



ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA TRENJA U PROCESIMA OBRADJE ISTISKIVANJEM

Velibor J. Marinković¹, Tomislav R. Marinković²

¹Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu, Niš, Srbija, velmar@masfak.ni.ac.rs

²Visoka tehnička škola strukovnih studija, Niš, Srbija, tomlav.marinkovic@vtsnis.edu.rs

Apstrakt: Za proračun, modelovanje i simulaciju bilo kog procesa obrade deformisanjem neophodno je poznavanje sila trenja, odnosno koeficijenta trenja. Za određivanje sila trenja i/ili koeficijenta trenja razvijeni su mnogobrojni eksperimentalno-analički metodi (testovi). U procesima obrade zapremnim (masivnim) deformisanjem najpopularniji i najčešće primenjivani jeste metod slobodnog sabijanja prstena. Kada se radi o složenim procesima obrade deformisanjem jednostavan test sabijanja prstena ne reprezentuje u potpunosti naponsko-deformacione odnose, niti date tribološke uslove. Zato se može pretpostaviti da je pouzdanije koristiti konkretne procese obrade deformisanjem za određivanje koeficijenta trenja, jer se na taj način obuhvataju realni uslovi obrade i sve frikционе površine alata. U radu je tretiran proces istosmernog istiskivanja u hladnom i toplom stanju. Koeficijent trenja je određivan analitički na osnovu poznatog (snimljenog) dijagrama sile istiskivanja. Razmotrene su dve varijante izabranog metoda. U slučaju istosmernog istiskivanja u toplom stanju dobijeni su očekivani rezultati. Kod istosmernog istiskivanja u hladnom stanju uočeno je da se koeficijenti trenja dobijeni usvojenim metodom i standardnim testom sabijanja prstena znatno razlikuju.

Ključne reči: koeficijent trenja, masivno deformisanje, proces istosmernog istiskivanja, test sabijanja prstena

1. UVOD

Trenje na kontaktu obratka i radnih površina alata igra veoma važnu ulogu u procesima obrade materijala deformisanjem (OMD). Generalno govoreći, pojava kontaktnog trenja u procesima OMD je podjednako nepovoljna i neizbežna. Sile kontaktnog trenja povećavaju silu i potreban deformacioni rad (energiju), prouzrokuju habanje alata, nepravilno tečenje materijala i zaostale napone u obratku, te izazivaju smanjenje kvaliteta površine gotovih komada. Primera radi, istosmerno istiskivanje u hladnom i toplom stanju spada u procese OMD kod kojih se velika količina deformacionog rada (energije) troši na savladavanje sila kontaktnog trenja, ponekad i preko 50% od ukupno uložene energije.

Izborom adekvatnog maziva, triboloških svojstava alata i načina podmazivanja sile kontaktnog trenja se mogu značajno redukovati [1], [2], [3], [4], [5], [6]. S druge strane, razvijeni su i

tzv. nekonvencionalni procesi OMD u kojima sile trenja imaju "aktivno" dejstvo [5], [6], [7]. Ovakvi procesi OMD su, na žalost, još uvek u domenu polu-industrijske primene

Sile kontaktnog trenja, odnosno smičući kontaktni naponi se definišu kao funkcije koeficijenta trenja (μ) ili faktora trenja (m). Iz praktičnih razloga se složeni tribološki uslovi pojednostavljuju, pa se pomenuti frikcionni parametri tretiraju kao konstante.

Ovde je reč o "deformacionom" trenju, koje se karakteriše plastičnim deformisanjem jednog frikcionog para (obratka), dok se drugi frikcionni par (alat) tretira kao kruto telo.

Tačnost teorijskog proračuna i analize, kao i numeričke simulacije procesa OMD zavisi od mnogih ulaznih faktora, međutim, netačnost pri određivanju koeficijenta (faktora) trenja jeste esencijalni izvor grešaka.

Za određivanje sila kontaktnog trenja i koeficijenta trenja (za datu kombinaciju: alat-

-obradak - mazivo) razvijeni su mnogobrojni eksperimentalni i eksperimentalno-analički metodi [5], [8]. Za potrebe proračuna, analize i simulacije procesa zapreminskog deformisanja najširu primenu našao je metod slobodnog sabijnja prstena* [9], [10], [11].

Poslednjih decenija se ovaj metod nezvanično tretira kao standardni test za kvantitativnu evaluaciju koeficijenta/faktora trenja.

