



Jovančićević, L.<sup>1)</sup>, Popović, M., Pjević, M., Tanović Lj.<sup>2)</sup>

## EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA UGLA ELASTIČNOG VRAĆANJA KOD ŠIREG SPEKTRA MATERIJALA

### Rezime

*Delovi dobijeni tehnologijom oblikovanja lima mogu se procentualno svrstati u najzastupljenije delove sklopova i pod-mehanizama mehanizama. Osnovi problem koji se javlja kod izrade delova od lima tehnologijom oblikovanja, jeste elastično vraćanja. Koeficijent elastičnog vraćanja koji se može koristiti kao korekcionni koeficijent pri procesu savijanja, neophodno je da se odredi za materijal koji se koristi, kao i za uslove obrade. U ovom radu, izvršena je eksperimentalna identifikacija koeficijenta elastičnog vraćanja za tri različita materijala (Al-legura, nelegirani čelik i nerđajući čelik). Eksperimenti su obuhvatali opseg ugla savijanja od 65° do 135°. Ustanovljeno je da u zavisnosti od tipa materijala i ugla savijanja, koeficijent elastičnog vraćanja može znatno varirati. Ispostavilo se takođe da na njegovu vrednost znatno utiče i geometrija gornjeg oblikača.*

**Ključne reči:** tehnologija oblikovanja lima, tanki materijali, ugao elastičnog vraćanja, koeficijent elastičnog vraćanja

### 1. UVOD

Sa primetnim intenzivnim razvojem tehnika i tehnologija koje se koriste pri projektovanju novih proizvoda, neizostavan je termin „savremen način projektovanja“. To podrazumeva da proizvod koji se projektuje bude sastavljen od delova koji se dobijaju širokim spektrom raspoloživih proizvodnih tehnologija, počevši od: livenja, obrade plastike, rezanja, pa i tehnologije obrade lima.

Kada se govori eksplicitno o tehnologiji obrade lima, jasno se može zaključiti da ona spada u najprimenjenije tehnologije. Posmatrano procentualno, od računara, automobilske, avio industrije, ..., veliki procenat delova čine upravo delovi koji se dobijaju tehnologijom obrade lima.

Potpuno razumevanje ove tehnologije predstavlja osnov za njenu uspešnu primenu. Jedan od osnovnih problema koji se javlja kod ove tehnologije je elastično vraćanje koje je posledica fizičko/mehaničkih svojstava materijala koji se koriste [1, 2]. U cilju efikasnog prevazilaženja ovog problema, neophodno je izvršiti detaljna ispitivanja materijala koji se koriste, u cilju pravilnog propisivanja tehnologije oblikovanja lima, a koja se mogu svrstati u nekoliko pravaca. Prvi pravac predstavlja istraživanje elastičnog vraćanja korišćenjem specijalnih držača lima [3, 4]. Drugi pravac se odnosi na ispitivanje uticaja geometrije oblikača na efekat elastičnog vraćanja [5, 6]. Poslednja dva pravca se odnose na kompenzaciju ugla savijanja većim uglom savijanja [7, 8] i ispitivanje efekta toplog savijanja na ugao elastičnog vraćanja [9, 11].

### 2. DEFINICIJA PROBLEMA

Elastično vraćanje materijala nakon procesa savijanja lima predstavlja nezaobilazan fenomen koji je u funkciji vrste materijala koji se savija, vrednosti radijusa  $r_2$  i debljine lima  $s$ . Njegova pojava uslovljena je postojanjem povratnih elastičnih i plastičnih deformacija u zoni savijanja. Kao posledica, nakon procesa

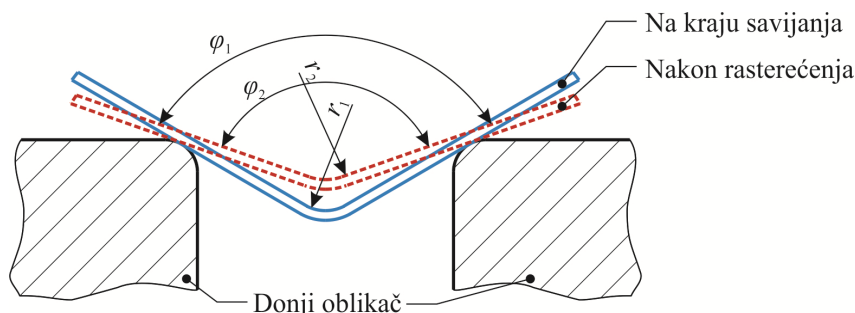
<sup>1)</sup> Luka Jovančićević, mast. inž. maš., (luka.jovancicevic@bosch.com), Robert Bosch DOO, Šimanovci

