

**X Naučno/stručni simpozij sa međunarodnim učešćem
„METALNI I NEMETALNI MATERIJALI" Bugojno, BiH, 24-25. april 2014.**

**OČVRŠĆAVANJE MATERIJALA PRI OBLIKOVANJU CJEVASTIH
IZRADAKA IZ AL 99,5 % KOD ISTOSMJERNOG HLADNOG
ROTACIONOG ISTISKIVANJA**

**MATERIAL STRENGTHENING IN FORMING FINAL TUBULAR
PRODUCT FROM AL 99.5% BY FORWARD COLD FLOW FORMING**

**Sabahudin Ekinović, Ibrahim Plančić, Edin Begović
Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet
Zenica, BiH**

**Himzo Đukić
Sveučilište u Mostaru, Fakultet strojarstva i računarstva, Mostar, BiH**

**Branka Muminović
Metalurški institut "Kemal Kapetanović"
Zenica, BiH**

Kategorizacija rada: Stručni rad

SAŽETAK

Obrada deformisanjem u hladnom stanju se odlikuje brojnim prednostima koje su uglavnom rezultat očvršćavanja (ojačavanja) materijala tokom formiranja finalnog izratka. Efekti očvršćavanja materijala se ogledaju, prije svega, u poboljšanju mehaničkih karakteristika izradaka. Postupak istosmjernog hladnog rotacionog istiskivanja valjanjem (IHRIV) je jedan od specifičnih postupaka obrade deformisanjem kojim se oblikuju različiti rotaciono simetrični dijelovi u vojnoj, vazduhoplovnoj, nuklearnoj i drugim industrijskim granama prilikom kojeg se koriste pozitivni efekti očvršćavanja oblikovanih dijelova. U radu se na primjeru izrade cjevastih izradaka iz Al 99,5 % tehnologijom IHRI/V analizira dostignuti stepen očvršćavanja materijala kroz promjenu vrijednosti R_m , $R_{p0,2}$, A i Z prije i poslije oblikovanja.

Ključne riječi: očvršćavanje materijala, hladno rotaciono istiskivanje, Al 99,5

ABSTRACT

Final product of the cold forming process gain many advantages that are mostly produced by strengthening of the material in the process. Those advantages are primarily explained as improving mechanical characteristic of the work material. Forward cold flow forming is among those processes and it is mostly related to (forming) shaping of rotational and axisimetrical parts in military, airspace, nuclear and similar industrial applications that required strengthening effect. In this paper is shown an example of forward cold flow forming application process in production of 99,5% Al workpieces with focus on analysis of a strengthening effect of the processed material by the change in its mechanical parameters like R_m , $R_{p0,2}$, A and Z .

Keywords: material hardening, cold flow forming, Al 99,5

1. UVOD

Izrada dijelova zadovoljavajuće preciznosti u pogledu oblika i dimenzija, sa što manjom težinom i što boljim mehaničkim karakteristikama uz povoljne ekonomske efekte njihove izrade neprestano se postavlja kao zahtjev savremenih proizvodnih tehnologija. U širokoj lepezi tehnoloških postupaka izrade dijelova rotaciono simetričnog oblika kojima se ovo postiže značajno mjesto zauzimaju postupci obrade deformisanjem u hladnom stanju koji se nazivaju rotacionim oblikovanjem. Istosmjerno hladno rotaciono istiskivanje kao jedan specifičan postupak rotacionog oblikovanja omogućava pored dobijanja dijelova različitih dimenzija i redukciju debljine stijenke. Usljed redukcije debljine u hladnom stanju dolazi do efekta ojačavanja materijala koji je praćen poboljšanjem mehaničkih karakteristika i kvaliteta finalnih izradaka.

Stoga se njegovom primjenom stvaraju preduslovi za primjenu ekonomičnijih materijala i dijelova sa tanjim stijenka. To je jako značajno za složene uslove eksploatacije dijelova gasnih turbina, artiljerijske municije, kućišta raketnih motora, hidrauličnih cilindara, posuda za skladištenje plina pod pritiskom i drugih dijelova u raznim industrijskim granama. S ciljem sagledavanja efekata hladnog ojačavanja materijala tokom postupka hladnog rotacionog istiskivanja provedena su eksperimentalna istraživanja na pripremcima iz tehnički čistog aluminijuma čistoće Al 99,5. Prihvatljivija cijena aluminijuma na svjetskom tržištu posljednjih nekoliko godina i trendovi koji prate savremenu idustrijsku proizvodnju u pogledu primjenjenih materijala opravdava analizu ponašanja Al 99,5 za dobijanje cjevastih izradaka postupkom istosmjernog istiskivanja. Aluminijum je atraktivan materijal koji zadovoljava većinu postavljenih zahtjeva, a posebno kada je u pitanju mogućnost recikliranja i zahtijev za smanjenjem mase različitih dijelova i komponenata zbog povećanja energetske efikasnosti u različitim industrijskim granama. Kao što je naglašeno postupkom hladnog rotacionog istiskivanja se postižu efekti ojačavanja materijala izradaka tako da se izradci iz Al 99,5 pored specifične kombinacije osobina (gustine, mehaničkih osobina, korozione otpornosti, sposobnosti oblikovanja, cijene i dr.) odlikuju i zadovoljavajućim čvrstoćnim osobinama, te se oblast njegove primjene pored najodgovornijih dijelova može širiti i na proizvode opšte upotrebe. To su dovoljni razlozi za sagledavanje efekata ojačavanja materijalapr oblikovanju izradaka iz tehnički čistog Al 99,5 tehnologijom IHRIV.

