzoraka. Svaka faza brušenja i poliranja kontrolisana je pomoću svetlosnog mikroskopa.

Nakon što su uzorci ispolirani, isprani su vodom, očišćeni alkoholom i osušeni toplim vazduhom. Ispolirani i očišćeni uzorci prikazani su na slici 5.



Slika 5. Ispolirani i očišćeni uzorci

Nakon postupaka brušenja i poliranja, poslednja faza pripreme uzorka je nagrizanje. Nagrizanje predstavlja razvijanje mikrostrukture materijala određenim hemijskim sredstvima kako bi mikrokonstituenti postali vidljivi. Uzorci su nagrizani nitalom (3% rastvor azotne kiseline, HNO_3 , u alkoholu). Na taj način uklonjeni su slojevi oksida ili nečistoća sa površine uzoraka i zrno je postalo vidljivo za analizu na mikroskopu.

Na pripremljenim uzorcima zabeležena je njihova mikrostruktura pomoću svetlosnog mikroskopa.

2.3. Merenje mikrotvrdoće

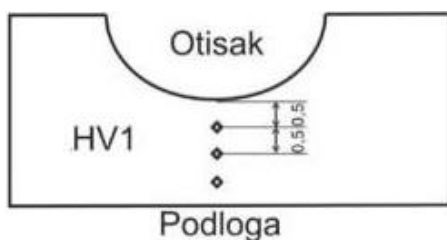
Na uređaju za ispitivanje mikrotvrdoće „Wilson Tukon 1102” vršeno je merenje tvrdoće po metodi Vickers. Opterećenje prilikom merenja je HV 1 kg, a utiskivač kod ovog postupka je četvorostrana dijamantska piramida sa uglom vrha od 136° .

Površina uzorka koji se ispituje treba biti ravna i glatka, kako bi se dijagonale otiska mogle tačno izmeriti. Nakon utiskivanja pritiskivača na površini uzorka ostaje kvadratni otisak čije se dijagonale mere pomoću uređaja, kao što je prikazano na slici 6. Sam uređaj na osnovu izmerenih dijagonala izračunava površinu utiskivanja.



Slika 6. Proces merenja tvrdoće i merenje dijagonala otiska

Merenje mikrotvrdoće vršeno je na pripremljenim uzorcima nakon metalografske analize. Prvo merenje je vršeno na 0,5 mm od ivice vrha uzorka. Kod narednih merenja mesto utiskivanja je pomerano ka sredini uzorka za po 0,5 mm kao što je prikazano na slici 7.

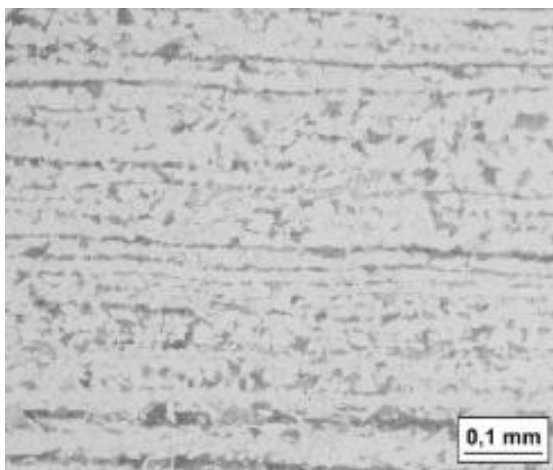


Slika 7. Šema merenja mikrotvrdoće

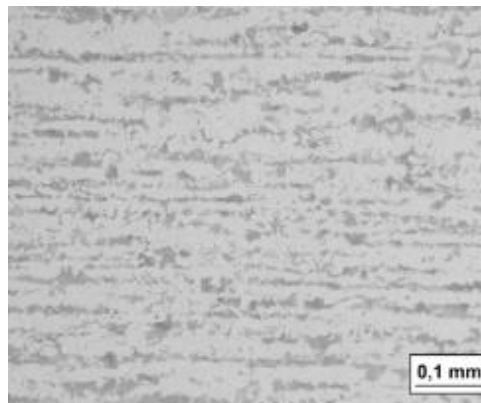
3. REZULTATI I DISKUSIJA

Analizom poliranih uzoraka ustanovljen je mali broj uključaka koji je dozvoljen u materijalu. Nakon nagrizanja poliranih uzoraka razvijena je mikrostruktura. Na slikama 8 i 9 prikazana je mikrostruktura u uzdužnom i poprečnom preseku uzorka, redom.