Glavni razlozi ovakve popularnosti ovog metoda su: a) jednostavnost pripreme i realizacije eksperimenta; b) lakoća merenja zahtevanih parametara; c) jednostavnost određivanja koeficijenta trenja (iz dijagrama, bez ikakvog proračuna); d) mali materijalni troškovi i vremenski gubici. Drugim rečima, za primenu ovog metoda nije neophodno teorijsko (pred)znanje, niti posebna laboratorijska oprema, pa se može realizovati u svakom industrijskom okruženju.

Međutim, ovaj metod ima i svojih nedostataka, na primer: a) netačnost merenja prečnika sabijenog prstena zbog zakrivljenosti bočnih površina ("buričasti" oblik prstena), kao i "radijalne" anizotropije materijala; b) netačnost pri očitavanju koeficijenta/ faktora trenja sa dijagrama; c) geometrijska i dimenzijska odstupanja pri izradi epruveta zadatih dimenzija; d) zanemarivanje ojačavanja materijala, koje je posebno izraženo pri obradi deformisanjem u hladnom stanju.

Može se pretpostaviti da bi eksperimentalno određivanje koeficijenta trenja u realnim uslovima odvijanja datog procesa OMD obezbedilo veću tačnost.

2. KONTAKTNO TRENJE U PROCESU ISTOSMERNOG ISTISKIVANJA

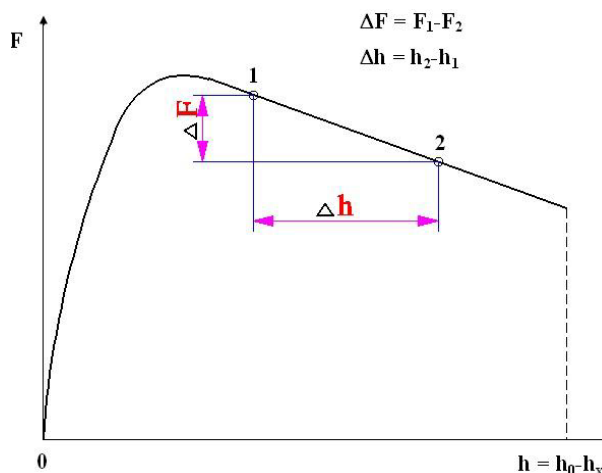
Određivanje koeficijenta/faktora trenja pri istosmernom istiskivanju može se izvršiti primenom jednostavnog eksperimentalno - analitičkog metoda, koji respektuje realne uslove odvijanja procesa. Potrebna merenja se mogu obaviti direktno u proizvodnim okolnostima.

2.1 Opis metoda

Dijagram sile pri istosmernom istiskivanju (Sl.1) ima karakterističan oblik. Deo dijagrama koji odgovara "stacionarnoj" fazi istiskivanja ima oblik linearno opadajuće funkcije.

Ova pojava se objašnjava na sledeći način. Početni porast sile do dostizanja njenog maksimuma odgovara procesu sabijanja pripremljena i popunjavanju šupljine alata (matrice i kontejnera), nakon čega sledi isticanje materijala kroz odgovarajući otvor matrice. Od tog trenutka pa do

kraja procesa istiskivanja smanjenje ukupne sile je rezultat samo smanjenja parcijalne sile kontaktnog trenja u kontejneru alata. Smanjenje ove sile je



Slika 1. Dijagram sile pri istosmernom istiskivanju

očigledno posledica kontinualnog smanjenja dužine obratka, odnosno smanjenja aktivne površine kontakta obratka i kontejnera.

Rezultujuća sila istosmernog istiskivanja se može izraziti sledećom relacijom:

$$F = F_d + F_t = F_d + \sum F_{ti} + F_{to} = F_{dt} + F_{to} \quad (1)$$

$$(F_{dt} = F_d + \sum F_{ti})$$

gde su: F_d i F_t - sila plastičnog deformisanja i sila kontaktnog trenja, respektivno; F_{to} i $\sum F_{ti}$ - sila trenja u kontejneru i sile trenja na ostalim aktivnim površinama alata, respektivno.

Za određivanje koeficijenta/faktora trenja na osnovu dijagrama sile moguće su dve varijante (A,B).

