



## ISTRAŽIVANJE UTICAJNIH FAKTORA NA KRUŽNOST IZRADAKA OD AL 99,5 % OBLIKOVANIH TEHNOLOGIJOM ISTOSMJERNOG HLADNOG ROTACIONOG ISTISKIVANJA

Ibrahim Plančić<sup>1</sup>, Darko Petković<sup>2</sup>, Samir Lemeš<sup>3</sup>, Hazim Bašić<sup>4</sup>

*Rezime: Obrada deformisanjem u hladnom stanju se odlikuje brojnim prednostima koje su uglavnom rezultat ojačavanja materijala tokom formiranja finalnog izratka. Efekti ojačavanja materijala se ogledaju u tačnosti izrade i poboljšanju mehaničkih karakteristika izradaka. Postupak istosmjernog hladnog rotacionog istiskivanja valjanjem (IHRI) je jedan od specifičnih postupaka obrade deformisanjem kojim se oblikuju različiti rotaciono simetrični dijelovi u vojnoj, vazduhoplovnoj, nuklearnoj i drugim industrijskim granama, koji koristi pozitivne efekte očvršćavanja oblikovanih dijelova. Oblikovanje izradaka za izuzetno zahtjevne industrijske grane, pored dimenzione kontrole, zahtijeva i provjeru preciznosti njihovog kružnog oblika. U radu je na primjeru izrade cjevastih izradaka iz Al 99,5% tehnologijom IHRI predstavljen način određivanja kružnosti izradaka primjenom 3D koordinatne mjerne mašine i analiziran uticaj broja obrtaja, posmaka i stepena deformacije na odstupanje kružnosti.*

*Ključne riječi: Al 99,5%, istosmjerno hladno rotaciono istiskivanje, kružnost izradaka*

### **RESEARCH ON IMPACT FACTORS INFLUENCING ROUNDNESS OF PRODUCTS MADE OF AL 99.5% FORMED BY COLD ROTARY EXTRUDING TECHNOLOGY**

*Abstract: Cold forming is characterized by a number of advantages which are mainly result of material strengthening during the final workpiece formation. Effects of material strengthening are reflected in shaping accuracy and in improving mechanical characteristics of workpieces. A method of forward cold rotary extrusion rolling (FCRER) is one of the specific forming methods used to form different parts of rotationally symmetrical parts in military, aeronautical, nuclear and other industries, which uses positive effects of the material strengthening. Design of products for extremely demanding industries, in addition to dimensional control, requires checking the accuracy of their circular shape. This paper, through the example of making tubular workpieces from Al 99.5% using FCRER technology, presents a method for determining the workpiece roundness using a 3D Coordinate Measuring Machine and analyzes the influence of number of revolutions, shift and the deformation rate to the deviation of roundness.*

*Key words: Al 99.5%, Forward Cold Rotary Extrusion, Workpiece Roundness*

<sup>1</sup>Dr.sc. Ibrahim Plančić, Zenica, Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet Zenica, BiH, [iplancic@mf.unze.ba](mailto:iplancic@mf.unze.ba)

<sup>2</sup>Dr.sc. Darko Petković, Zenica, Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet Zenica, BiH, [dpetkovic@mf.unze.ba](mailto:dpetkovic@mf.unze.ba)

<sup>3</sup>Dr.sc. Samir Lemeš, Zenica, Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet Zenica, BiH, [slemes@mf.unze.ba](mailto:slemes@mf.unze.ba)

<sup>4</sup>Dr.sc. Hazim Bašić, Univerzitet u Sarajevu, Mašinski fakultet Sarajevo, BiH, [basic@mef.unsa.ba](mailto:basic@mef.unsa.ba)

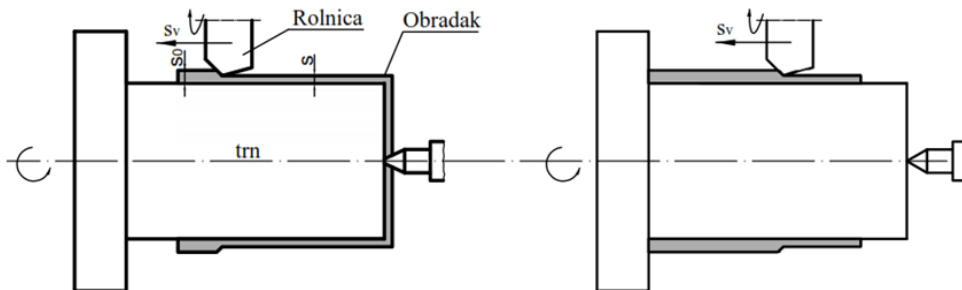
## 1. UVODNI DIO

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.