2. TEHNOLOGIJA ISTOSMJERNOG HLADNOG ROTACIONOG ISTISKIVANJA

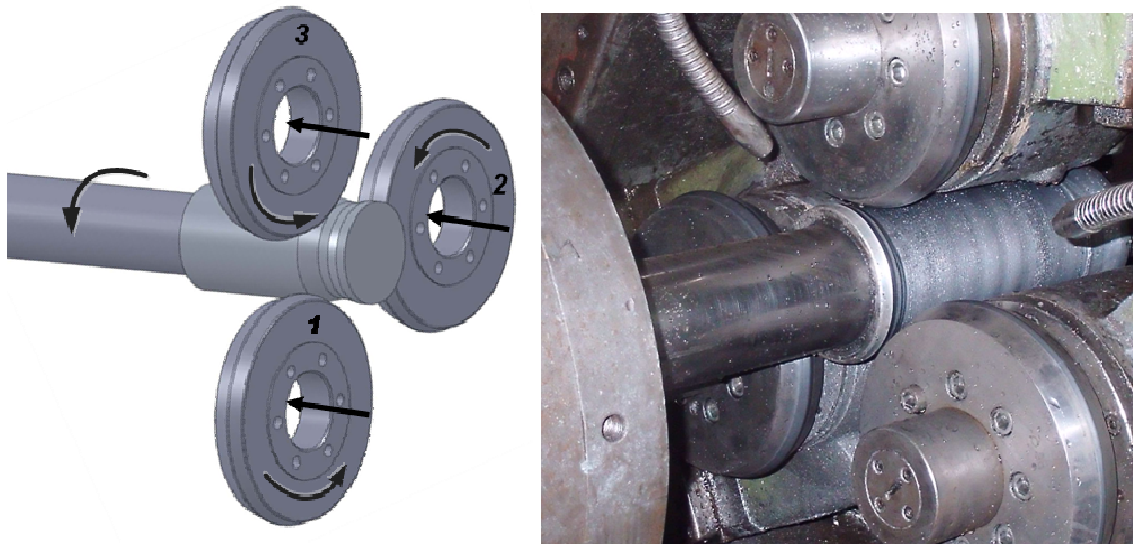
Rotaciono oblikovanje je proces oblikovanja metala obradom deformisanjem pri kome se ravna ploča ili cilindrični pripremak postavljen između trna i alata (jedna ili više rolnica) oblikuje u šuplji cilindar, konus, poluloptu ili drugi osnosimetrični dio sa pravolinijskom ili krivolinijskom izvodnicom.

Suština ovog postupka je da se pod dejstvom pritiska rolnica (dvije ili tri) materijal prevede u područje plastičnog tečenja i istiskuje u aksijalnom pravcu uz smanjenje prečnika i povećanje dužine izratka. Početni oblik - cjevasti pripremaci (toplo valjane cijevi, otkovci, puni profili i sl.) pritiskivačem se čeonu pritisnu uz trn da bi se obrtaji sa trna prenijeli na pripremak. Cjevasti pripremak se dodatno preko unutrašnjeg prečnika koji je jednak prečniku trna navuče na trn na kome se obavlja deformisanje. Pripremak se prethodno izrađuje kovanjem ili dubokim izvlačenjem zavisno od debljine i oblika. Rolnice obično nemaju sopstveni pogon, već se obrtanje ostvaruje uslijed kontaktnog trenja prisutnog između njih i materijala, nastalog tek pri dodiru rolnice sa pripremkom. Pod dejstvom sile pritiska suporta mašine rolnice prodiru u metal uz obrtno kretanje trna i rolnica, te uz aksijalni posmak ostvaruju plastično tečenje metala koje rezultuje njegovim istiskivanjem u aksijalnom smjeru zadržavajući kontinuitet strukture. Istiskivanjem metala u aksijalnom smjeru nastaje stanjenje stijenke i povećanja dužine izratka. Mala površina kontakta između alata (rolnica) i radnog komada, zahtijeva i malu silu oblikovanja, pa se zbog toga i mogu ostvariti veliki stepeni redukcije na

mašinama male snage. Pod uticajem tako visokih pritisaka zrno materijala se drobi i razvlači u pravcu toka materijala, te se intenzivno mijenja struktura i mehaničke osobine materijala u odnosu na početne veličine. Obilnim hlađenjem (i do 300 l/min) zone zahvata materijala, najčešće uljnom emulzijom koja se pod pritiskom, putem odgovarajućih mlaznica raspršava u zoni deformisanja, sprečava se intenzivnije zagrijavanje i razočvršćavajući procesi u materijalu, te se zadržavaju pozitivni efekti hladnog deformisanja izraženi preko porasta čvrstoćnih karakteristika finalnih izradaka. Uljna emulzija treba da obezbijedi i efekte podmazivanja i što bolje prijanjanje napovršinu komada kako bi njene kapljice ostale što duže na radnom komadu. Po završetku obrade, skidanje izradka se vrši odgovarajućim skidačima ili izbacivačima što zavisi od pogodnosti komada za skidanje sa trna. Postoji nekoliko metoda HRIV cjevastih dijelova, a dvije osnovne vrste tehnološkog postupka HRIV su:

- istosmjerno ili direktno (IHRIV) i
- suprotnosmjerno, odnosno indirektno (SHRIV).