Kod prve varijante (A) potrebno je na snimljenom dijagramu sile izabrati dve tačke koje odgovaraju "stacionarnoj" fazi istiskivanja i registrovati njihove koordinate (Sl.1). Korespondentne sile trenja u kontejneru se mogu izraziti sledećim jednačinama:

$$F_{to1} = F_1 - F_{dt} = \mu \pi d_0 K h_{x1} = \mu \pi d_0 K (h_0 - h_1) \quad (2a)$$

$$F_{to2} = F_2 - F_{dt} = \mu \pi d_0 K h_{x2} = \mu \pi d_0 K (h_0 - h_2) \quad (2b)$$

gde su: d_0 - prečnik pripremljena; K - napon tečenja; h_{x1} i h_{x2} - tekuće dužine pripremljena u tačkama 1 i 2, respektivno, h_1 i h_2 - aktuelni hod tiskača u tačkama 1 i 2, respektivno.

Napon tečenja se određuje na osnovu krive tečenja za dati materijal i termo-mehaničke faktore. Strogo posmatrano, napon tečenja bi trebalo

* Ring Compression Test -engl., Ringstauchversuch -nem.

odrediti na osnovu stepena deformacije koji se odnosi na sabijanje priprema u kontejneru alata za istiskivanje:

$$\varphi = \ln\left(\frac{d_k}{d_0}\right)^2 = \ln\left(\frac{d_0 + \Delta d}{d_0}\right)^2 \quad (3)$$

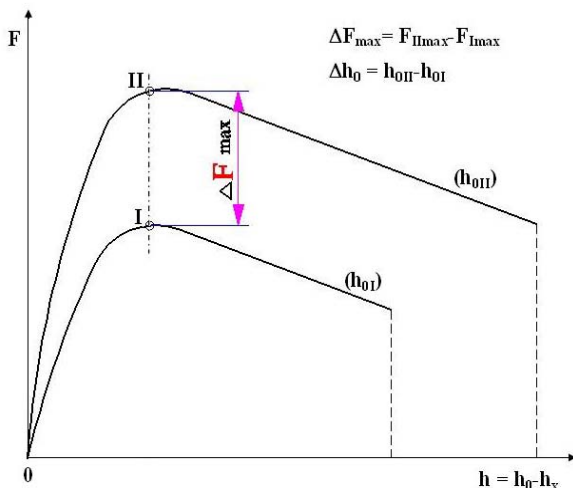
gde su: d_k - prečnik kontejnera; Δd - procep između priprema i kontejnera ($\Delta d = 0.2 \div 0.4$ mm, za istiskivanje u hladnom stanju, $\Delta d = 3 \div 30$ mm, za istiskivanje Al-legura u toplom stanju).

Iz napred navedenih obrazaca lako se dolazi do sledeće formule za određivanje koeficijenta/faktora trenja [12], [13]:

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}} = \frac{F_I - F_2}{\pi d_0 K (h_{x1} - h_{x2})} = \frac{\Delta F}{\pi d_0 K \Delta h} \quad (4a)$$

Druga varijanta (B) predloženog metoda podrazumeva snimanje dva dijagrama sile, sa dva priprema istih prečnika, a različitih dužina ($h_{0II} > h_{0I}$) (Slika 2) [13].

Ukoliko nema bitnih tehnoloških poremećaja ova dva dijagrama bi trebalo da po obliku budu identična. Razlika u veličini maksimalnih sila je upravo posledica različitih sila kontaktnog trenja u kontejneru alata za istiskivanje. Lako se može zaključiti da se ova varijanta predloženog metoda može svesti na prethodnu translacijom donjeg dijagrama sa slike 2. udesno, do poklapanja delova dijagrama koji odgovaraju "stacionarnoj" fazi istiskivanja (tada tačka II postaje tačka 1, a tačka I tačka 2).



Slika 2. Dijagrami sile pri istosmernom istiskivanju dva priprema različite dužine

Prema tome, formula (4a) sada dobija oblik:

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}} = \frac{F_{II \max} - F_{I \max}}{\pi d_0 K (h_{0II} - h_{0I})} = \frac{\Delta F_{\max}}{\pi d_0 K \Delta h_0} \quad (4b)$$

gde su: h_{0I} i h_{0II} - početne dužine prvog i drugog priprema, respektivno.