Pored poboljšanja čvrstoćnih karakteristika izrađenih dijelova jako značajno je da se ovim postupkom mogu oblikovati dijelovi zadovoljavajuće tačnosti oblika i dimenzija. Nedostatak praktičnih preporuka i iskustava u pogledu efikasnog oblikovanja dijelova od aluminijuma čistoće Al 99,5 % (tehnički čisti aluminijum) postupkom IHRI su razlozi za ovo istraživanje. Stoga su, s ciljem sagledavanja uticajnih faktora na tačnost oblika i dimenzija izrađenih dijelova postupkom IHRI provedena eksperimentalna istraživanja na pripremcima iz tehnički čistog aluminijuma Al 99,5.

## 2. TEHNOLOGIJA ISTOSMJERNOG HLADNOG ROTACIONOG ISTISKIVANJA

Sušтина postupka IHRI kao jednog od postupaka rotacionog oblikovanja je da se pod dejstvom pritiska rollica (dvije ili tri) materijal prevede u područje plastičnog tečenja i istiskuje u aksijalnom pravcu uz smanjenje prečnika i povećanje dužine izratka. 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. Na slici 1. je šematskim prikazom predstavljen princip oblikovanja predmetnim varijantama HRIV sa prikazom radnih elemenata alata.



Slika 1. Šematski prikaz postupka istosmjernog (lijevo) i suprotnosmjernog (desno) HRIV [1]

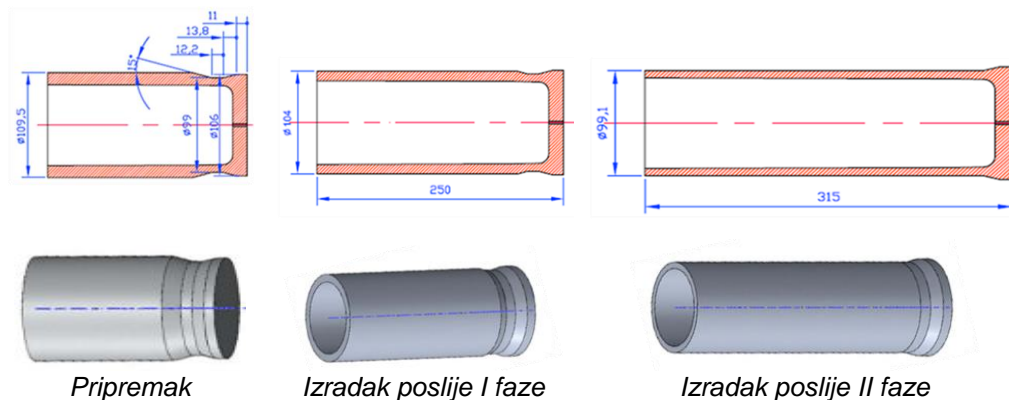
Pri istosmjernom (direktnom) IHRIV (slika 1, lijevo) tečenje nedeformisanog materijala priprema/predoblika i kretanje rollica (alata) je u istom smjeru, dok je kod suprotnosmjernog (indirektnog) SHRIV (slika 1, desno) tečenje materijala u suprotnom smjeru u odnosu na smjer kretanja rollica. Kako je svrha ovog istraživanja bila prvenstveno da se utvrde mogućnosti dobijanja izradaka tehnologijom IHRI iz Al 99,5 zadovoljavajuće tačnosti oblika i dimenzija sa adekvatnim čvrstoćnim karakteristika neophodno je pored kontrole dobijenih dimenzija izradaka provjeriti i preciznost njihove geometrije kroz mjerenje kružnosti na 3D koordinatnoj mjerneoj mašini.