Varijante se uglavnom razlikuju prema načinu tečenja materijala u odnosu na pravac kretanja rollica, dok je deformisanje metala u obje varijante lokalizovano na usku dodirnu zonu kontakta alata-rolnice i materijala obradka.

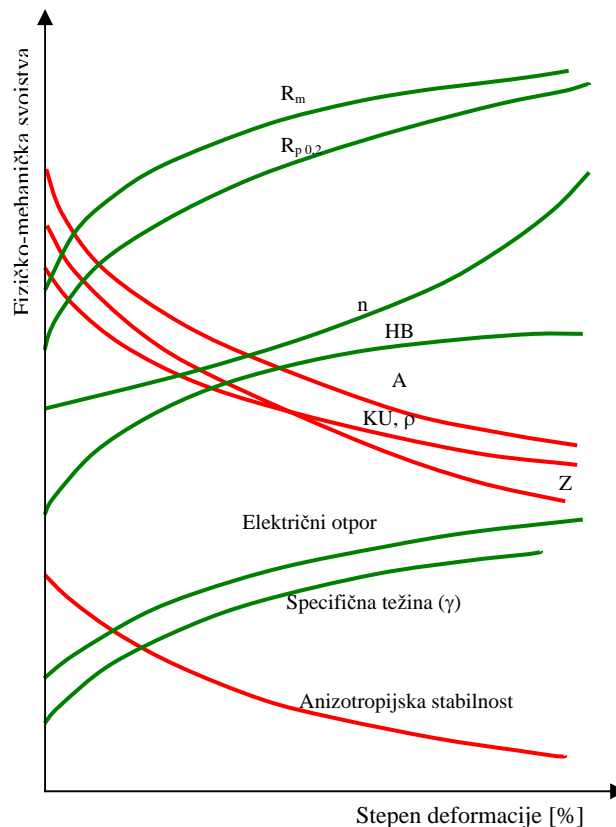


Slika 1. 3D model i stvarni izgled zahvata alata sa obratkom pri IHRIV

Pri istosmjernom (direktnom) HRIV tečenje nedeformisanog materijala priprema/predoblika i kretanje rollica (alata) je u istom smjeru. Pripremak se postavlja na početak trna i pritiskivačem preko cilindričnog dna priljubljuje uz trn usljed čega se stvara dovoljna velika sila trenja koja onemogućava njegovo okretanje oko trna tokom oblikovanja. To istovremeno obezbjeđuje i njegovo obrtanje zajedno sa trnom koji dobija kretanje od glavnog vretena mašine. Oblikovanje se vrši alatom u vidu rollica koje su smještene u zajedničkom kućištu, a kućište (time i rollice) dobija pravolinijsko kretanje uzduž ose obratka od hidrauličnog pogona mašine. Pri dodiru rollica sa pripremkom usljed kontaktnog trenja nastaje njihovo obrtanje. Prodiranjem rollica u metal nastaje istiskivanje materijala ispod rollica u uskoj dodirnoj zoni deformisanja, a kako se tečenje materijala odvija u smjeru aksijalnog posmaka rollica to se i ovaj postupak naziva istosmjerno HRIV. Skidanje izratka se obavlja primjenom izbijača smještenog u unutrašnjosti trna ili svlačenjem izratka sa trna primjenom neke vanjske sile (ručno ili mašinski). Izrađeni dijelovi su sa jednom zatvorenom, ili djelimično zatvorenom stranom cilindra.