<sup>2)</sup> Doc. dr Mihajlo Popović, dipl. inž. maš., (mpopovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Miloš Pjević, mast. inž. maš., (mpjevic@mas.bg.ac.rs), prof dr Ljubodrag Tanović, (ltanovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za Proizvodno mašinstvo, Centar za nove tehnologije

savijanja, javiće se znatno odstupanje izmerene geometrije dela od one koja se zahteva tehničkom dokumentacijom (slika 1).

Kako bi se izvršila kompenzacija ugla elastičnog vraćanja, neophodno je da se izvrši eksperimentalna identifikacija faktora elastičnog vraćanja  $K$  za željeni materijal, radijus svijanja i ugao savijanja, prema izrazu [12]:

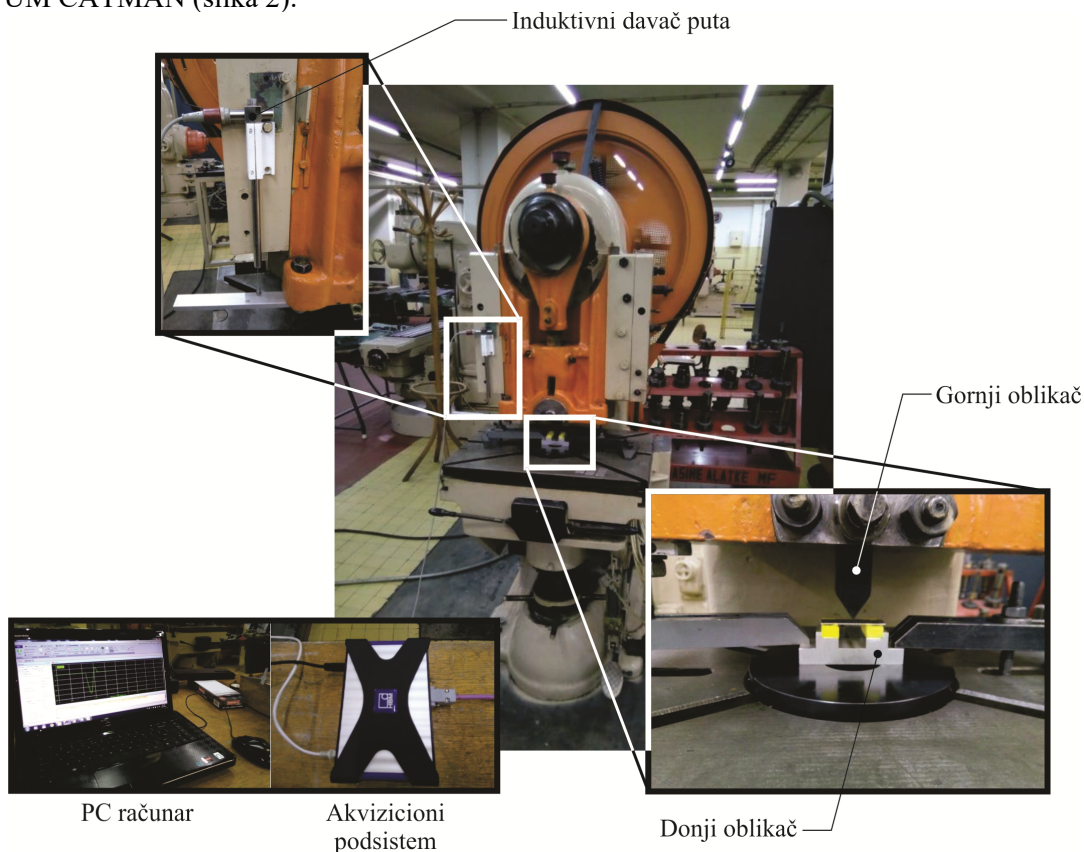
$$K = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (1)$$



