

VPLIV STOPNJE DEFORMACIJE NA ELASTIČNO IZRAVNAVANJE HLADNO VLEČENE ZLITINE CuCrZr

THE INFLUENCE OF THE STRAIN ON SPRINGBACK OF COLD DRAWN ALLOY CuCrZr

Leo Gusel

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za preoblikovanje, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

Prejem rokopisa - received: 1999-11-15; sprejem za objavo - accepted for publication: 1999-12-20

Posledica utrjevanja med hladnim preoblikovanjem je sprememba mehanskih lastnosti materiala. Nekatere lastnosti se povečajo (trdota, natezna trdnost, napetost tečenja...), druge pa zmanjšajo (razteznost, kontrakcija...). Utrjevanje z deformiranjem lahko s pridom uporabimo za povečanje trdote in natezne trdnosti praktično za vse kovine in zlitine. Stopnja deformiranja ima velik vpliv tudi na koeficient elastičnega izravnavanja in kota izravnavanja, kar je posebej pomembno pri preoblikovanju z upogibanjem. Članek opisuje vpliv stopnje deformacije na spremembo koeficienta elastičnega izravnavanja in kota izravnavanja hladno vlečene bakrove zlitine CuCrZr. Rezultati so predstavljeni v obliki grafov in matematičnih povezav, ki nam omogočajo določevanje teh lastnosti hladno vlečene zlitine, če poznamo stopnjo deformacije.

Ključne besede: zlitina CuCrZr, hladno vlečenje, hladno oblikovanje, elastično izravnavanje, statistična analiza

During the deformation of metals at lower temperatures, the yield stress increases with increasing strain. This phenomenon is called strain hardening. As a result of strain hardening, there is an increase in the strength values of the finished components through forming which is very desirable. The strain hardening has also a great influence on the elastic springback ratio and the springback angle. Control of springback for the bending processes applied in practice is difficult for a number of reasons, especially in mass production. This paper describes the influence of the effective strain reached by cold drawing, to springback ratio and springback angle of alloy CuCrZr. The results are presented in the form of graphs and mathematical models which help us to determine these properties of a cold formed alloy if the strain is known.

Key words: alloy CuCrZr, cold drawing, cold forming, springback, statistic analysis

1 UVOD

Elastično izravnavanje (vzmetnost) izdelka po plastični deformaciji - upogibanju nastopi zaradi elastičnih deformacij v materialu med preoblikovanjem. Ta reverzibilna deformacija je odvisna od mehanskih lastnosti materiala, stopnje deformacije, debeline materiala, upogibnega polmera, načina in kota upogibanja.

Elastično izravnavanje je treba upoštevati pri vseh postopkih upogibanja in profilnega valjanja, saj vpliva na določitev konstrukcijskih dimenzij orodja. Vpliv elastičnega izravnavanja in karakteristične dimenzije

upognjenega izdelka, s katerimi lahko eksperimentalno določimo elastično izravnavanje, prikazuje **slika 1**.

Za konkretne preračune v praksi najpogosteje uporabljamo koeficient K_e , ki dobro opisuje elastično izravnavanje materiala. Na podlagi eksperimentalnih rezultatov ga je možno izračunati po naslednji enačbi (1):

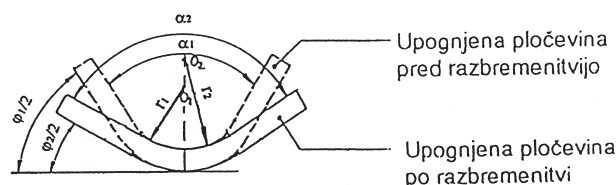
$$K_e = \frac{r_1 + 0,5 \cdot s}{r_2 + 0,5 \cdot s} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (1.1)$$

kjer je s debelina materiala, ki ga upogibamo.

2 EKSPERIMENTALNO DELO

Namen eksperimentalnega dela je bila določitev koeficienta elastičnega izravnavanja K_e , velikosti kota izravnavanja $\Delta\alpha$ ter njuna odvisnost od stopnje deformiranosti bakrove zlitine CuCrZr. Zlitina, ki jo je izdelala Mariborska livarna, vsebuje razen bakra, ki je osnova, še 0,71% Cr, 0,05% Zr, 0,006% Fe ter 0,018% Ni in je že termično obdelana ter v obliki palic ali plošč namenjena prodaji.