2.1. Ojačavanje materijala

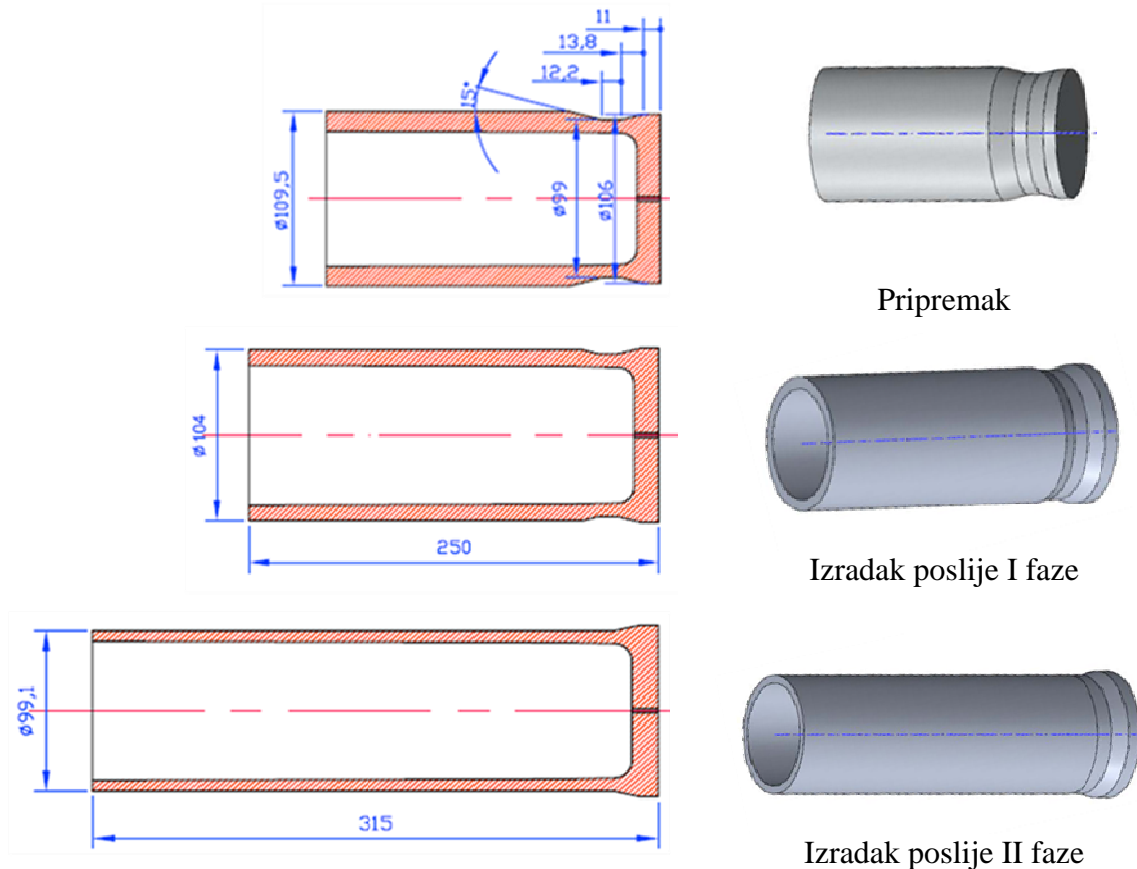
Najvažnija promjena koja se dešava kao posljedica hladne plastične deformacije je pojava ojačavanja/očvršćavanja materijala. Pojava je praćena značajnim promjenama fizičko mehaničkih svojstava metala, a uzrokovana je gomilanjem dislokacija i njihovim otežanim kretanjem. Te promjene se odnose na povećanje pokazatelja mehaničkih osobina među kojima su najznačajnije: zatezna čvrstoća (R_m), granica razvlačenja (R_v), odnosno ($R_{p0,2}$) i tvrdoća (HB), ali i do povećanja kvaliteta površine i dimenzijske tačnosti izradaka i to pri nižim proizvodnim troškovima u odnosu na deformisanje u vrućem stanju. Istovremeno dolazi do smanjenja vrijednosti pokazatelja plastičnosti: relativnog izduženja (A), kontrakcije presjeka (Z) i udarne žilavosti KU, kako je prikazano na slici 2. Smanjenje otpornosti na koroziju, toplotne vodljivosti i elektroprovodljivosti, odnosno porast električnog otpora se povezuje sa povećanjem gustoće izobličenih rešetki (distorzija rešetke sprečava kretanje elektrona), a mijenjaju se i magnetna svojstva feromagnetnih legura dok se broj savijanja (n) kao mehanička karakteristika u zavisnosti od vrste materijala može da povećavati ili smanjivati,. Navedene pojave ukazuju da pri hladnoj plastičnoj deformaciji ne dolazi samo do promjena mehaničkih nego i fizičkih i hemijskih svojstava materijala koji se deformiše. Efekti ojačavanja pored temperature na kojoj se proces odvija zavise od veličine deformisanja, odnosno od stepena i brzine deformacije kao i fizičko hemijskih svojstava materijala.



Slika 2. Promjene fizičko-mehaničkih svojstava u zavisnosti od stepena deformacije pri plastičnom deformisanju u hladnom stanju[6]

3. EKSPERIMENTALNI RAD

S ciljem utvrđivanja ponašanja tehnički čistog aluminjuma i efekata njegovog ojačavanja tokom hladne obrade deformisanjem izvršeno je oblikovanje Al 99,5 komore u dvije faze IHRI. Na sljedećoj slici su predstavljene dimenzije priprema i izradaka po fazama IHRI.



Slika 3. Izgled i dimenzije pripremk i izradaka po fazama IHRIV

U tabeli 1. su predstavljene mehaničke karakteristike pripremk koji se koriste za IHRIV. Vrijednosti predstavljaju prosječne veličine parametara dobijenih ispitivanjem epruveta iz deset slučajno odabranih pripremk.