### 3. KRUŽNOST IZRADAKA I NAČINI NJENOG MJERENJA

Prema definiciji, kružnost se odnosi na stanje kružne linije ili površine kružnog dijela, kod kojeg su sve tačke na liniji ili na obodu poprečnog presjeka dijela, jednako udaljene od središnje tačke. Odstupanje od kružnosti je radijalna širina prstenaste površine između dvije koplanarne, međusobno koncentrične kružnice. Još od davne 1950. godine kada je kao pojam uveden, pojam kružnosti je definisan kao jedna od važnih karakteristika obrade kojim je unaprijeđen kvalitet definisanja dijelova kružnog oblika. Vremenom su razvijani uređaji za njeno mjerenje i kontrolu. Očigledno je da danas najveću primjenu u specifikacijama potrebne opreme za tehničku kontrolu i mjerenja u velikim, ali i malim proizvodnim organizacijama zbog niza prednosti imaju koordinatne mjerne mašine. Pored niza drugih mjerenja one omogućavaju i mjerenje kružnosti savremenim metodama. To su metode ispitivanja kružnosti s vanjskom mjernom referencom (tip rotirajućeg stola i tip rotirajućeg ticala) za razliku od konvencionalnih metoda s unutrašnjom mjernom referencom (dijametralno ispitivanje kružnosti, ispitivanje kružnosti primjenom mjernih šiljaka i ispitivanje kružnosti primjenom V-prizmi). Za mjerenje kružnosti kao i drugi uređaji koordinatne mjerne mašine detektuje mala odstupanja od idealnog oblika kruga (engl."out of-round"), a danas se za procjenu odstupanja od kružnosti koriste četiri karakteristične metode i to: Metoda najmanjih kružnih kvadrata, Metoda najmanje kružne zone; Metoda najmanje opisane kružnice i Metoda najveće upisane kružnice. Razlika u rezultatima mjerenja kružnosti po ovim metodama iznosi u prosjeku 10-15 % [4].

### 4. EKSPERIMENTALNI RAD

S ciljem utvrđivanja preciznosti izrade dijelova od tehnički čistog aluminijuma tokom hladne obrade deformisanjem izvršeno je oblikovanje Al 99,5 komore u dvije faze IHRIV. Na slici 2. su predstavljene dimenzije pripremk a i izradaka po fazama IHRI.



Slika 2. Izgled i dimenzije pripremk a i izradaka po fazama IHRIV

#### 4.1 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). Plan matrica i nivoi varijacije faktora u prvj i drugoj fazi predstavljeni su u tabelarnom prikazu rezultata istraživanja, tabela 1.

Tabela 1. Komparativni podaci o mjerenju kružnosti poslije prve i druge faze IHRI

Br. exp.	Plan matrica i nivoi varijacije faktora u:						Prosejni finalni prečnici izradaka:			$\varphi_{\text{ukupno}} [\%]$	Parametri kružnosti			
	I fazi			II fazi			Vanjski		Unutrašnji na		Poslije I faze		Poslije II faze	
	n [°/min]	s <sub>r</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Δs [mm]	n [°/min]	s <sub>r</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Δs [mm]	∅A [mm]	dužini 37,15 mm	dužini 100 mm		Kružnost [μm]	Broj tačaka	Kružnost [μm]	Broj tačaka
0	Pripremak						109,6	83,9	83,8		0,02577	1036	-	-
1	140	60	2	140	60	3,5	98,8	83,4	83,8	53,5	0,10912	998	0,16090	1836
2	240	60	2	240	60	3,5	98,8	83,4	83,8	53,4	0,17314	998	0,24337	1837
3	140	100	2	140	100	3,5	99,0	83,5	83,8	52,3	0,15110	1004	0,28626	1840
4	240	100	2	240	100	3,5	98,7	83,4	83,8	57,6	0,19841	999	0,15883	1836
5	140	60	3,5	140	60	2	99,0	83,5	83,8	51,7	0,20961	967	0,12755	1843
6	240	60	3,5	240	60	2	99,0	83,5	83,8	51,6	0,35027	966	0,12252	1840
7	140	100	3,5	140	100	2	99,2	83,5	83,8	50,7	0,20391	971	0,05995	1843
8	240	100	3,5	240	100	2	99,0	83,5	83,8	52,0	0,25744	969	0,06742	1847
9	190	80	2,75	190	80	2,75	-	-	-	0,14998	988	-	-	
10	190	80	2,75	190	80	2,75	98,5	83,4	83,8	55,2	0,13363	988	0,08723	1842
11	190	80	2,75	190	80	2,75	98,8	83,4	83,8	53,2	0,10681	988	0,18138	1834
12	190	80	2,75	140	60	3,5	99,0	83,4	83,8	52,2	0,09001	984	0,18004	1836

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

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 zavisno od rednog broja uzorka se kreće od 35,5 % do 50,3 % (od  $L_{\text{ukvizv}}=74$  mm do 104 mm), a ukupni logaritamski stepen deformacije po dužini se kreće od  $\varphi_{\text{min}}=0,27$  do  $\varphi_{\text{max}}=0,59$ .

