



FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U ČAČKU
UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU
KATEDRA ZA MEHATRONIKU
Čačak, Srbija



38. SAVETOVANJE PROIZVODNOG MAŠINSTVA SRBIJE
- SPMS 2021 -
38th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION
ENGINEERING OF SERBIA
- ICPE-S 2021 -

14 – 15. October 2021, Čačak, Serbia

ZBORNIK RADOVA
PROCEEDINGS

EDITORS: Jelena Baralić, Nedeljko Dučić



38. Savetovanje Proizvodnog Mašinstva Srbije - SPMS 2021
ZBORNIK

38th International Conference on Production Engineering of Serbia - ICPE-S 2021
PROCEEDINGS

ISBN: 978-86-7776-252-0

Urednici

Editors

Jelena Baralić

Nedeljko Dučić

University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia

Izdavač

Publisher

University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia

Svetog Save 65, 32000 Čačak, Serbia

Za izdavača

For the Publisher

Danijela Milošević

University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia

Tehnička obrada

Technical editor

Ivan Milićević

University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia

Edition

70 copies

Printed by

University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia

Copyright Notice:

Copyright © 2021 by University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia. Permission to make digital or hard copies of portions of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyright for components of this work owned by others than University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia, must be honored. Abstracting with credit is permitted. To copy otherwise, to republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee. Request permission to republish from Department of Mechatronics, Faculty of Technical Sciences Čačak, University of Kragujevac, Serbia: jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs

The publication of this Proceedings was financially supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia

Naučni odbor:
International Scientific Committee

President:

Srećko Čurčić, Univerzitet u Kragujevcu, Srbija

Members:

Bojan Babić, University of Belgrade, Serbia
Petar Petrović, University of Belgrade, Serbia
Zoran Miljković, University of Belgrade, Serbia
Ljubodrag Tanović, University of Belgrade, Serbia
Radovan Puzović, University of Belgrade, Serbia
Ilija Ćosić, University of Novi Sad, Serbia
Sebastian Baloš, University of Novi Sad, Serbia
Milenko Sekulić, University of Novi Sad, Serbia
Slobodan Tabaković, University of Novi Sad, Serbia
Branko Škorić, University of Novi Sad, Serbia
Miodrag Hadžistević, University of Novi Sad, Serbia
Milan Zeljković, University of Novi Sad, Serbia
Dragiša Vilotić, University of Novi Sad, Serbia
Marin Gostimirović, University of Novi Sad, Serbia
Bojan Lalić, University of Novi Sad, Serbia
Jelena Radonić, University of Novi Sad, Serbia
Miodrag Manić, University of Nis, Serbia
Predrag Janković, University of Nis, Serbia
Dragan Adamović, University of Kragujevac, Serbia
Goran Devedžić, University of Kragujevac, Serbia
Milan Erić, University of Kragujevac, Serbia
Bogdan Nedić, University of Kragujevac, Serbia
Milan Kolarević, University of Kragujevac, Serbia
Mirko Đapić, University of Kragujevac, Serbia
Snežana Dragičević, University of Kragujevac, Serbia
Jasmina Vesić-Vasović, University of Kragujevac, Serbia
Slavica Cvetković, University of Pristina, Serbia
Srećko Manasijević, LOLA Institute, Serbia
Vladimir Kvrgić, Mihajlo Pupin Institute, Serbia
Ivan Milićević, University of Kragujevac, Serbia
Zoran Pandilov, Ss. Cyril and Methodius University, Skopje, North Macedonia
Radomir Vukasojević, University of Montenegro, Montenegro
Janez Kopač, University of Ljubljana, Slovenia
Mirko Soković, University of Ljubljana, Slovenia
Gordana Lakić Globočki, University of Banja Luka, RS, BiH
Simo Jokanović, University of Banja Luka, RS, BiH
Milija Krašnik, University of East Sarajevo, RS, BIH
Vlatko Marušić, University Josip Jurje Strossmayer, Croatia
Zoran Jurković, University of Rijeka, Croatia
Milan Jurković, University of Bihać, BIH
Radovan Kovačević, Southern Methodist University, USA
Goran Putnik, University of Minho, Portugal
Frank Vollertsen, University Bremen, Germany
Viktor Starkov, State Tehcnological University Stankin, Russia

Sergei Alexandrov, Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences, Russia
Mykola Ivanovich Bobyr, National Technical University of Ukraine, UA
Klimenko Sergei Anatolievich, V. Bakul Institute for superhard materials ISM, UA
Klaus Kabitzsch, Dresden University of Technology, Germany
Mircea Nicoara, University of Timisoara, Romania
Stefan Kirilov Kartunov, Technical university of Gabrovo, Bulgaria
Miroslav Badida, Technical University of Kosice, Slovak Republic
Sergej Hloch, Technical University of Kosice, Slovak Republic
Alan Bramley, University Bath, UK
Peter Hartley, University Birmingham, UK
Kornel Ehmann, Northwestern University, USA
Michael Kheifetz, Polotsk State University, Belarusian