*Slika 1. Promena ugla savijanja usled elastičnog vraćanja.*

### 3. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

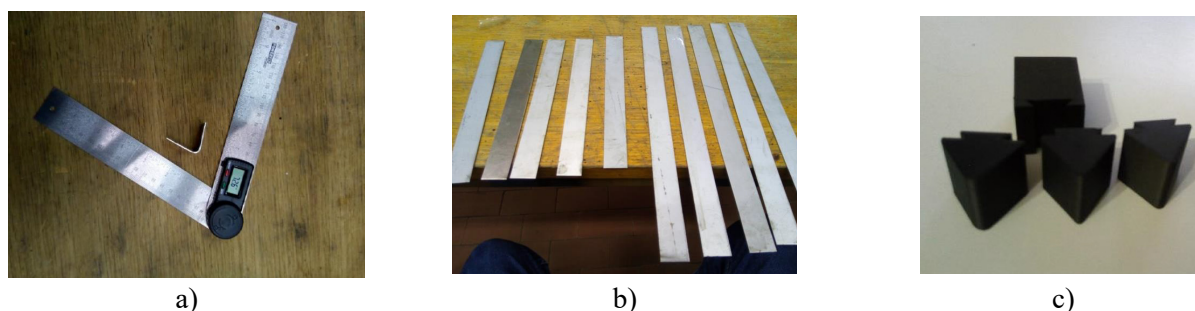
Eksperimenti savijanja lima, sprovedeni su na ekscentar presi ILR EP-P-50. Imajući u vidu da korišćena ekscentar presa pruža mogućnost definisanja dužine radnog hoda pritiskivača, za potrebe eksperimenata bilo je neophodno izvršiti identifikaciju stvarne dužine radnog hoda pritiskivača prese. Za to je korišćen senzor pomeraja baziran na principu induktivnog polumosta. Telo senzora čvrsto je vezano za stub prese, dok je pokretni deo senzora pričvršćen za pritiskivač. Akvizicioni podsistem sastojao se od univerzalnog četvorokanalnog pojačivača HBM Quantum MX440B uređaja koji je imao funkciju pojačanja signala, kao i njegove A/D konverzije, dok je za praćenje i zapisivanje izmerenih rezultata korišćen PC računar i softver QUANTUM CATMAN (slika 2).



*Slika 2. Eksperimentalna postavka.*

Alat koji se sastojao od gornjeg i donjeg oblikača, postavljen je i pričvršćen kako na radni sto, tako i na pritiskivač prese. U zavisnosti od željenog ugla savijanja lima, vršeno je podizanje/spuštanje radnog stola prese, odnosno donjeg oblikača. Ovim se ostvaruje precizno definisanje krajnje pozicije gornjeg oblikača u odnosu na donji na kraju radnog hoda pritiskivača prese.

Nakon procesa savijanja, korišćenjem digitalnog uglomera, vršeno je merenje ostvarenog ugla savijanja (slika 3a). Eksperimenti su sprovedeni na tri različita materijala (aluminijum EN 573-3, Č0545 i nerđajući čelik EN 1.4016) (slika 3b)., sa tri različita gornja oblikača čije vrednosti radijusa zaobljenja iznose R1, R3 i R4 mm (slika 3c), pri čemu je u svim slučajevima debljina lima iznosila  $s=1,5$  mm. Eksperimenti su bazirani tako da ugao savijanja nije isti za sve eksperimente, već je on izveden na osnovu hoda gornjeg oblikača, kao i na osnovu početne pozicije gornjeg oblikača u odnosu na lim koji se savija. Sa ciljem dobijanja što preciznije slike o uglu elastičnog vraćanja, svi sprovedeni eksperimenti su ponovljeni tri puta.



Slika 3. Prikaz a) merenja ugla savijanja, b) korišćenog materiala i c) izmenljivih gornjih oblikača.