To zlitino smo hladno preoblikovali z vlečenjem do različnih stopenj deformacije. Surovec v obliki palice začetnega premera $D_0 = 20$ mm smo vlekli na vlečni klopi s hitrostjo 20 m/min in pri kotu vlečne matrice $2\alpha = 28^\circ$. Vlekli smo postopoma do različnih končnih



Slika 1: Karakteristične dimenzije izdelka med upogibanjem in po njem

Figure 1: Characteristic dimensions of the bending part during and after bending process

r_1upogibni polmer med upogibanjem

α_1kot profila med upogibanjem

$\varphi_1 = (180^\circ - \alpha_1)$kot upogibanja

r_2upogibni polmer po razbremenitvi

α_2kot profila po razbremenitvi

$\varphi_2 = (180^\circ - \alpha_2)$...kot upogibanja po razbremenitvi

premerov (D_k) tako, da smo dobili šest različno deformiranih vzorcev, kot prikazuje **tabela 1**.

Iz vsake z vlečenjem deformirane palice smo naredili po tri pravokotne preizkušance dimenzij 90mm x 12mm x 1mm ter po tri preizkušance dimenzij 90mm x 12mm x 1,5mm, ki smo jih uporabili za eksperimentalno raziskavo elastičnega izravnavanja pri upogibanju. Vzorce smo vzeli iz sredine palic, saj se je z merjenjem trdote po Brinellu (HB) v več različnih točkah preseka palic ter z matematično dobljeno povezavo (z regresijsko analizo) med trdoto HB in primerjalno deformacijo ϵ_e pokazalo, da so rezultati eksperimentalno določene primerjalne deformacije (preko povezave $\epsilon_e = f(\text{HB})$) v sredini vzorca najbolj ustrezali primerjalni deformaciji, izračunani iz spremembe premerov pred vlečenjem in po njem.

Preizkušance smo prosto upogibali v posebnem eksperimentalnem upogibnem orodju, ki je prikazano na **sliki 2**, in je bilo vpeto na hidravlični stiskalnici. Hod cilindra stiskalnice (h) je bil nastavljen na 10 mm, radij upogibnega pestiča orodja (r) pa 5 mm. Med upogibanjem smo merili kot profila ter notranji polmer izdelka. Zaradi natančnosti meritev smo za vsak vzorec izvedli po tri preizkuse in izračunali srednje vrednosti.

S tako dobljenimi podatki in z vstavljanjem le-teh v **enačbo (1.1)**, je možno izračunati faktor elastičnega izravnavanja K_e pri različno deformiranih vzorcih.

Za določanje odvisnosti koeficienta elastičnega izravnavanja K_e od natezne trdnosti, meje plastičnosti in raztezka, smo izvedli še natezne preizkuse. Iz deformiranih palic smo naredili standardne natezne epruvete $l_0/d_0 = 5$, ki smo jih vzeli iz sredine deformiranih palic. Zaradi natančnosti meritev smo za vsak vzorec naredili po tri preizkuse in izračunali srednjo vrednost izmerjenih rezultatov nateznega preizkusa.

Tabela 1: Hladno vlečenje palic zlitine CuCrZr

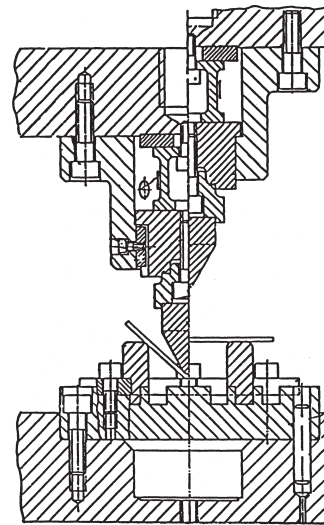
Table 1: Cold drawing of CuCrZr alloy bars

Vzorec št.	D_0 [mm]	D_k [mm]	log. def. ϵ_e
I	20	19	0,102
II	20	18	0,211
III	20	17	0,325
IV	20	16	0,446
V	20	15	0,575
VI	20	14	0,713
0 (surovec)	20	20	/

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Rezultati eksperimentov so prikazani v obliki diagramov na **slikah 3, 4, 5 in 6**.

Slika 3 prikazuje elastično izravnavanje $\Delta\alpha$ pri upogibanju različno deformiranih vzorcev zlitine CuCrZr. Na x-osi je namesto številke vzorca nanescena s hladnim vlečenjem dosežena primerjalna deformacija posameznega vzorca, tako da nam diagram podaja



Slika 2: Eksperimentalno orodje za upogibanje
Figure 2: Experimental tool for bending