Tabela 1. Mehaničke karakteristike pripremk za IHRIV

Materijal	Prosječne vrijednosti parametara (Metalurški institut „KK“-Zenica)				
	m_{pr} [gr]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m N/mm ²	A [%]	Z [%]
Al 99,5 %	2268	80	98	28,0	86

Ranije utvrđene optimalne vrijednosti geometrijskih karakteristika alata i tehnoloških parametara procesa za provođenje eksperimentalnih istraživanja koji nisu mjenjani tokom provođenja eksperimentalnih istraživanja su:

- Oblikovanje se vrši u dvije faze IHRIV bez međufaznog žarenja sa rolnicama prečnika $D_1=D_2=D_3=250$ mm, radiusom $R_1=R_2=4$ mm, $R_3=2$ mm, napadnim uglom $\alpha=20^\circ$ i aksijalnim podešenjem rolnica u tri ravnine na udaljenosti $a_1=7$ mm, $a_2=4$ mm i $a_3=3$ mm,
- Pritisak na rolnice: $p_1=p_2=p_3=6$ [N/mm²],
- Intenzivno hlađenje tokom rada emulzijom 1:10 (voda/ulje),
- Podmazivanje trna (unutrašnjost izratka) mješavinom masti i grafitnog praha u omjeru: 1 kg masti na 100 g grafita.

Prilikom provođenja eksperimenta, a u svrhu istraživanja uticaja tehnoloških parametara na pojavu ojačavanja materijala tokom hladne plastične deformacije mjenjani su sljedeći tehnološki parametri: broj obrtaja trna n [°/min], minutni posmak rolnica s_v [mm/min] i ukupna dubina prodiranja rolnica: $\Delta s = \Delta s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3$ [mm].

3.1. Plan eksperimenta

Za provođenje eksperimentalnih ispitivanja primjenjen je potpuni faktorni plan eksperimenta sa tri nezavisno promjenjiva faktora ($k=3$) i ponavljanjem eksperimenta u centralnoj tački plana (nulta tačka plana). Ukupni broj eksperimenata je:

$$N=2^k+n_0=2^3+4=12 \dots\dots\dots(1)$$

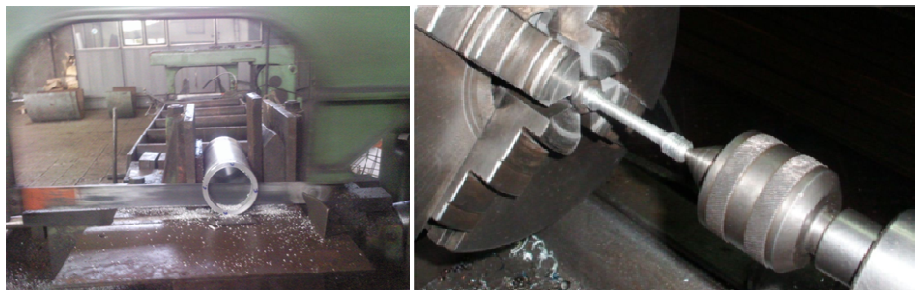
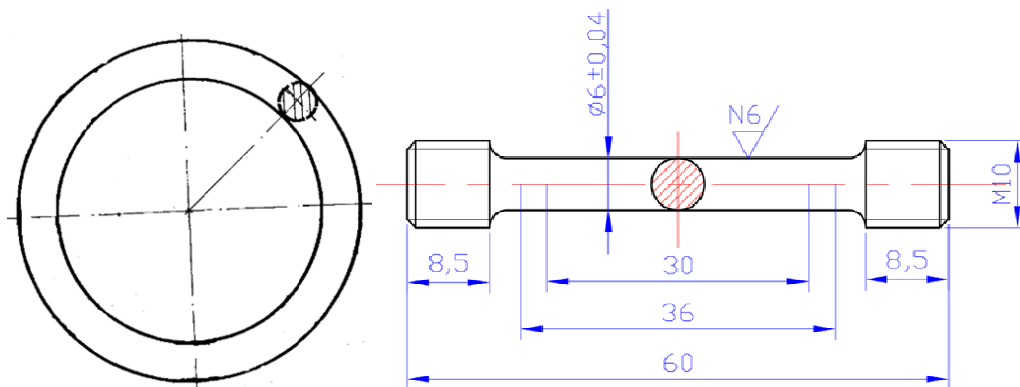
gdje je:

- N - ukupan broj eksperimenata;
- $n_0=4$ - broj ponovljenih eksperimenata u centralnoj tački plana,
- $k=3$ - broj nezavisno promjenjivih faktora

Plan matrica i nivoi varijacije faktora u prvoj i drugoj fazi predstavljeni su u tabelarnom prikazu rezultata istraživanja.

Na osnovu plana eksperimenta izrađeno je 12 uzoraka obradom hladnim plastičnim deformisanjem postupkom IHRIV.

Iz dobijenih uzoraka nakon svake faze IHRIV izrađene su standardne epruvete za ispitivanje na zatezanje. Na slici 4. je prikazano mjesto odakle su izvađene, dimenzije, izgled i način izrade standardnih epruveta za ovo ispitivanje nakon prve faze IHRIV.



Slika 4. Mjesto sa koga su izrađene (gore, lijevo) i dimenzije epruvete (gore, desno,) iz cilindričnog izratka, te način odsjecanja i izrade (dolje, lijevo) standardne epruvete za ispitivanje mehaničkih karakteristika izradaka (dolje, desno)

Izgled svih pripremljenih epruveta sa pripadajućim oznakama shodno planu eksperimenta nakon prve faze IHRIV je prikazan na slici 5.