Počasni odbor:
The Honorary Committee

Pavao Bojanić, University of Belgrade
Milenko Jovičić, University of Belgrade
Milisav Kalajdžić, University of Belgrade
Dragan Milutinović, University of Belgrade
Miroslav Pilipović, University of Belgrade
Miloš Glavonjić, University of Belgrade
Vidosav Majstorović, University of Belgrade
Sava Sekulić, University of Novi Sad
Velimir Todić, University of Novi Sad
Dragoje Milikić, University of Novi Sad
Bogdan Sovilj, University of Novi Sad
Jelena Stankov, University of Novi Sad
Miroslav Plančak, University of Novi Sad
Pavel Kovač, University of Novi Sad
Miodrag Lazić, University of Kragujevac
Milentije Stefanović, University of Kragujevac
Ratko Mitrović, University of Kragujevac
Slavko Arsovski, University of Kragujevac
Branislav Jeremić, University of Kragujevac
Milorad Jovanović, University of Kragujevac
Vučko Mečanin, University of Kragujevac
Tihomir Pantelić, University of Kragujevac
Ratomir Ječmenica, University of Kragujevac
Snežana Radonjić, University of Kragujevac
Miomir Vukićević, University of Kragujevac
Ljubomir Lukić, University of Kragujevac
Velibor Marinković, University of Niš
Vojislav Stoilković, University of Niš
Dragan Domazet, University of Niš
Dragan Temeljkovski, University of Niš
Miroslav Trajanović, University of Niš
Miroslav Radovanović, University of Niš
Svetislav Dekić, University of Priština
Vid Jovišević, University of Banja Luka



Srbija
Society of Production
Engineering

SPMS 2021
38. Svetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije
ICPE-S 2021
38th International Conference on Production
Engineering -Serbia

Čačak, Serbia, 14 – 15. October 2021



Faculty of technical sciences
Čačak
University of Kragujevac

ODREĐIVANJE EKSPONENTA DEFORMACIONOG OJAČAVANJA ZA LIMOVE OD RAZLIČITIH MATERIJALA

Srbislav ALEKSANDROVIĆ^{1*}, Radovan BAČANIN², Marko DELIĆ³, Vukić LAZIĆ⁴, Dušan ARSIĆ⁵

^{1, 3, 4, 5} Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Srbija

²Sloboda-Čačak, Srbija

*srb.alexand@gmail.com

Apstrakt: U ovom radu su izloženi rezultati eksperimentalnih istraživanja iz oblasti deformabilnosti, i to iz oblasti deformabilnosti tankih limova. Jedan od ciljeva istraživanja i publikovanja rada je reafirmacija eksponenta deformacionog ojačavanja ("n" faktora) kao vrlo važnog parametra deformabilnosti.

Obiman eksperiment je zamišljen sa primenom tri metode za određivanje eksponenta deformacionog ojačavanja ("n" faktora) uz korišćenje 8 različitih materijala, čeličnih i materijala od obojenih metala i legura. Metode su bazirane na korišćenju savremene kompjuterizovane eksperimentalne opreme. U eksperimentu su korišćeni sledeći limovi: mesing CuZn37 (debljina 0.8 mm), austenitni nerđajući čelik X5CrNi18-10 (1.5 mm), niskougljenični čelik DC04 (0.8 mm), austenitni nerđajući čelik X5CrNiMo17-12-2 (2.0 mm), opružni čelik 51CrV4 (0.6 mm), Al legura AlMg3 (1.5 mm), Al legura AlCu4Mg1Mn (1.0 mm) i čist bakar Cu-DHP (0.8 mm). Izvršena je procena primenjenih metoda ispitivanja, kao i analiza i procena dobijenih rezultata za ispitivane materijale. Može se zaključiti da su primenjene metode veoma uspešne, i da su vrednosti "n" faktora ispitivanih materijala visoke tačnosti i vrlo upotrebljive u praksi.

Ključne reči: deformabilnost, limovi, eksponent deformacionog ojačavanja.

1. UVOD

U tehnološkim procesima plastičnog oblikovanja metala veliki značaj ima procena sposobnosti materijala za takvo oblikovanje, koju je potrebno doneti unapred, tokom projektovanja tehnologije. To važi u opštem slučaju, a naročito za plastično oblikovanje tankih limova kao specifičnih materijala. Upravo pomenuta sposobnost za plastično oblikovanje, kao skup osobina materijala, najčešće se obuhvata opštim terminom deformabilnost. Paralelno egzistiraju i termini: obradivost, plastičnost, duktilnost, istegljivost

itd. Bez ulaska u detalje tumačenja značenja termina, što je u sferi jezika, t.j. semantike, može se reći da je u višedecenijskoj praksi preovladao termin deformabilnost (eng. formability) i da se odnosi na oblast plastičnog oblikovanja metala. Elastične defromacije, iako prisutne na početku procesa plastičnog oblikovanja, svojim višestruko manjim intenzitetom nisu ključne i predstavljaju tek smetnju, koju treba imati u vidu.