#### 4. REZULTATI

U tabeli 1, prikazane su izmerene vrednosti savijanja lima  $\varphi_2$  u odnosu na njegovu teoretsku vrednost  $\varphi_1$ . Rezultati merenja se odnose na tri različita materijala.

Tabela 1. Izmerene vrednosti ugla savijanja  $\varphi_2$  lima u odnosu na teoretsku vrednost  $\varphi_1$  za tri različita materijala za tri merenja.

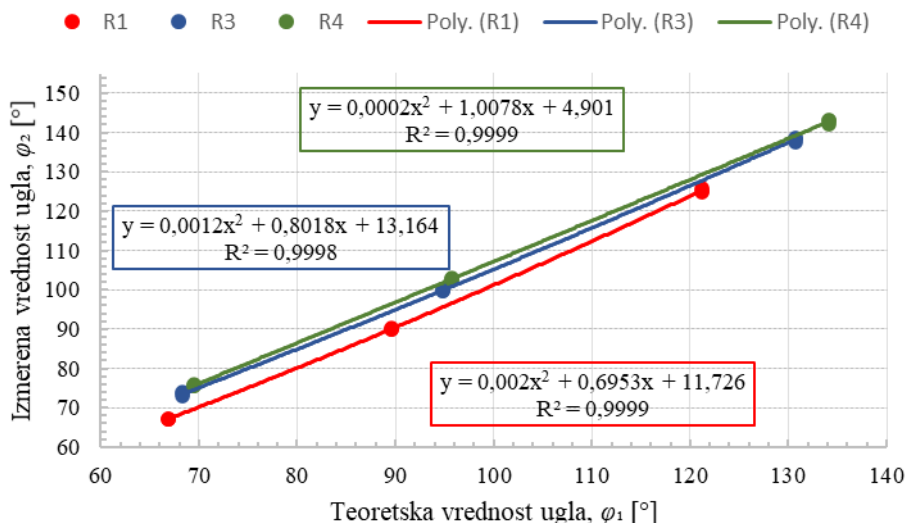
	aluminijum EN 573-3			Č0545			EN 1.4016		
	Merenje 1 $\varphi_2$ [°]	Merenje 2 $\varphi_2$ [°]	Merenje 3 $\varphi_2$ [°]	Merenje 1 $\varphi_2$ [°]	Merenje 2 $\varphi_2$ [°]	Merenje 3 $\varphi_2$ [°]	Merenje 1 $\varphi_2$ [°]	Merenje 2 $\varphi_2$ [°]	Merenje 3 $\varphi_2$ [°]
R1, $\varphi_1=66,9^\circ$	67,2	67,1	67,2	67,8	68,4	68,1	70,8	69,9	70
R3, $\varphi_1=68,37^\circ$	73,9	73,6	73,1	73	73,4	73,1	77	76,3	76,2
R4, $\varphi_1=69,49^\circ$	75,8	75,6	75,6	74,6	74,5	74,8	78,9	78,8	78,7
R1, $\varphi_1=89,6^\circ$	90,2	90,1	89,8	91,5	91,6	91,9	94,5	94,6	95
R3, $\varphi_1=94,82^\circ$	100,2	99,7	99,7	100,1	99,9	100,1	105,5	104,8	104,9
R4, $\varphi_1=95,76^\circ$	102,9	102,8	102,7	105,2	104,4	104,4	110	110,1	110,5
R1, $\varphi_1=121,24^\circ$	125	125,2	125,8	125,9	126	125,7	134	134,6	134,5
R3, $\varphi_1=130,72^\circ$	137,7	138,5	138,6	140,8	140,7	140,5	147,9	147,3	148,3
R4, $\varphi_1=134,06^\circ$	143	142	143,2	146	146	146,5	153,5	152,9	153,3

Analizom dijagrama prikazanog na slici 4, koji se odnosi na izmerenu vrednost ugla savijanja u odnosu na njegovu teoretsku vrednost za Aluminijum, može se ustanoviti da sa povećanjem radijusa zaobljenja na gornjem oblikaču, dolazi do smanjenja ugla elastičnog vraćanja. Njegova vrednost nije konstantna i zavisi od ugla savijanja lima, što se može zaključiti sa slike 7, na kojoj je prikazana vrednost ugla elastičnog vraćanja  $K$ .