Na isti način su izrađene standardne epruvete poslije druge faze IHRIV.



Slika 5. Pripremljene epruvete iz Al 99,5 nakon prve faze IHRIV za ispitivanje zatezanjem

Ostvareni ukupni stepen deformacije tokom oblikovanja je u rasponu 50,7 do 57,6 %, dok su parcijalni stepeni deformacije po pojedinim fazama u rasponu $\varphi_I=15,3$ do 35,4 % i $\varphi_{II}=16,3$ do 37 %.

Ukupna procentualno izvučena dužina u oba prolaza zavisi od rednog broja uzorka se kreće od 35,5 % do 50,3 % (od $L_{ukuizv}=74$ mm do 104 mm), a ukupni logaritamski stepen deformacije po dužini se kreće od $\varphi_{Imin}=0,27$ do $\varphi_{Imax}=0,59$.

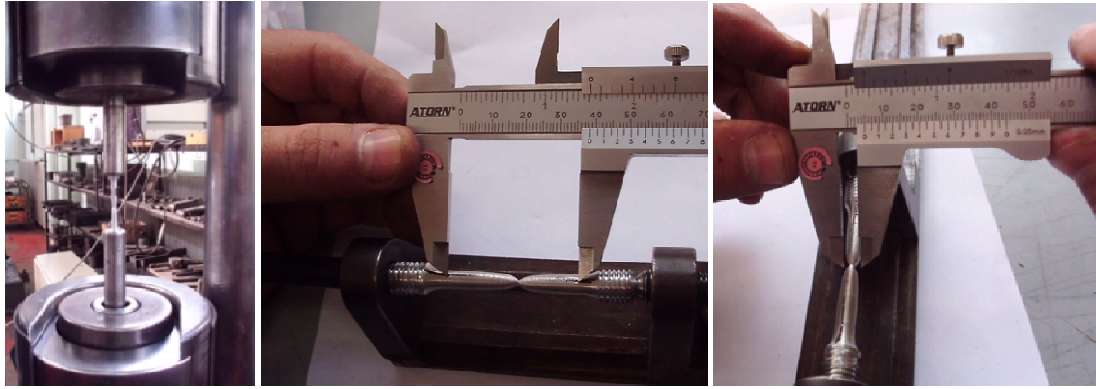
3.2. Ispitivanje na zatezanje

Za ispitivanje zatezanjem korištena je univerzalna hidraulična mašina za statička ispitivanja br. 599/625, kidalica tipa 20 SZBDA, 200 kN (Alfred J. Amsler) na Metalurškom institutu "Kemal Kapetanović" u Zenici. Ispitivanje je vršeno prema BAS EN ISO 6892-1:2011, ISO 1101:2004 na temperaturi okoline +22 °C. Izgled epruveta nakon ispitivanja poslije prve faze IHRIV i način mjerenja karakterističnih dimenzija za određivanje A i Z prikazan je na sljedećim slikama.



Slika 6. Ispitne epruvete nakon ispitivanja na zatezanje poslije prve faze IHRIV

Po istoj metodologiji su provedena ispitivanja i na epruvetama koje su izrađene nakon druge faze IHRIV.



Slika 7. Položaj epruvete pri ispitivanju, kontrola mjerne dužine (lijevo) i vrata epruvete (desno)

3.3. Rezultati ispitivanja

Rezultati provedenih ispitivanja sa nivoom variranja uticajnih parametara i ostvarenim stepenima deformacije po svim tačkama eksperimentalnog plana nakon prve i druge faze predstavljene su u tabelama 2 i 3. Njihovom analizom se mogu identificirati efekti ojačavanja Al 99,5i izvesti sljedeći zaključci:

- Prije rotacionog istiskivanja vrijednosti mehaničkih karakteristika uzoraka za ispitivanje (priprema) su iznosile: $R_{p0,2} = 80 \text{ N/mm}^2$, a $R_m = 98 \text{ N/mm}^2$. Nakon prvog valjanja vrijednosti $R_{p0,2}$ se kreću u intervalu od 87 do 104 N/mm^2 , dok je R_m u intervalu od 100 do 113 N/mm^2 . Proizilazi da su, nakon prve operacije IHRIV, vrijednosti granice tečenja ($R_{p0,2}$) i zatezne čvrstoće (R_m) porasle na svim uzorcima.
- Porast $R_{p0,2}$ je izraženiji i kreće se od 9 % (što odgovara vrijednosti od 7 N/mm^2) do 30 % (što odgovara vrijednosti od 24 N/mm^2), dok je porast R_m od 2 % (2 N/mm^2) do 15 % (15 N/mm^2).
- Nakon druge faze IHRIV vrijednosti $R_{p0,2}$ se kreću u intervalu od 92 (uzorak 3) do 106 N/mm^2 (uzorak 2), dok je R_m u intervalu od 100 (uzorak 3) do 117 N/mm^2 (uzorak 6).
- Nakon druge faze oblikovanja na većini uzoraka došlo je do blagog porasta $R_{p0,2}$ (od 1 do 11 N/mm^2) i R_m (od 0 do 7 N/mm^2), a na nekima (uzorci 7, 10 i 11) su njihove vrijednosti iste ili su neznatno manje (od 0 do -3 N/mm^2).