Procena deformabilnosti uvek iznova dobija na značaju pojavom novih materijala koji uglavnom imaju naglašene visoke vrednosti

karakteristika čvrstoće i značajno manju plastičnost.

Na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu (do 2011.g. Mašinskom fakultetu u Kragujevcu) nekoliko decenija se izvode istraživanja vezana za deformabilnost tankih limova. Neke od referenci koje odnose se na konkretnu temu ovoga rada date su u spisku literature ([1], [2], [3], [4], [5], [6]).

Određivanje deformabilnosti obavezno podrazumeva eksperimentalna ispitivanja, iako je moguće koristiti i virtualnu (numeričku, kompjutersku) procenu preko različitih softvera.

Ispitivanje deformabilnosti može se podeliti na nekoliko oblasti [6]:

- 1) osnovni parametri,
- 2) deformaciono ojačavanje i krive tečenja,
- 2a) eksponent deformacionog ojačavanja ili "n" - faktor,
- 3) anizotropija,
- 3a) koeficijent normalne anizotropije ili "r" - faktor,
- 4) defleksione pojave,
- 6) granična deformabilnost,
- 9) kontaktni problemi, odnosno tribološke pojave.

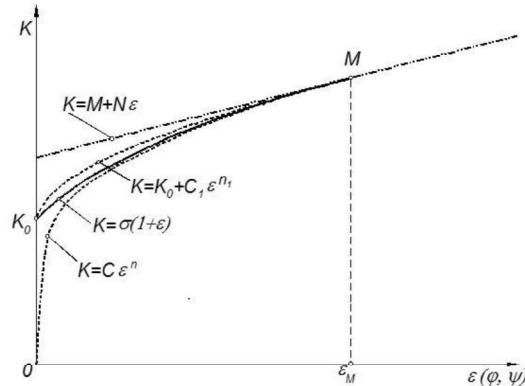
Izučavanje fenomena deformacionog ojačavanja i procene njegovog uticaja na deformabilnost savremenih materijala je tema različitih istraživanja u svetu od kojih su ovde radi ilustracije navedena samo tri ([7], [8], [9]). Najjednostavniji i najpraktičniji način određivanja intenziteta deformacionog ojačavanja je preko eksponenta deformacionog ojačavanja ili "n" faktora. U ovom radu je izvedeno opsežno ispitivanje 8 različitih limova uz primenu 3 metode određivanja "n" faktora. Cilj je, s jedne strane, proceniti pouzdanost metoda ispitivanja na savremenim materijalima, a s druge, odrediti ovaj značajan parametar i analizirati njegove vrednosti iz aspekta uticaja na deformabilnost.

2. EKSPONENT DEFORMACIONOG OJAČAVANJA

Deformaciono ojačavanje je fenomen koji se javlja kod metala i legura pri ostvarivanju plastičnih (trajnih) deformacija i podrazumeva

porast karakteristika čvrstoće sa porastom vrednosti plastične deformacije, uz pad karakteristika plastičnosti. Naročito je izraženo u hladnom stanju i zavisi prvenstveno od vrste i stanja materijala, dok ne zavisi od vrste naponskog stanja. U topлом stanju značajan uticaj ima brzina deformacije. Iz prethodnog bi se dalo zaključiti da je u slučajevima izraženog deformacionog ojačavanja deformabilnost nepovoljnija i obrnuto. Međutim, to nije uvek sasvim tako. Iz ovog razmatranja treba isključiti materijale veoma niske polazne plastičnosti, odnosno veoma krte materijale gde plastično oblikovanje i nije moguće izvesti u nekom značajnjem obimu. Dakle, postoje materijali odlične plastičnosti, međutim ako je kod njih ojačavanje minimalno, javlja se problem neprihvatljivo niske čvrstoće i krutosti gotovih otpresaka. Najbolje je da materijal ima odličnu polaznu plastičnost uz vrlo niske parametre čvrstoće, a da se efektom ojačavanja konačno dobije otpresak sa visokim vrednostima čvrstoće. Nažalost, to je uglavnom teško ostvariti, pa se danas često pribegava oblikovanju specijalnih limova vrlo visoke čvrstoće u topлом stanju.

Najbolje praćenje efekta deformacionog ojačavanja ostvaruje se preko krivih tečenja ili krivih ojačanja ([1], [2], [3], [4], [5], [6]). One se određuju eksperimentalno i za limove se uglavnom koristi test jednoosnog zatezanja.