U nastavku su predstavljeni rezultati mjerenja kružnosti.

#### 4.2 Kontrola kružnosti na Al 99,5 izradcima dobijenim u prvj i drugoj fazi IHRIV

Kontrola kružnosti na izrađenim uzorcima prema planiranom eksperimentu, uključujući i pripremak za hladno IHRIV izvršena je na 3D koordinatnoj mjerneoj mašini marke Zeiss Contura G2 u Laboratoriji za mjernu tehniku na Mašinskom fakultetu u Zenici.

Korištena je mjerna sonda sa kuglicom radijusa R=5 mm, slika 3.

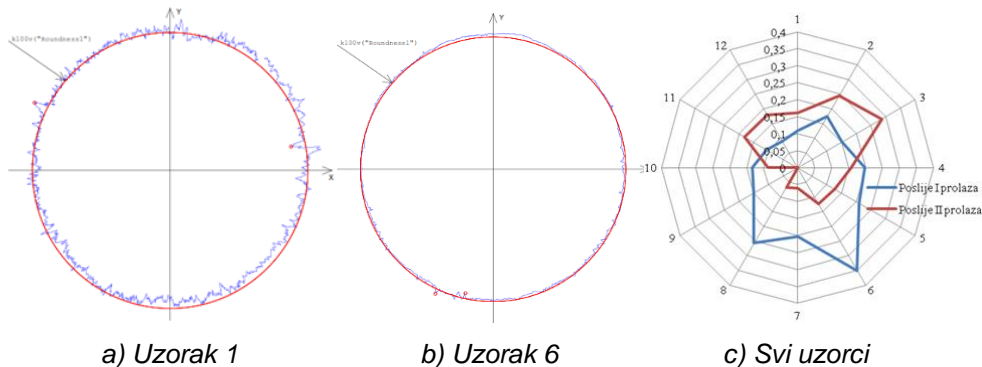


Slika 3. 3D koordinatna mjerna mašina, način mjerenja sa mjernom sondom za kontrolu kružnosti

Odstupanje kružnosti je vršeno metodom najmanjih kružnih kvadrata, a softver za identifikaciju i obradu podataka Zeiss Calypso CNC Geometry koordinatne mjerne mašine ovu vrijednost odstupanja od idealnog kruga ispisuje direktno u izvještaju o mjerenju.

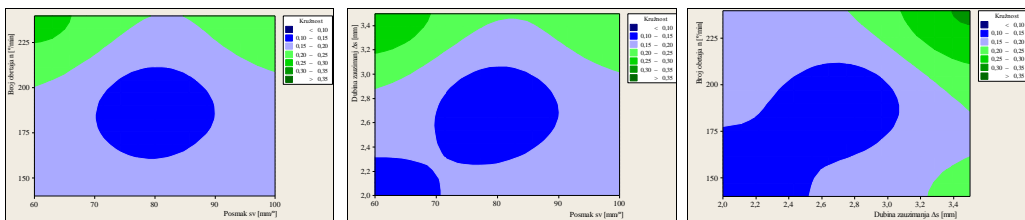
### 4.3 Rezultati ispitivanja

Na slici 4. su predstavljeni primjeri grafičkih prikaza odstupanja kružnosti pojedinih izradaka nakon druge faze IHRIV i sumarni dijagramski prikaz rezultata mjerenja na svim uzorcima nakon prve i druge faze IHRV.