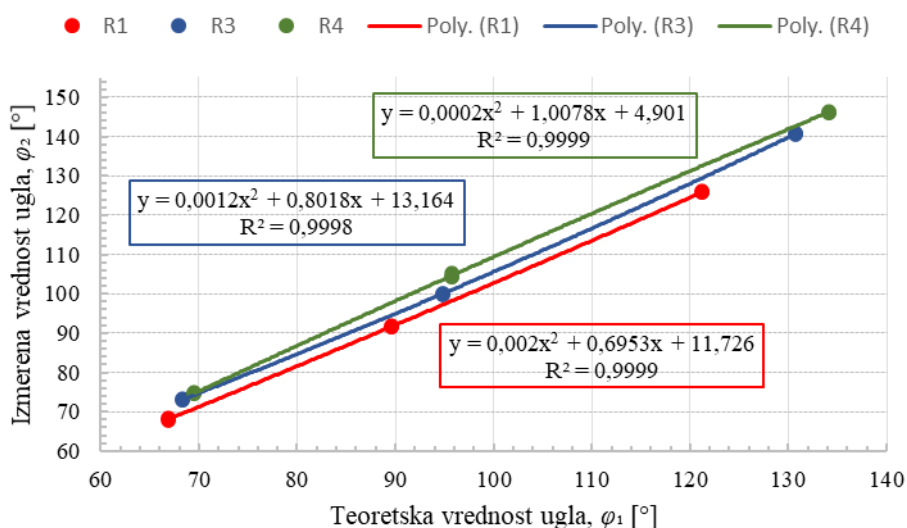
U poređenju sa aluminijumom, kod čelika je primetna veća razlika vrednosti ugla elastičnog vraćanja sa

promenom zaobljenja na gornjem oblikaču. Takođe, ugao elastičnog vraćanja ima veće vrednosti u odnosu na aluminijum u slučaju većih vrednosti ugla savijanja. Sa smanjenjem ugla savijanja, te vrednosti postaju skoro identične kod čelika i aluminijuma.

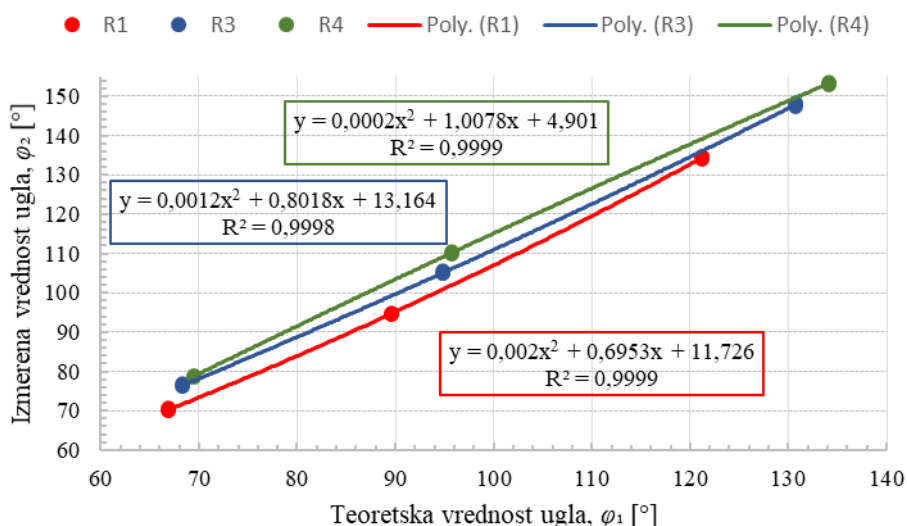
Ukoliko se uporedi nerđajući čelik sa prethodna dva materijala, on ima najveće vrednosti ugla elastičnog vraćanja. To se odnosi kako na velikim vrednostima ugla savijanja, tako i na manjim. Drugim rečima, u poređenju sa aluminijumom i čelikom, koeficijent ugla elastičnog vraćanja za nerđajući čelik ima veće vrednosti, pri čemu je primetan veći trend rasta sa povećanjem ugla savijanja u odnosu na prethodna dva materijala, slika 7.