3. PRIMENA METODA

3.1 Istosmerno istiskivanje u toplom stanju

Kod istosmernog istiskivanja u toplom stanju koriste se praktično svi tehnički metali i legure.

Međutim, daleko najširu primenu ovaj process je našao pri izradi profila od aluminijuma i aluminijumskih legura.

Izrada aluminijumskih profila istosmernim istiskivanjem u tzv. mostnim alatima, zbog prirode samog procesa, obavlja se bez upotrebe maziva [4], [14],[15].

Kako je u pitanju "suvo" trenje, može se očekivati maksimalna veličina sile kontaktnog trenja, kao i koeficijenta trenja ($\mu = 0.577$). Ovakva pretpostavka je praktično i potvrđena primenom metoda slobodnog sabijanja prstena [15].

Na slici 3 je dat dijagram sile dobijen numeričkom simulacijom procesa istosmernog istiskivanja Al-legura u toplom stanju, pri čemu je pretpostavljena maksimalna vrednost faktora trenja ($m=1$) [16]. Primenom obrasca (4a) ova je pretpostavka dobrim delom i potvrđena (Tabela 1).

Kod istosmernog istiskivanja srednje-ugljeničnog čelika u toplom stanju (900 °C), sa mazivom u obliku rastvora grafita, utvrđeni su sledeći podaci [13]:

- a) za $\Delta h_0 = 60-50 = 10$ mm; $\Delta F_{\max} = 502-477 = 25$ kN;
- b) za $\Delta h_0 = 50-40 = 10$ mm; $\Delta F_{\max} = 477-443 = 34$ kN;
- c) za $\Delta h_0 = 40-30 = 10$ mm; $\Delta F_{\max} = 443-370 = 73$ kN.

Kod ovakve diskrepancije maksimalnih sila istiskivanja ni jedan rezultat dobijen primenom obrasca (4b) ne može se smatrati pouzdanim.

3.2 Istosmerno istiskivanje u hladnom stanju

U radu [13] je istraživan faktor trenja u procesu istosmernog istiskivanja čistog aluminijuma u hladnom stanju, bez podmazivanja (Tabela 2). Primenom obrasca (4b) dobijena je vrednost za koeficijent trenja koja je u saglasnosti sa nekim rezultatima drugih autora. Naime, kada se radi o istosmernom istiskivanju u hladnom stanju na koeficijent trenja znatno utiče kvalitet radnih površina alata [5], [9], [17].

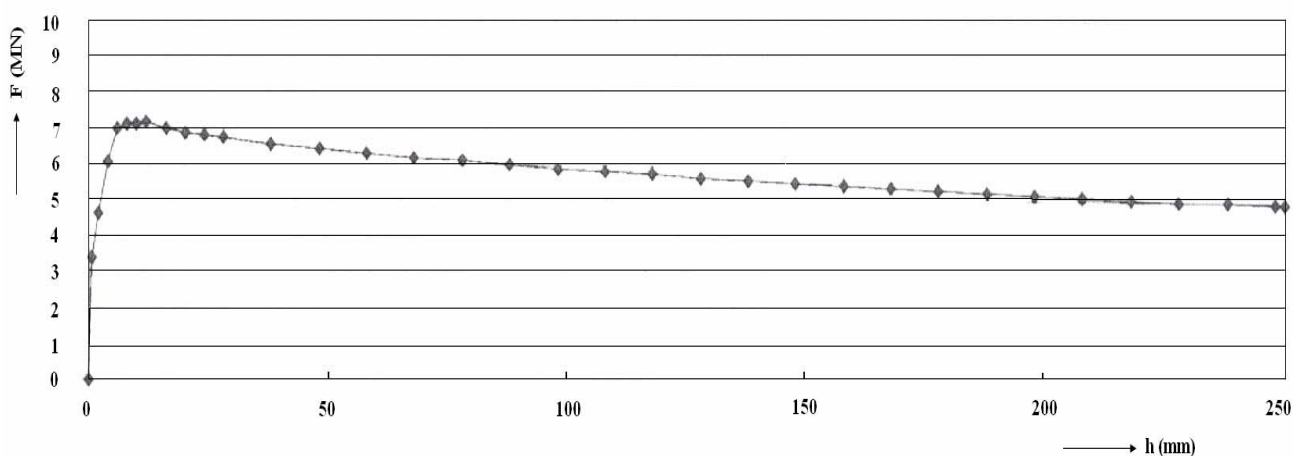
Deo eksperimentalnih istraživanja koji se odnose na istosmerno istiskivanje niskougleničnog čelika u hladnom stanju, sa podmazivanjem, dat je na slici 4 [18]. Primenom obrasca (4b) proračunata vrednost koeficijenta trenja nije u saglasnosti sa rezultatima dobijenim drugim metodima [1], [9], [19].