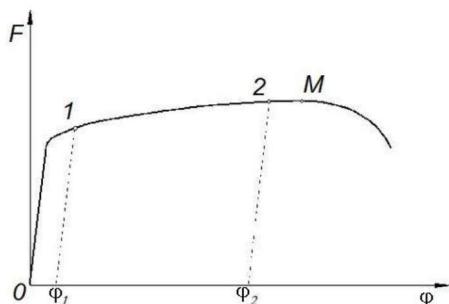


Slika 1. Kriva ojačanja i aproksimacije

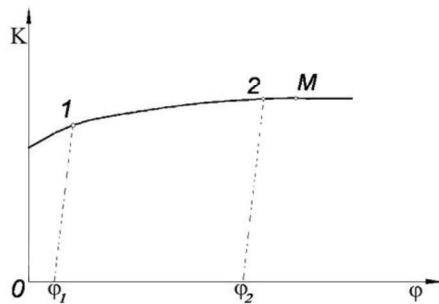
Kriva tečenja je uglavnom glatka monotono rastuća kriva linija eksponencijalnog tipa. Na slici 1 eksperimentalna kriva predstavljena je punom linijom, a tri analitičke aproksimacije isprekidanim linijama. Naročito je korisna

aproksimacija tipa **K=C·(deformacija)ⁿ**, koja se u zapadnoj literaturi naziva Holomonovim izrazom [7]. Jasno je da eksponent "n" određuje nagib krive i odmah je ustanovljeno da može da posluži kao značajan parametar koji direktno pokazuje intenzitet ojačavanja, a posredno utiče na deformabilnost. Uvidela se dobra korelacija sa parametrom Eriksenovog testa za limove, kao i sa intenzitetom maksimalne homogene plastične deformacije pri jednoosnom zatezanju. U početku se mislilo da "n" faktor može da bude univerzalni parametar deformabilnosti, ali je ubrzo postalo jasno da je njegova direktna primena kao parametra deformabilnosti moguća samo u situacijama oblikovanja limova sa preovlađujućim zatežućim naponima u ravni pri čemu je obod komada potpuno blokiran ili njegovo klizanje veoma otežano ([1], [2]). Ta naponsko-deformaciona shema kod limova je nazvana "razvlačenje" (eng. stretching). U ostalim slučajevima potrebno je kompletnije ispitivanje deformabilnosti. Treba naglasiti veliki značaj "n" faktora i u tim slučajevima, i neizostavno ga treba određivati.

Za ovo eksperimentalno ispitivanje odabrane su tri metode ([3], [6], [10]), ili preciznije, suštinski dve metode pri čemu je prva (sl. 2 i 3) izvedena u dve varijante.



Slika 2. Kriva zatezanja



Slika 3. Kriva ojačanja

Prva metoda za određivanje eksponenta "n" zasniva se na preciznom definisanju dve tačke bilo na krivoj jednoosnog zatezanja (sl. 2), bilo na krivoj tečenja (sl. 3). Tačke isključivo moraju biti u oblasti homogenog deformisanja, ali što bliže početku i kraju te oblasti. Kad su tačke i odgovarajuće vrednosti definisane lako se dolazi do izraza za "n":

$$n = \frac{\ln \frac{K_2}{K_1}}{\ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1}} = \frac{\ln \frac{F_2 l_2}{F_1 l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0} - \ln \frac{l_1}{l_0}} \quad (1)$$

Treba primetiti da zapravo i nije potrebna celokupna kriva (bilo zatezanja, bilo ojačanja) nego samo odgovarajuće vrednosti (sile F_1 i F_2 , dužine l_1 i l_2). Ipak, veoma je korisno uraditi kompletni test zatezanja i zbog drugih karakteristika, osim "n" faktora.

Druga varijanta prve metode podrazumeva zatezanje ne do kidanja epruvete, nego samo do postizanja maksimalne sile, što predstavlja kraj homogenog deformisanja. Zbog toga druga varijanta predstavlja jednu vrstu ponavljanja i provere.

Treća metoda zasniva se na jednoosnom zatezanju specijalne stepenaste epruvete koja ima dve merne zone različitih širina (u ovom slučaju 20 i 22 mm). Slično prvoj metodi, pravi se odnos deformacionih otpora, samo što se ovde umesto vrednosti za tačke sa dijagrama uzimaju vrednosti za užu i šиру zonu epruvete. Konačan izraz za "n" faktor je:

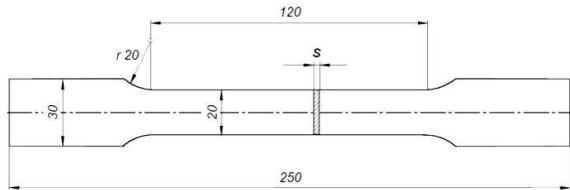
$$n = \frac{\ln \frac{b_{02} l_{02} l_1}{b_{01} l_{01} l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} - \ln \frac{l_2}{l_{02}}} \quad (2)$$

Odmah se zapaža da u izrazu (2) nema vrednosti sila nego figurašu samo dimenzije epruvete (b_0 i l_0) i izduženja obe zone (l_1 , l_2). Zato nije potrebno snimati dijagrame. Međutim, eksperiment je veoma zahtevan. Epruveta je složenije geometrije i ispitivanje se obično izvodi u 2 ili 3 faze. Prekid zatezanja, rasterećenje, skidanje i ponovo nameštanje epruvete može predstavljati priličnu teškoću

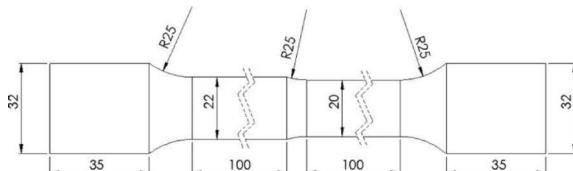
kod velikog broja uzoraka. Problem predstavlja i potreba prethodnog definisanja stepena deformisanja za svaku fazu. Pogodno je da on bude što veći. Jedini način je prethodna eksperimentalna proba. Konačna vrednost "n" faktora je srednja vrednost za sve faze ispitivanja.