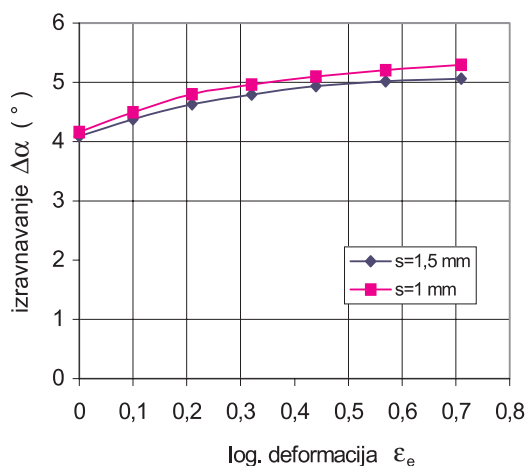
odvisnost izravnavanja od deformiranosti materiala. S **slike 3** je razvidno, da je najnižja vrednost izravnavanja $\Delta\alpha$ pri vzorcu 0 (surovcu), nato pa s stopnjo deformacije narašča in je pri deformaciji $\phi_e = 0,71$ za 28% večja kot pri vzorcu, ki ni bil deformiran z vlečenjem (vzorec 0). Opazimo tudi, da so pri debelejšem materialu ($s = 1,5$ mm) vrednosti elastičnega izravnavanja nekoliko nižje kot pri materialu debeline $s = 1$ mm.

Diagram na **sliki 4** prikazuje odvisnost koeficienta elastičnega izravnavanja K_e v odvisnosti od primerjalne deformacije vlečenih vzorcev. Pri tistih vzorcih, ki so bili z vlečenjem bolj deformirani, je K_e manjši. Tako je K_e pri vzorcu VI ($\phi_e = 0,71$) za približno 5% nižji kakor pri tistem, ki z vlečenjem ni bil deformiran (vzorec 0). Z deformacijo se material namreč utrjuje, večata se natezna trdnost in meja plastičnosti, kar vpliva na zmanjšanje koeficienta elastičnega izravnavanja K_e (oziroma na povečanje izravnavanja $\Delta\alpha$). Iz diagrama je tudi razvidno, da je vrednost K_e pri isti deformaciji in konstantnem radiju upogibanja pri debelejšem materialu večja kot pri tanjšem.

Odvisnost K_e od natezne trdnosti in meje plastičnosti prikazuje diagram na **sliki 5**, iz katerega je razvidno, da se koeficient K_e z naraščajočo natezno trdnostjo in mejo plastičnosti manjša.

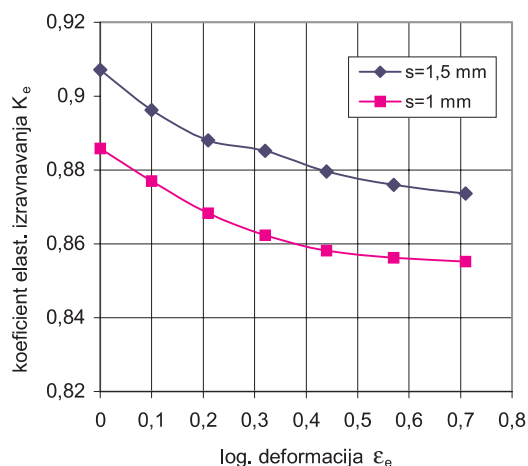
Odvisnost K_e od raztezka A_5 je prikazana na diagramu **slike 6**, iz katerega je razvidno, da se koeficient elastičnega izravnavanja K_e z večanjem raztezka povečuje.

Rezultate eksperimentalnega dela je možno predstaviti v matematični obliki s statističnimi metodami analize, med katerimi sta posebej pomembni disperzijska in regresijska. Regresijska analiza se ukvarja s postavitvijo matematičnega modela, s katerim lahko na dovolj



Slika 3: Izravnavanje v odvisnosti od primerjalne deformacije vzorcev ($r=5$ mm)

Figure 3: Springback angle as a function of the effective strain of specimens ($r=5$ mm)



Slika 4: Koeficient elastičnega izravnavanja v odvisnosti od primerjalne deformacije vzorcev ($r=5$ mm)

Figure 4: Springback ratio as a function of the effective strain of specimens ($r=5$ mm)

natančen način opišemo stanje in problem raziskave v obsegu eksperimentalnega prostora.

Za analizo eksperimentalnih rezultatov z regresijsko metodo smo izbrali matematični model druge stopnje ter z računalniškim programom izračunali medsebojno povezavo med parametri. Odvisnost elastičnega izravnavanja $\Delta\alpha$ ter koeficienta K_e od stopnje deformiranosti ϵ_e lahko v matematični obliki, dobljeni z regresijsko analizo, zapišemo:

Za $s = 1,5$ mm:

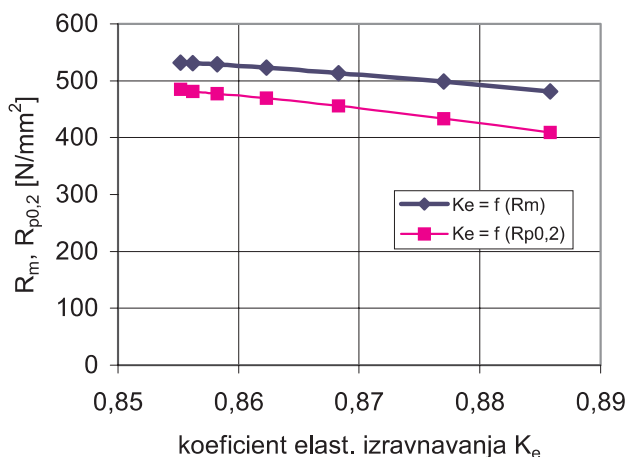
$$\Delta\alpha = 4,1026 + 2,8763 \cdot \epsilon_e - 2,1605 \cdot \epsilon_e^2 \quad (3.1)$$

$$K_e = 0,9057 - 0,0884 \cdot \epsilon_e + 0,0616 \cdot \epsilon_e^2 \quad (3.2)$$