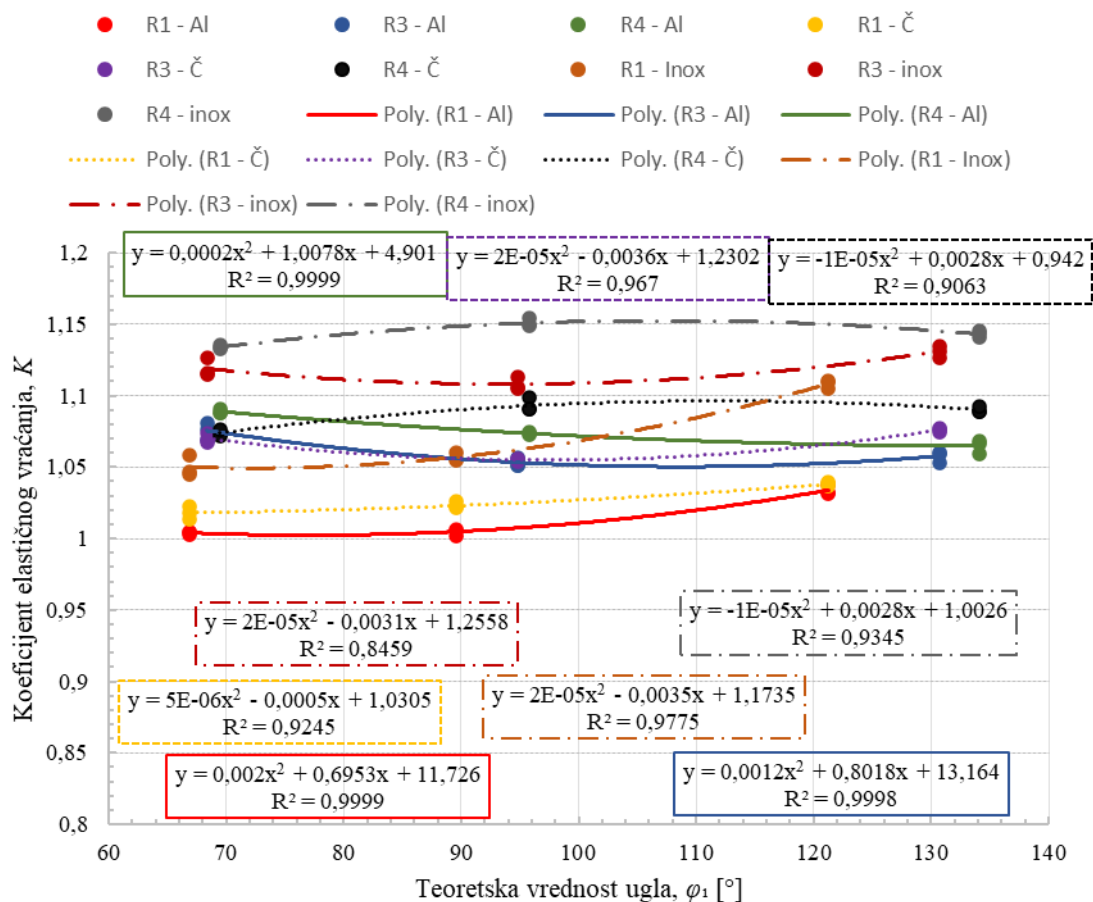
*Slika 4. Odnos izmerenog  $\phi_2$  i teoretskog  $\phi_1$  ugla savijanja za aluminijum pri korišćenju oblikača sa radiusima zaobljena R1, R3 i R4 mm.*



*Slika 5. Odnos izmerenog  $\phi_2$  i teoretskog  $\phi_1$  ugla savijanja za čelik pri korišćenju oblikača sa radiusima zaobljena R1, R3 i R4 mm.*



**Slika 6.** Odnos izmerenog  $\varphi_2$  i teoretskog  $\varphi_1$  ugla savijanja za nerđajući čelik pri korišćenju oblikača sa radijusima zaobljena R1, R3 i R4 mm.