2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Plan eksperimenta predviđa ispitivanje limova od osam različitih materijala po tri metode koje su objašnjene. Uključujući pripremne probe, ponavljanja i konkretna ispitivanja bilo je potrebno oko 50 epruveta. Za prve dve metode koristi se standardna epruveta sa sl. 4.



Slika 4. Epruveta za metode 1 i 2



Slika 5. Epruveta za metodu 3

Korišćeni su sledeći limovi: 1) CuZn37 (CW 508L), 2) DC04 (Č0148), 3) X5CrNi18-10 (Č4580), 4) X5CrNiMo17-12-2 (Č4574), 5) 51CrV4 (Č4830), 6) AlMg3, 7) AlCu4Mg1Mn (2024 T3 AIR) i 8) CuDHP (DVP 1 Cu.38). Zbog ograničenog prostora detaljnije će biti prikazani rezultati za odabrane materijale (pod rednim brojem 1, 4 i 7). Izrada epruveta vršena je na mašini za sečenje vodenim mlazom (sl. 6) u kompaniji "Sloboda" Čačak. Dorada mernih zona je vršena brušenjem. Neposredna ispitivanja jednoosnim zatezanjem vršena su na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu u Laboratoriji za obradu deformisanjem i mašinske materijale na kompjuterizovanom mernom sistemu za ispitivanje materijala Zwick-Roell Z100 (sl. 7). Merni opseg sile je 0-100 kN, brzina

deformisanja 10 mm/min i sobna temperatura ispitivanja.



Slika 6. Izrada epruveta vodenim mlazom



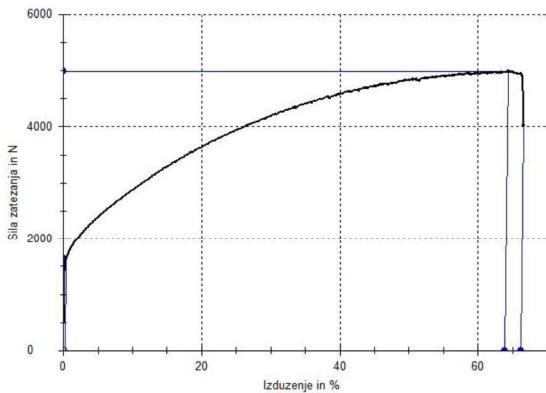
Slika 7. Merni sistem za ispitivanje materijala

3. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA

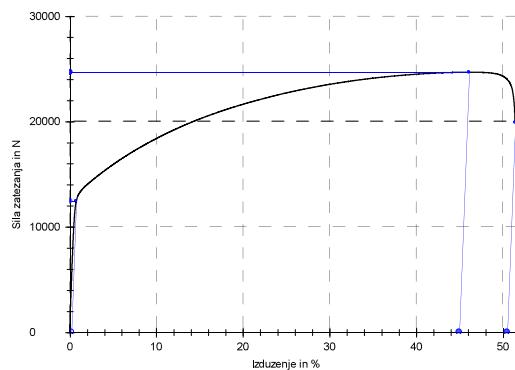
Kako je napomenuto biće prikazani rezultati za sledeće limove: 1) CuZn37 (CW 508L), 4) X5CrNiMo17-12-2 (Č4574) i 7) AlCu4Mg1Mn (2024 T3 AIR). U tabeli 1 date su osnovne karakteristike lima 1). Zatim na sl. 8 sledi dijagram zatezanja za primenu prve metode. Na sl. 9 je dijagram zatezanja za drugu metodu. Ukupan pregled svih rezultata dat je u tabeli 4, a posle dijagrama za konkretan materijal biće dati rezultati "n" faktora za svaku metodu.

Tabela 1. Osnovne karakteristike materijala

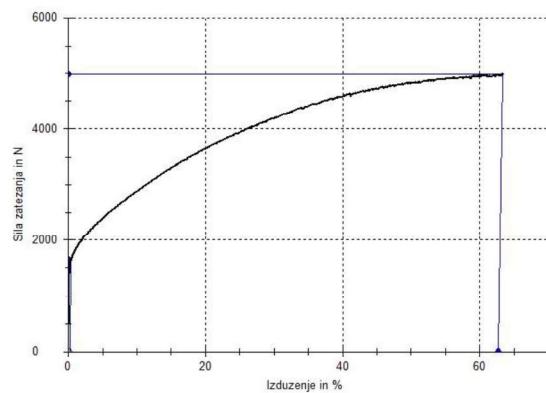
CuZn37 - debljina lima 0.8 mm		L ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	Ag %	A %
Merenje do kidanja epruvete	120.00	16.08		101.80	309.92	63.90	66.2
Merenje do maksimalne sile	120.00	16.08		101.66	309.61	62.78	