Za $s = 1$ mm:

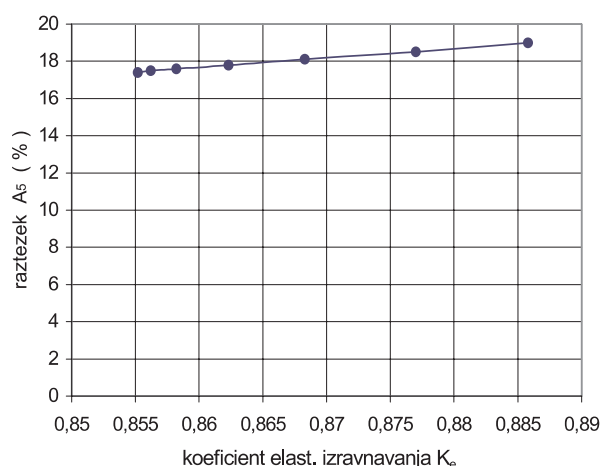
$$\Delta\alpha = 4,1876 + 3,1746 \cdot \epsilon_e - 2,2907 \cdot \epsilon_e^2 \quad (3.3)$$

$$K_e = 0,8857 - 0,0973 \cdot \epsilon_e + 0,0766 \cdot \epsilon_e^2 \quad (3.4)$$



Slika 5: Koeficient elastičnega izravnavanja v odvisnosti od meje tečenja ($R_{p0,2}$) in natezne trdnosti (R_m) vzorcev ($s = 1$ mm, $r = 5$ mm)

Figure 5: Springback ratio as a function of yield stress ($R_{p0,2}$) and tensile strength (R_m) of specimens ($s = 1$ mm, $r = 5$ mm)



Slika 6: Koeficient elastičnega izravnavanja v odvisnosti od raztezka (A_5) vzorcev ($s=1$ mm, $r=5$ mm)

Figure 6: Springback ratio as a function of elongation (A_5) of specimens ($s=1$ mm, $r=5$ mm)

Ustreznost matematičnih modelov je preverjena z disperzijsko analizo. Rezultati, dobljeni z **enačbami (3.1) do (3.4)**, se od eksperimentalnih rezultatov razlikujejo za manj kot 3%. Z matematičnimi **enačbami (3.1) do (3.4)** je možno določiti elastično izravnavanje $\Delta\alpha$ in koeficient K_e za katerokoli vrednost deformacije ϵ_e znotraj eksperimentalnega območja (od 0 do 0,71).

4 SKLEP

Plastično deformacijo pri upogibanju spremlja tudi elastična, ki povzroči delno izravnavanje upognjenega dela. Čim večja je primerjalna deformacija, tem večji sta meja plastičnosti in natezna trdnost materiala in s tem tudi elastično izravnavanje $\Delta\alpha$, medtem ko je koeficient elastičnega izravnavanja K_e manjši. Izravnavanje je

odvisno tudi od debeline pločevine (s) ter od razmerja: radij po upogibanju / debelina pločevine (r_2/s), saj je pri tanjši pločevini izravnavanje večje. Te ugotovitve so potrdili rezultati naših raziskav, ki jih lahko s pridom uporabimo pri konstrukciji in izdelavi orodij za upogibanje izdelkov iz zlitine CuCrZr.

5 LITERATURA

¹Lange K.: Umformtechnik - Handbuch fuer Industrie und Wissenschaft, Band 1, 2, 3; Berlin **1988**

²Gologranc F., Leš P. : Forming processes, University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor **1991**

³Križman A., Leš P.: Cold forming of CuCrZr-alloy electrode caps, XI. Symposium on metallurgy and metals, Ljubljana, Slovenian steel producers, **1989**, 91-97

⁴Križman A., Anžel I.: The influence of the continuous casting parameters on mechanical properties of CuCrZr, 44. Symposium on metallurgy and metals, Portorož **1993**

⁵Spaić S., Križman A., Marinković V.: Gefüge und Eigenschaften niederlegierter Aushärtbarer Cu Legierungen, Metall, (**1985**) 1

⁶Barnes W. J.: Statistical Analysis for Engineers and Scientists - a computer based approach, The University of Texas at Austin, McGraw - Hill, New York, **1994**