**Slika 7.** Vrednost koeficijenta elastičnog vraćanja za tri vrste materijala pri korišćenju oblikača sa radijusima zaobljena R1, R3 i R4 mm.

## 5. ZAKLJUČAK

1. U zavisnosti od tipa materijala koji se koristi, vrednosti koeficijenta elastičnog vraćanja može znatno varirati. Pored vrste materijala, na njegovu promeni utiče i ugao savijanja lima, kao i geometrija gornjeg oblikača.

2. Kod aluminijuma, vrednost koeficijenta elastičnog vraćanja ima znatno manju vrednosti u poređenju sa čelicima.
3. Kod aluminijuma i Č0545 na manjim uglovima savijanja lima, ugao elastičnog vraćanja ima približno konstantnu vrednost, dok je kod nerđajućeg čelika ta vrednost znatno veća i razlikuje se u celom opsegu ispitivanog ugla savijanja.
4. Sa poznavanjem vrednosti koeficijenta elastičnog vraćanja za tačno definisane uslove, moguće je izvršiti kompenzaciju ugla savijanja sa ciljem dobijanja željene geometrije dela.

## 6. LITERATURA

- [1] Ma, Rui, et al. "An iterative compensation algorithm for springback control in plane deformation and its application." *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 32.1 (2019): 1-12.
- [2] Gan, Wei, and R. H. Wagoner. "Die design method for sheet springback." *International Journal of Mechanical Sciences* 46.7 (2004): 1097-1113.
- [3] Fu, Zemin, et al. "Tool path correction algorithm for single-point incremental forming of sheet metal." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 64.9-12 (2013): 1239-1248.
- [4] Ruffini, R., and J. Cao. "Using neural network for springback minimization in a channel forming process." *SAE transactions* (1998): 65-73.
- [5] Gu, Zhengwei, et al. "Stretch bending defects control of L-section aluminum components with variable curvatures." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85.5-8 (2016): 1053-1061.
- [6] Zhai, Ruixue, et al. "Stretch bending and springback of profile in the loading method of prebending and tension." *International Journal of Mechanical Sciences* 144 (2018): 746-764.
- [7] Verma, Rahul K., Kwansoo Chung, and Toshihiko Kuwabara. "Effect of pre-strain on anisotropic hardening and springback behavior of an ultra low carbon automotive steel." *ISIJ international* 51.3 (2011): 482-490.
- [8] Chongthairungruang, B., et al. "Experimental and numerical investigation of springback effect for advanced high strength dual phase steel." *Materials & Design* 39 (2012): 318-328.
- [9] Wang, Lifei, et al. "Evolution of springback and neutral layer of AZ31B magnesium alloy V-bending under warm forming conditions." *Journal of Materials Processing Technology* 213.6 (2013): 844-850.
- [10] Zong, Yingying, et al. "Springback evaluation in hot v-bending of Ti-6Al-4V alloy sheets." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 76.1-4 (2015): 577-585.
- [11] Edwards, William L., et al. "Optimum process parameters for springback reduction of single point incrementally formed polycarbonate." *Procedia Manufacturing* 10 (2017): 329-338.
- [12] Milenko J., Tanović Lj., "Alati i pribori: Proračuni i konstrukcije alata za izradu delova od lima." *Mašinski fakultet, Beograd* (2007).

**Jovančićević, L., Popović, M., Pjević, M.**

### **Experimental identification of the elastic return angle in a wider range of materials**

**Abstract:** *The parts obtained by sheet metal forming technology can be classified as the most common parts of assemblies of mechanisms. The basic problem that occurs when making sheet metal parts, is the elastic return. The coefficient of elastic return that can be used as a correction coefficient in the bending process, is necessary to be determined for the used material, as well as for the processing conditions. In this paper, the experimental identification of the coefficient of elastic return for three different materials (Aluminum, Steel, and Prochrome) was performed. The experiments covered a range of bending angles from about 65 ° to 135 °. It has been found that depending on the type of material and the bending angle, the coefficient of elastic return can vary considerably. It also turned out that its value is significantly influenced by the geometry of the upper shaper.*

**Key words:** *sheet metal forming technology, thin materials, elastic return angle, coefficient of elastic return*