Slika 8. Kriva zatezanja za lim od CuZn37



Slika 10. Kriva zatezanja za lim X5CrNiMo17-12-2



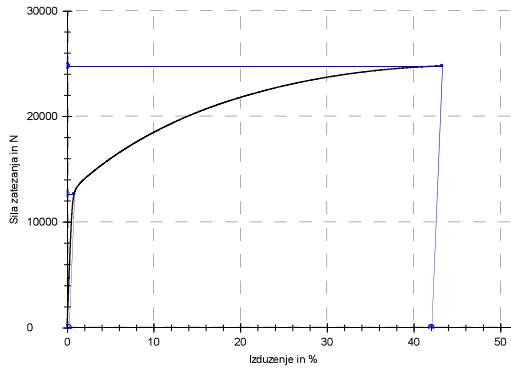
Slika 9. Druga kriva zatezanja za lim od CuZn37

Vrednosti "n" faktora za lim od mesinga CuZn37 su: po prvoj metodi 0,521; po drugoj metodi 0,455 dok su po trećoj metodi rađene 3 faze kojima respektivno odgovaraju sledeće vrednosti: 0,452; 0,535; 0,558. Detalji merenja i izračunavanja vrednosti mogu se naći u [10].

Tabela 2. Osnovne karakteristike materijala

X5CrNiMo17-12-2; 2 mm						
	L ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	Ag %	A %
Do kidanja epruvete	120.0	40.7	305.4	605.9	45.0	50.5
Do maksimalne sile	120.0	40.7	310.1	608.8	42.1	

U tabeli 2 su date osnovne karakteristike lima od austenitnog nerđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2, debljine 2 mm. Na slikama 10 i 11 su odgovarajući dijagrami zatezanja.



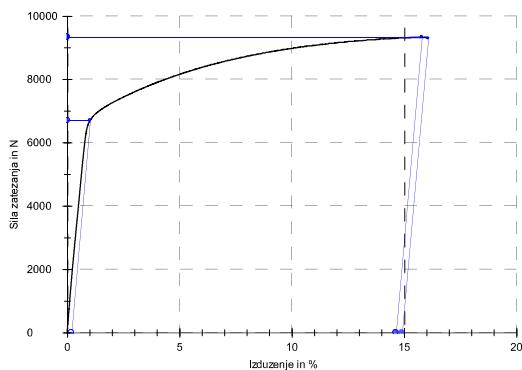
Slika 11. Drugi dijagram za lim X5CrNiMo17-12-2

Vrednosti "n" faktora za lim od čelika X5CrNiMo17-12-2 su: po prvoj metodi 0,480; po drugoj metodi 0,463 dok su po trećoj metodi rađene 3 faze kojima respektivno odgovaraju sledeće vrednosti: 0,219; 0,376; 0,400.

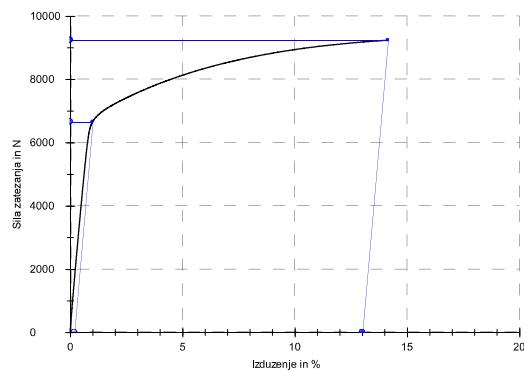
Tabela 3. Osnovne karakteristike materijala

AlCu4Mg1Mn; 1mm						
	L ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	Ag %	A %
Do kidanja epruvete	120	20.1	334	465.1	14.6	14.9
Do maksimalne sile	120	20.1	331.8	460	13.0	

U tabeli 3 su date osnovne karakteristike lima od luminijumske legure AlCu4Mg1Mn, debljine 1 mm. Na slikama 12 i 13 su odgovarajući dijagrami zatezanja