Na bazi provedenih razmatranja generalno se može zaključiti da se značajniji porast $R_{p0,2}$ i R_m tokom hladnog rotacionog istiskivanja Al 99,5 postiže u prvom, a da se drugim prolazom bez prethodnog žarenja samo neznatno povećavaju posmatrane mehaničke karakteristike izradaka. Analiza pokazuje da je porast ovih vrijednosti znatno veći nakon prvog u odnosu na drugi prolaz IHRIV. Ovo je u skladu sa opštom teorijom plastične deformacije u pogledu razjašnjavanja efekta očvršćavanja prema kojoj je najveći intenzitet deformacionog očvršćavanja metala i smanjenja plastičnosti u početku deformacije (do oko 25 %). To je posljedica povećanja broja dislokacija u kristalnoj građi metala. Djelovanjem vanjske sile, a zbog različite orijentacije ravnina klizanja u zrnima polikristala dolazi do neravnomjerne deformacije polikristala koja se povećava sa povišenjem stepena deformacije u procesu hladne deformacije, a što rezultira povećanjem otpora deformaciji i sniženjem plastičnosti. Na bazi dobijenih rezultata, a komparirajući mehaničke karakteristike materijala nakon druge faze u odnosu na karakteristike materijala priprema generalno se može zaključiti da je tokom IHRIV došlo do efekta ojačavanja materijala izratka koje se izražava kroz povećanje granice tečenja (max. porast 32,5 %) i zatezne čvrstoće (max. porast 18,4 %), a pada plastičnih svojstava materijala izraženih preko izduženja A (max. smanjenje za 19,6 %) i suženja (max. smanjenje za 5,8 %).

Tabela2. Mehaničke karakteristike nakon prve i druge faze IHRIV za sve uzorke u zavisnosti od stepena deformacije

R. broj uzorka	n	s _v	Dubina zauzimanja		Logaritamska defor.		Φ _{ukupno}	Nakon prve faza				Nakon druge faze			
			Δs ₁	Δs ₂	φ ₁	φ ₂		R _{p0,2} , R _m [N/mm ²]	A [%]	Z [%]	R _{p0,2} , R _m [N/mm ²]	A [%]	Z [%]		
Pripremak	-	-	-	-	-	-	-	80	98	28,0	86	-	-	-	-
1	140	60	2	3,5	18,1	35,4	53,5	93	106	26,5	79	104	110	24,5	81
2	240	60	2	3,5	17,6	35,7	53,4	96	106	26,0	88	106	113	22	90
3	140	100	2	3,5	15,3	37,0	52,3	87	100	27,5	88	92	100	24,5	85
4	240	100	2	3,5	21,0	36,6	57,6	90	103	25,0	87	100	110	25	86
5	140	60	3,5	2	35,4	16,3	51,7	102	112	20,5	85	103	114	24,5	85
6	240	60	3,5	2	35,2	16,4	51,6	104	113	19,0	87	104	116	26	88
7	140	100	3,5	2	32,9	17,8	50,7	96	108	25,5	86	99	105	28,5	88
8	240	100	3,5	2	33,6	18,4	52,0	100	110	20,0	89	101	112	22,5	86
10	190	80	2,75	2,75	22,9	32,4	55,2	99	110	24,0	87	98	109	24,5	85
11	190	80	2,75	2,75	23,5	29,7	53,2	98	110	23,0	87	97	112	24,5	87
12	190	80	2,75	2,75	25,1	27,1	52,2	95	107	24,5	85	98	113	23	88

Tabela3. Procentualna promjena mehaničkih karakteristika Al 99,5 nakon prve i druge faze IHRIV za sve uzorke u zavisnosti od stepena deformacije

R. broj uzorka	n	s _v	Dubina		Log. defor.		Φ _{ukupno}	Procentat promjene nakon I faza				Procentat promjene nakon II faze				Ukupna procentualna promjena			
			Δs ₁	Δs ₂	φ ₁	φ ₂		R _{p0,2}	R _m	A	Z	R _{p0,2}	R _m	A	Z	R _{p0,2}	R _m	A	Z
1	140	60	2	3,5	18,1	35,4	53,5	16	8	-5	-8	11,8	3,8	-7,5	2,5	30,0	12,2	-12,5	-5,8
2	240	60	2	3,5	17,6	35,7	53,4	20	8	-7	2	10,4	6,6	-15,4	2,3	32,5	15,3	-21,4	4,7
3	140	100	2	3,5	15,3	37,0	52,3	9	2	-2	2	5,7	0,0	-10,9	-3,4	15,0	2,0	-12,5	-1,2
4	240	100	2	3,5	21,0	36,6	57,6	13	5	-11	1	11,1	6,8	0,0	-1,1	25,0	12,2	-10,7	0,0
5	140	60	3,5	2	35,4	16,3	51,7	28	14	-27	-1	1,0	1,8	19,5	0,0	28,8	16,3	-12,5	-1,2
6	240	60	3,5	2	35,2	16,4	51,6	30	15	-32	1	0,0	2,7	36,8	1,1	30,0	18,4	-7,1	2,3
7	140	100	3,5	2	32,9	17,8	50,7	20	10	-9	0	3,1	-2,8	11,8	2,3	23,8	7,1	1,8	2,3
8	240	100	3,5	2	33,6	18,4	52,0	25	12	-29	3	1,0	1,8	12,5	-3,4	26,3	14,3	-19,6	0,0
10	190	80	2,75	2,75	22,9	32,4	55,2	24	12	-14	1	-1,0	-0,9	2,1	-2,3	22,5	11,2	-12,5	-1,2
11	190	80	2,75	2,75	23,5	29,7	53,2	23	12	-18	1	-1,0	1,8	6,5	0,0	21,3	14,3	-12,5	1,2
12	190	80	2,75	2,75	25,1	27,1	52,2	19	9	-13	-1	3,2	5,6	-6,1	3,5	22,5	15,3	-17,9	2,3