Tabela 1. Koeficijent/factor trenja za istiskivanje u toplom stanju

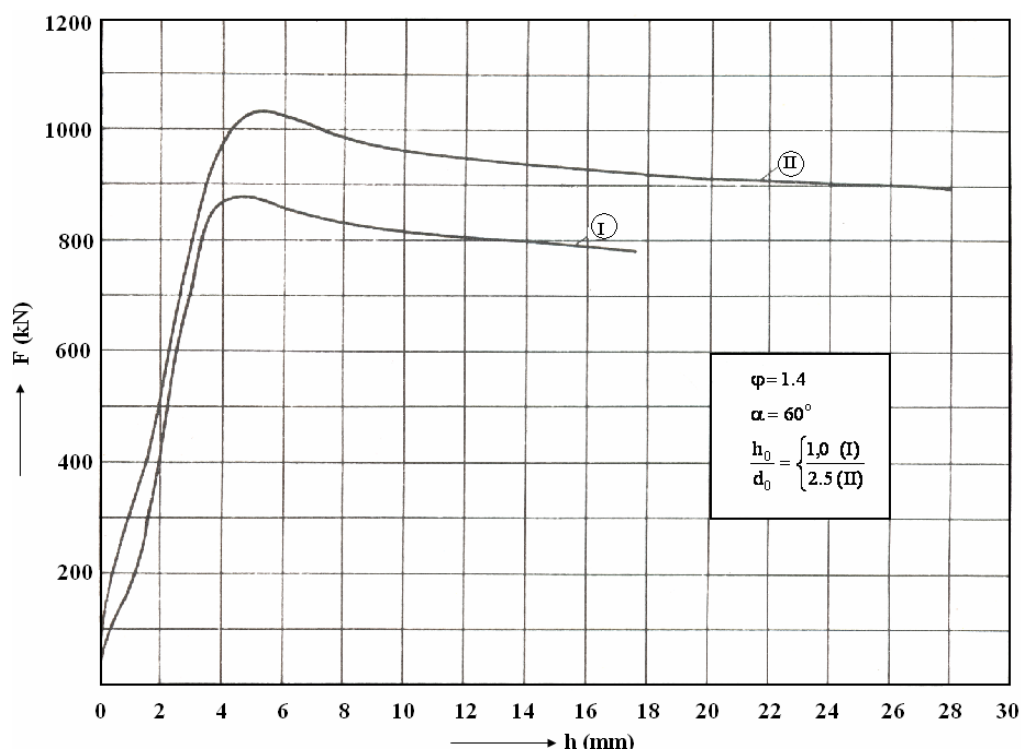
Materijal	Temperatura	Mazivo	Prečnik pripremljena	Napon tečenja	Priraštaj sile	Priraštaj hoda	Koeficijent/factor trenja μ/m
Al-legura (AlSiMgMn)	450 [°C]	“suvo” trenje	146 [mm]	41.5 [N/mm ²]	7130-4900=2113[kN]	250-12=238[mm]	0.488/0.846

Tabela 2. Koeficijent/factor trenja za istiskivanje u hladnom stanju

Materijal	Temperatura	Mazivo	Prečnik pripremljena	Napon tečenja	Najveća sila	Visina pripremljena	Koeficijent/factor trenja μ/m
Aluminijum	Sobna-20 [°C]	“suvo” trenje	40 [mm]	121.4 [N/mm ²]	358 ;283.5 210 [kN]	40; 30; 20 [mm]	(0.418÷0.423)/ (0.724÷0.733)
Čelik (Č.1220)	Sobna-20 [°C]	Cinkfosfat+tehn. sapunica	28 [mm]	317 [N/mm ²]	1040 ; 880 [kN]	70 ; 28 [mm]	0.137/0.237



Slika 3. Dijagram sile pri istosmernom istiskivanju Al-legure u toplom stanju bez podmazivanja



Slika 4. Dijagram sile pri istosmernom istiskivanju niskougličnog čelika u hladnom stanju sa podmazivanjem

4. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran jedan eksperimentalno-analitički metod određivanja koeficijenta trenja pri istosmernom istiskivanju, koji se bazira na pretpostavci o linearnoj zavisnosti sile trenja u kontejneru alata od aktuelne dužine obratka u njemu.