Slika 12. Kriva zatezjanja za lim AlCu4Mg1Mn

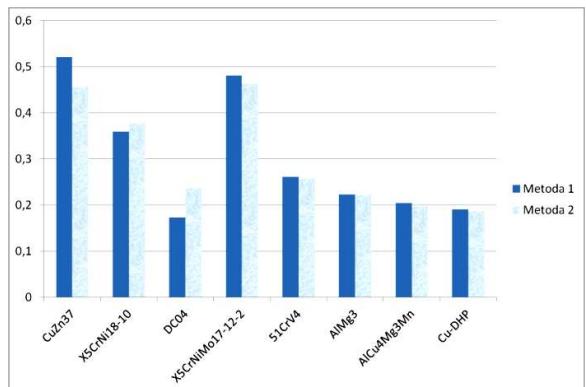


Slika 13. Drugi dijagram za lim AlCu4Mg1Mn

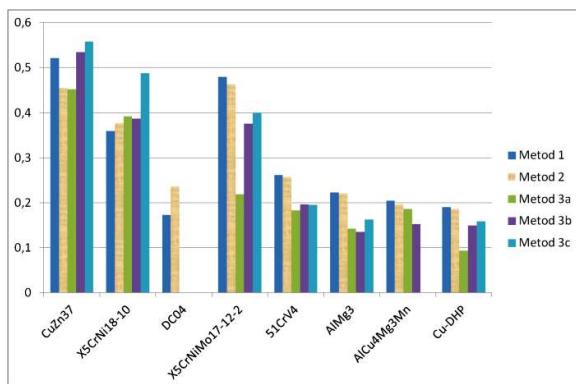
Vrednosti "n" faktora za lim od aluminijumske legure AlCu4Mg1Mn su: po prvoj metodi 0,204; po drugoj metodi 0,196 dok su po trećoj metodi rađene 2 faze kojima respektivno odgovaraju sledeće vrednosti: 0,136 i 0,152.

Tabela 4. Pregled ukupnih rezultata

1) Čelik DC04 (Č0148) - "n" faktor - Zbirni rezultati			
Prva metoda	0.173		
Druga metoda	0.236		
Treća metoda	/	/	/
2) Čelik X5CrNi18-10 (Č4850) - "n" faktor - Zbirni rezultati			
Prva metoda	0.359		
Druga metoda	0.377		
Treća metoda	0.392	0.387	0.488
3) Čelik X5CrNiMo1712-2 (Č4574) - "n" faktor - Zbirni rezultati			
Prva metoda	0.480		
Druga metoda	0.463		
Treća metoda	0.219	0.376	0.400
4) Čelik 51CrV4 (Č4830) - "n" faktor - Zbirni rezultati			
Prva metoda	0.261		
Druga metoda	0.257		
Treća metoda	0.183	0.196	0.195
5) Legura AlMg3 - "n" faktor - Zbirni rezultati			
Prva metoda	0.223		
Druga metoda	0.221		
Treća metoda	0.142	0.135	0.163
6) Legura AlCu4Mg1Mn (2024 T3 AIR) - "n" faktor - Zbirni rezultati			
Prva metoda	0.204		
Druga metoda	0.196		
Treća metoda	0.136	0.152	/
7) Bakar Cu-DHP (DVP 1 Cu. 38) - "n" faktor - Zbirni rezultati			
Prva metoda	0.190		
Druga metoda	0.186		
Treća metoda	0.093	0.149	0.159
8) Legura CuZn37 - "n" faktor - Zbirni rezultati			
Prva metoda	0.521		
Druga metoda	0.455		
Treća metoda	0.452	0.535	0.558



Slika 14. Pregled rezultata za prvu i drugu metodu



Slika 15. Pregled rezultata za sve metode

U tabeli 4 i na slikama 14 i 15 dat je pregled svih eksperimentalnih rezultata i oni se mogu upoređivati i tumačiti u dva pravca. Prvi se odnosi na procenu validnosti samih metoda određivanja "n" faktora, a drugi na procenu intenziteta ojačanja ispitivanih materijala.

Kako je pomenuto, metode 1 i 2 se razlikuju samo u tehničkom smislu i slaganje rezultata je veoma dobro, osim za lim od čelika DC04 gde je, najverovatnije, došlo do zamene uzoraka.

Primetne razlike u vrednostima za metodu 3 uzrokovane su ostvarenim stepenima deformacije u pojedinim fazama. Ako je taj stepen bio niži od mogućeg dobijala se i niža vrednost. Kod materijala velike plastičnosti razlike su minimalne. Definisanje maksimalnog stepena deformacije za pojedine faze je nedostatak ove metode. Bilo bi potrebno izvesti probna ispitivanja samo sa tim ciljem što često nije moguće. Iako je u metodi 3 sadržana sjajna ideja stepenaste epruvete uz pojednostavljanje testa, ipak je prva metoda (sa svojim varijetetom ovde nazvanim drugom

metodom) pokazala izuzetnu pouzdanost i tačnost.

Ako se razmatra osobina deformacionog ojačanja ispitivanih materijala pogodno ih je podeliti na grupe. Odmah treba izdvojiti niskougljenični čelični lim DC04 poznat po povoljnoj deformabilnosti i vrednosti "n" faktora (oko 0,25) što pokazuje dobar efekat deformacionog ojačavanja.

U istu grupu je moguće svrstati austenitne nerđajuće čelične limove (X5CrNi18-10 i X5CrNiMo17-12-2) koji imaju solidnu deformabilnost uprkos relativno velikoj početnoj čvrstoći, uz izražen efekat ojačavanja sa vrednostima "n" faktora do oko 0,45. Međutim, zbog viših vrednosti čvrstoće ovi materijali zahtevaju deformacione sile i dvostruko veće u odnosu na lim DC04.

Uzorci lima 51CrV4 su najverovatnije u žarenom ili normalizovanom stanju što pokazuju relativno niske vrednosti zatezne čvrstoće. Vrednost "n" faktora je povoljna iako ovaj materijal nije namenjen za zahtevnije procese plastičnog oblikovanja.