4. ZAKLJUČAK

Tehnologijom IHRIV uz adekvatne geometrijske karakteristike alata (prečnik, radijus, napadni ugao, radijalno-aksijalno podešavanje i dr.), tehnološke (nis) i druge procesne parametre (pritisak, sredstvo za hlađenje i podmazivanje i sl.), te ostvarene ukupne stepene deformacije tokom oblikovanja u rasponu 51 do 58 % (parcijalni stepeni deformacije po pojedinim fazama u rasponu $\varphi_I=15$ do 35% i $\varphi_{II}=16$ do 37 %) efikasno se mogu oblikovati osnosimetrični izradci zadovoljavajuće tačnosti oblika, dimenzija, kvaliteta (glatkosti) unutrašnje i vanjske površine izratka i sa poboljšanim čvrstoćnim karakteristikama u odnosu na materijal priprema. Iako su efekti ojačavanja za Al 99,5 koji su identificirani u ovom radu dosta manji u odnosu na oblikovanje različitih vrsta čelika i legura obojenih metala na isti način ipak su, s obzirom na druge pozitivne aspekte primjene aluminijuma oni jako značajni. Nivo ojačavanja Al 99,5 na primjeru oblikovanja cjevastih izradaka u ovom radu se manifestuje kroz povećanje granice tečenja (max. porast 32,5 %) i zatezne čvrstoće (max. porast 18,4 %). Istovremeno su smanjena plastična svojstva materijala izražena preko izduženja A (maksimalno smanjenje za 19,6 %) i suženja Z (maksimalno smanjenje za 5,8 %). Nakon obje faze IHRIV znatno je veći porast $R_{p0,2}$ od R_m . Primjetno je takođe da se prilikom oblikovanja Al 99,5 projektovanom tehnologijom nakon druge faze IHRIV dobija znatno manji prirast čvrstoćnih karakteristika u odnosu na njihove vrijednosti nakon oblikovanja u prvoj fazi. Ovo se može objasniti, s jedne strane, opšte prihvaćenom teorijom plastične deformacije prema kojoj je najveći intenzitet ojačavanja metala i smanjenja plastičnosti pri hladnoj plastičnoj deformaciji u početku deformacije. S druge strane, razlog može biti oporavljanje materijala koje prema [8] kod veoma čistog aluminijuma i većih stepeni prerade započinje već na sobnoj temperaturi. Za potpuno razjašnjavanje navedenog efekta i praktičnu potvrdu ovih zaključaka neophodno bi bilo izvršiti detaljnija istraživanja na većem broju uzoraka, posebno uzimajući u obzir brzinu deformacije i vrijeme trajanja procesa. U tom smislu provedena metodologija i dobijeni rezultati ovog rada mogu da posluže kao dobra osnova za nastavak istraživanja u ovoj oblasti.

5. LITERATURA

- [1] Himzo Đukić, Mirna Nožić, Obrada deformisanjem, Univerzitet "Džemal Bijedić", Mašinski fakultet Mostar, Mostar 2013.
- [2] Sabahudin Ekinović, Ibrahim Plančić, Edin Begović, Himzo Đukić, Identifikacija i analiza uticajnih parametara na kvalitet izradaka u procesu hladnog rotacionog istiskivanja (HRI) primjenom Ishikawa metode, Zbornik radova 7. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem "Kvalitet 2011", str. 603-608, Neum, B&H, 01.-04 juni 2011.
- [3] Milutin Nikačević, Ljubica Radović, Rotaciono valjanje: specifična tehnologija za izradu delova raketa, - kumulativna naučnotehnička informacija-, Vojnotehnički institut - Beograd, Naučno tehničke informacije, ISSN 1820-3418, Volume XLIV Broj 2, 2010.
- [4] C.C. Wong, T.A. Dean, J. Lin, Incremental forming of solid cylindrical components using flow forming principles, Journal of Materials Processing Technology 153-154, 60-66, 2004.
- [5] Berko Zečević, Jasmin Terzić, Struktura pogonske grupe osnosimetrične letjelice, III Međunarodni naučno-stručni skup "Tendencije u razvoju mašinskih konstrukcija i tehnologija" Zenica, 1996.
- [6] Vinko Pavelić, Specifične tehnologije u proizvodnji oružja, Novi Travnik-Zagreb, MORH-TP-4/95 1995.
- [7] Milorad Jovanović i drugi, Mašinski materijali, Kragujevac, 2003.