Uočava se trakasta struktura usled postupka dobijanja materijala. Suštinska razlika je u smeru valjanja, na slici 8 trake su duže i bez prekida, dok su na slici 9 trake češće isprekidane. Trakavost je dozvoljena u materijalu.



Slika 8. Uključci u uzdužnom preseku uzorka



Slika 9. Uključci u poprečnom preseku uzorka

U eksperimentu sabijanja registrovana je promena sile kod deformisanja svakog uzorka. Vrednosti koje su očitane sa prese, tačnije hod i sila prese za uzorak 2 prikazane su u tabeli 2.

Tabela 2. Promena sile u zavisnosti od hoda – uzorak 2

Hod [mm]	0,6	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Sila [kN]	160	200	250	290	320	350	370	400

Na osnovu izmerenih visina uzoraka na mestu najmanje debljine nakon sabijanja pristupljeno je računanju logaritamskog stepena deformacije, φ . Logaritamski stepen deformacije izračunat je za svaki sabijeni uzorak pomoću izraza (1):

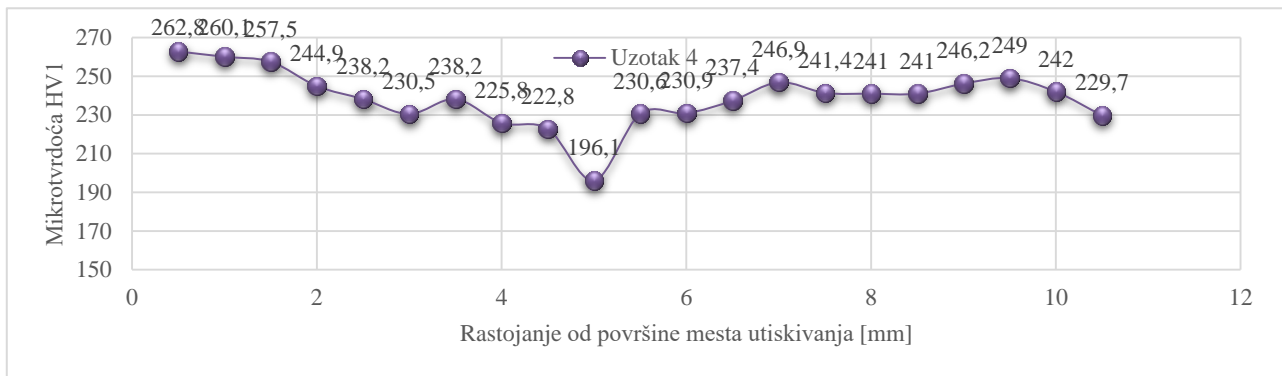
$$\varphi = \ln \frac{b_0}{b} \quad (1)$$

Dimezije uzoraka pre i posle deformisanja, kao i ostvareni stepeni deformacije prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3. Stepni deformacije u eksperimentu sabijanja

Hod [mm]	Uzorak	Početna dimenzija uzorka [mm]	uzorka nakon sabijanja [mm]	Logaritamski stepen deformacije φ
2	1A	20,04	18,26	0,09
	1B	19,97		0,09
4	2A	20	16,10	0,22
	2B	20,05		0,22
6	3A	20,01	14,25	0,34
	3B	19,98		0,34
8	4A	20,03	12,15	0,50
	4B	19,97		0,50
10	5A	20,04	10,41	0,65
	5B	19,99		0,65

Ispitivanje mikrotvrdoće sprovedeno je metodom po Vickersu (opterećenje od 1 kg u vremenu od 10 sekundi). Na slici 10 prikazana su promene mikrotvrdoće po preseku uzorka merene na mestu najmanje debljine za uzorak. Srednja vrednost izmerene mikrotvrdoće osnovnog materijala pre ispitivanja iznosi 180 HV1.