Slika 4. Primjer grafičke interpretacije odstupanja kružnosti izradaka od Al 99,5% poslije druge faze (a i b) i komparativni rezultati poslije prve i druge faze IHRIV na svim uzorcima (c)

Komparirajući grafičke prikaze svih uzoraka uočava se da je najmanje rasipanje odstupanja kružnosti poslije druge faze IHRIV kod izradaka izrađenih sa minimalnim i srednjim vrijednostima parametara izrade ( $n$ ,  $sv$ ,  $\Delta s$ ), odnosno na uzorcima 6, 7, 8 i 10, dok je maksimalno odstupanje (cca 0,3  $\mu m$ ) na uzorcima 2 i 3 izrađenim sa kombinacijom maksimalnih procesnih parametara. Isti zaključci se mogu izvesti i za izratke oblikovane u prvoj fazi IHRV, a na slici 5. je data grafička interpretacija odstupanja kružnosti poslije prve i druge faze u funkciji  $n$ ,  $s$  i  $\Delta s$ .



Slika 5. Dijagrami odstupanja kružnosti u funkciji  $n$ ,  $s$  i  $\Delta s$

Na osnovu ovih dijagrama moguće je ustanoviti optimalne vrijednosti ulaznih parametara oblikovanja za dobijanje minimalnih vrijednosti odstupanja kružnosti finalnih izradaka.

## 5. ZAKLJUČAK

Tehnologijom IHRIV uz adekvatne geometrijske karakteristike alata (prečnik, radijus, napadni ugao, radijalno i aksijalno podešavanje i dr.), tehnološke ( $n$  i  $s$ ) i druge procesne parametre (pritisak rolnica, 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  $\phi I=15$  do 35 % i  $\phi II=16$  do 37 %) efikasno se mogu oblikovati osnosimetrični izradci zadovoljavajuće tačnosti oblika i dimenzija i sa poboljšanim čvrstoćnim karakteristikama u odnosu na materijal priprema.

Sa predstavljenih dijagrama se uočava da je najmanja vrijednost odstupanja kružnosti za oblikovanje Al 99,5 postupkom IHRIV kod izradaka oblikovanih srednjim vrijednostima broja obrtaja (170-200 o/min), posmaka (70-90 mm/o) i dubine zauzimanja (2-3 mm).

Podaci o odstupanju kružnosti nakon druge faze IHRIV ukazuju da su one niže nego kod predmetnih izradaka poslije prve faze. Tokom obje faze IHRIV nešto veći uticaj na kružnost ima dubina zauzimanja rolnica.

Povećanjem njene vrijednosti i odstupanje kružnosti je izraženije. Stoga se za dobijanje preciznijih kružnih oblika cjevastih izradaka trebaju birati manje dubine zauzimanja rolnica pri oblikovanju.

Provedena regresiona analiza ukazuje da se nemože dovoljno pouzdano uspostaviti matematički model zavisnosti kružnosti od  $n$ ,  $s$  i dubine zauzimanja ( $\Delta s$ ), odnosno stepena deformacije.

Komparirajući dobijene podatke o mjerenju odstupanja kružnosti izradaka nakon prve i druge faze IHRIV može se konstatovati da se navedenim postupkom izrade (oblikovanja) rotaciono simetričnih izradaka od Al 99,5 sa sigurnošću mogu dobiti dijelovi sa maksimalnim odstupanjem od idealnog kružnog oblika u granicama 0,2 do 0,4  $\mu\text{m}$ .

## LITERATURA

- [1] Ekinović S., Plančić I., Begović E., Đukić H., Muminović B. (2014). Očvršćavanje materijala pri oblikovanju cjevastih izradaka iz Al 99,5% kod istosmjernog hladnog rotacionog istiskivanja, *X Naučno/stručni simpozij sa međunarodnim učešćem "Metalni i nemetalni materijali" Bugojno*, BiH, 21-22. april 2014.
- [2] Nikačević M., Radović Lj. (2010). Rotaciono valjanje: specifična tehnologija za izradu delova raketa, kumulativna naučnotehnička informacija, Vojnotehnički institut Beograd, *Naučno tehničke informacije*, ISSN 1820-3418, Vol. XLIV No. 2.
- [3] Šotra V., Raković A. (2008). Merenje tolerancija oblika i položaja delova kružnog oblika, *Tehnička dijagnostika* (1), 19-24, UDC: 62-422.11-777:629.05, Beograd.
- [4] Nugent P. (2008). *Form Measurement Fundamentals*, Metrology center Mahr.
- [5] Pavelić V. (1995). *Specifične tehnologije u proizvodnji oružja*, Novi Travnik-Zagreb, MORH-TP-4/95.