Preostale su legure obojenih metala i čist bakar. Treba napomenuti da se ovi materijali koriste u veoma velikom broju stanja koja su posledica prethodnog deformisanja ili termičkog tretmana, i da ova stanja suštinski određuju mehaničke karakteristike, deformabilnost i druge osobine. Stanje konkretnog lima CuZn37 je vrlo plastično. Izduženje pri kidanju je preko 60%, a "n" faktor ima vrednost oko 0,5 što označava intenzivno ojačanje. Aluminijumske legure AlMg3 i AlCu4Mg1Mn imaju niže vrednosti "n" faktora (oko 0,2) što je sa gledišta ojačavanja relativno prihvatljivo, ali je poznata relativno nepovoljna plastičnost, odnosno deformabilnost ovih materijala.

4. ZAKLJUČAK

Obimnim eksperimentom testirane su 3 metode određivanja eksponenta deformacionog ojačavanja ("n" faktora) u hladnom stanju. Može se zaključiti da su metode 1 i 2 vrlo pouzdane i da omogućavaju

tačne rezultate koji se mogu smatrati referentnim. Metoda 3 je osjetljivija i zahteva vrlo tačnu izradu epruvete složenije geometrije uz potrebu prethodnih probnih ispitivanja. Konačno, može se zaključiti da su sve tri metode upotrebljive, pri čemu treba dati prednost metodi 1.

Da bi se testirale pomenute 3 metode iskorišćeno je 8 materijala: 4 čelična lima i 4 lima od obojenih metala. Karakteristike ovih materijala su potvrđene, ali se može zaključiti da treba obratiti posebnu pažnju na stanje materijala pored hemijskog sastava, pre svega kod obojenih metala i legura.

ZAHVALNOST

Eksperimentalna istraživanja prezentirana u ovom radu delimično su finansirana sredstvima Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološkog razvoja Republike Srbije preko projekta TR 34002, na čemu su autori veoma zahvalni.

LITERATURA

- [1] B. Devedžić: *Obradivost materijala dubokim izvlačenjem*, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1972.
- [2] B. Devedžić: *Plastičnost i obrada metala deformisanjem*, Naučna knjiga, Beograd, 1992.
- [3] S. Aleksandrović: Problem neujednačenosti rezultata eksperimentalnog određivanja eksponenta deformacionog ojačavanja karoserijskih limova, 24. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, 1992, Novi Sad, Zbornik str. 1-113 do 1-120.
- [4] S. Aleksandrović: Određivanje krivih ojačanja, mehaničkih karakteristika i "n-faktora" primenom kompjuterskog sistema za akviziciju 25. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, 1994, Beograd, Zbornik str. 291 - 296.
- [5] S. Aleksandrović: *Sila držanja i upravljanje procesom dubokog izvlačenja*, Mašinski fakultet u Kragujevcu, monografija, 2005.
- [6] S. Aleksandrović: Deformabilnost, ciklus predavanja za FIAT automobili Srbija (sada Fiat-Chrysler Automobiles Serbia), 7. predavanje, sept. 2014.
- [7] T. Xu, Y. Feng, Z. Jin, S. Song, D. Wang: Determination of the maximum strain-hardening exponent, Materials Science and Engineering A, No.550, pp. 80-86, 2012.
- [8] R. A. Antunes, M. C. Lopes de Oliveira: Materials selection for hot stamped automotive body parts: An application of the Ashby approach based on the strain hardening exponent and stacking fault energy of materials, Materials and Design, No. 63, pp. 247–256, 2014.
- [9] Y. Yun, Q. Cai, B. Xie, S. Li: Effect of tempering temperature on strain hardening exponent and flow stress curve of 1000 MPa grade steel for construction machinery, Journal of Iron and Steel Research, International, No. 24, pp. 950-956, 2017.
- [10] R. Bačanin: *Eksponent deformacionog ojačavanja kao parametar deformabilnosti savremenih limova*, Master rad, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, 2020.g.

STRAIN HARDENING EXPONENT DETERMINATION FOR DIFFERENT SHEET METALS

Abstract: In this paper presented were results of experimental investigations from the field of formability, especially sheet metals and alloys formability at room temperature.

One of main goals in this work was reaffirmation of strain hardening exponent ("n"-factor) like very important formability parameter.

Extended experiment was planed with three methods of "n"- factor determination and application of this methods on eight different ferrous and nonferrous metals and alloys. Methods were based on using of modern computerized equipment. Chosen were following sheet metals: brass CuZn37 (thickness 0.8 mm), stainless austenitic steel X5CrNi18-10 (1.5 mm), low carbon steel DC04 (0.8 mm), stainless austenitic steel X5CrNiMo17-12-2 (2.0 mm), spring steel 51CrV4 (0.6 mm), alloy AlMg3 (1.5 mm), alloy AlCu4Mg1Mn (1.0 mm) and pure copper Cu-DHP (0.8 mm).

Evaluated was experimental methods for "n"-factor determination as well as obtained values for investigated materials. Can be conclude that applied methods were very accurate and successful, and obtained "n"-factor values for tested materials were very useful for understanding hardening phenomena.

Keywords: formability, sheet metals, strain hardening exponent.