Slika 10. Promena mikrotvrdoće po preseku uzorka merene na mestu najmanje debljine za uzorak 2

S obzirom da je proces deformisanja izveden u hladnom stanju materijal je deformaciono ojačao. To znači da je kod uzoraka sa većim stepenom deformacije očekivana veća čvrstoća i tvrdoća materijala. Takođe, u delu materijala koji je bliže alatu stepeni deformacije su veći pa samim tim i tvrdoća materijala. Rezultati merenja mikrotvrdoće za uzorke 1, 2, 4 i 5 se u najvećoj meri slažu sa očekivanim vrednostima. Odstupanje postoji kod uzorka broj 3 jer je kod njega dobijena manja mikrotvrdoća nego kod uzorka broj 2, kod koga je bio ostvaren manji stepen deformacije.

U tabeli 4 prikazan je odnos stepena deformacije i procentat porasta srednje mikrotvrdoće ispod mesta utiskivanja u odnosu na početnu vrednost.

Tabela 4. Odnos stepena deformacije i procenta porasta mikrotvrdoće ispod mesta utiskivanja u odnosu na početnu vrednost

Stepen deformacije	0,09	0,22	0,34	0,50	0,65
Porast mikrotvrdoće [%]	0,18	0,34	0,19	0,46	0,44

Jedan od razloga zašto mikrotvrdoća varira 0,5 mm ispod površine utiskivanja jeste u samom materijalu, odnosno za proračun je korišćena srednja vrednost tvrdoće osnovnog materijala koja je merena u sredini uzorka, dok zbog samog načina dobijanja čelične ploče mikrotvrdoća uz površinu materijala može varirati. Pre ispitivanja nije za svaki uzorak detaljno provereno kolika je mikrotvrdoća sa koje strane ploče. Kod uzorka 5 vidljiv je porast mikrotvrdoće od mesta utiskivanja do podloge, odnosno najveća mikrotvrdoća je izmerena 0,5 mm od same podloge, gde je takođe došlo do značajnih deformacija, što potvrđuje da je najverovatnije uz površinu ploče bila drugačija mikrotvrdoća.

4. ZAKLJUČAK

Jedna od bitnih karakteristika procesa plastičnog deformisanja koji se odvijaju u hladnom stanju jeste deformaciono ojačavanje materijala. Deformaciono ojačavanje rezultira povećanjem čvrstoće i tvrdoće oblikovanog dela, kao i smanjenjem plastičnosti i žilavosti.

U radu analiziran je uticaj deformacionog ojačavanja materijala na promenu mikrotvrdoće po zapremini deformisanog dela. Proces hladnog deformisanja izveden je na alatu koje se sastojao od donje ravne ploče i gornjeg

cilindričnog žiga koji se utiskivao u materijal bočnom stranom cilindra. Materijal korišten u eksperimentu bio je čelik S235.

Promena mikrotvrdoće merena je na poprečnom preseku uzorka na mestu njegove najmanje debljine. Mikrotvrdoće su merene na uzorcima koji su deformisani za različite stepene deformacije. Dobijeni rezultati u velikoj meri se slažu sa teorijskom pretpostavkom da će tvrdoća materijala rasti sa stepenom deformacije. Na osnovu međusobnog poređenja rezultata mikrotvrdoće, dobijene vrednosti su očekivane i u skladu sa deformacionim ojačavanjem materijala. Uočljiv je porast mikrotvrdoće koji odgovara porastu stepena deformacije.

Zbog uočenih problema u samom materijalu, odnosno blažeg rasipanja mikrotvrdoće uz površinu čeličnih ploča u odnosu na sredinu, pre budućih ispitivanja potrebno je uraditi meko žarenje materijala kako bi se te male razlike u mikrotvrdoći još više umanjile.

5. LITERATURA

- [1] L. Šiđanin, "Mašinski materijali SV 2", FTN Novi Sad, 2014.
- [2] W. D. Callister, D. G. Rethwisch, "Materials science and engineering, An introduction", Wiley USA, 2014.
- [3] E. Broitman, "Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview", *Tribology Letters*, Vol. 65, No. 1, 2017.
- [4] G. Sundararajan, Y. Tirupataiah, "The hardness-flow stress correlation in metallic materials", *Bulletin of Materials Science*, Vol. 17, No. 6, pp. 747–770.
- [5] D. Tabor, "The hardness of metals", Oxford at the Clarendon press, 1951.

Kratka biografija:



Boško Vuković rođen je u Trebinju 1996. godine. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka na smeru Proizvodno mašinstva, gde je nastavio školovanje na master studijama. Master rad je odbranio 2024. godine. kontakt:boskovukovic0@gmail.com