Rezultati sprovedene analize ukazuju da pri istiskivanju aluminijuma i Al-legura u hladnom i toplom stanju koeficijent trenja utvrđen na opisani način ima realne vrednosti.

Kod istiskivanja čelika u hladnom ili toplom stanju to nije slučaj. Postoji značajna razlika između koeficijenta trenja određenog primenom opisanog metoda i koeficijenta trenja određenog na druge načine, za iste ili slične tribološke uslove. Razlozi ovakve diskrepancije mogu biti sledeći: a) promenljivost radijalnog normalnog napona duž izvodnice kontejnera u datom trenutku procesa istiskivanja; b) variranje vrednosti radijalnog normalnog napona na istim mestima na površini kontejnera u pojedinim fazama procesa istiskivanja; c) nepotpuni kontakt obratka i kontejnera tokom procesa istiskivanja; d) (ne)adekvatnost primene Zibelovog zakona trenja kod ovakvih frikcionih parova itd.

Za objašnjenje opisane pojave neophodna su dublja teorijska istraživanja i eksperimentalna verifikacija.

LITERATURA

- [1] N. Bay: The state of the art in cold forging lubrication. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 46, pp. 19-49, 1994.
- [2] G. Ngaile, J. Cochran, D. Stark: Formulation of polymer-based lubricant for metal forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering - Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 221, pp.559-568, 2007.
- [3] J. V. Manegin, A. B. Lenjašin.: Vlijanje steklosmazki na uslove trenja pri gorjačej deformaciji. "Kuznečno - štamповооное производство", No 4, s. 9-12, 1978.
- [4] K.Müller (editor): *Fundamentals of Extrusion Technology*. Giesel Verlag GmbH, Isernhagen, 2004.
- [5] A. N. Levanov i dr.: *Kontaktное trenie v processah obrabotki metallov davleniem*. "Metallurgija", Moskva, 1976.
- [6] V.L. Bereznoy: Multipurpose Friction-Assisted Indirect Extrusion (FAIE) Technology. *Proceedings of the Seventh International Aluminium Extrusion Technology Seminar, Chicago*, pp.177-196, 2000.
- [7] V. Marinković: Nove mogućnosti obrade materijala istiskivanjem u hladnom stanju. *Zbornik radova Mašinskog fakulteta u Nišu*, knjiga 2, s. 211-222, 1980.
- [8] V. Marinković, D. Mišić: *Priroda kontaktnog trenja u procesima obrade materijala deformisanjem i metodi određivanja sila i koeficijenta trenja*. Institut Mašinskog fakulteta u Nišu, s. 25, 1993.
- [9] A. T. Male, M. G. Cockcroft: A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation. *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 93, pp. 38-46, 1964-65.
- [10] M. Burgdorf: Über die Ermittlung des Reibungswertes für Verfahren der Massivumformung durch den Ringstauchversuch. *Industrie-Anzeiger*, 89, No 39, s. 623-629, 1967.
- [11] J. B. Hawkyard, W. Johnson: An Analysis of the Changes in Geometry of a Short Hollow Cylinder During Axial Compression. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 9, pp. 163-182, 1967.
- [12] V.A.Evsratov: *Teorija obrabotki metallov davleniem*. "Viščaja škola", Harkov, 1984.
- [13] M. Bakhshi-Jooybari: A theoretical and experimental study of friction in metal forming by the use of the forward extrusion process. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, pp. 369-374, 2002.
- [14] M. Bauers., G. Sauer, K. Siegert (editors): *Extrusion*, 2nd edition, ASM International, Materials Park, Ohio, 2006.
- [15] T. Marinković, V. Marinković: Koeficijent trenja u procesima obrade deformisanjem Al-legura u toplom stanju. "IMK-14", god.VII, No 1/2, s.13-18, 2001.
- [16] L. Donati, et al.: Extrusion Benchmark 2007 - Benchmark Experiments: Study on Material Flow Extrusion of a Flat Die. *Proceedings of the Ninth International Aluminium Technology Seminar ET'08, Orlando*, 2008.
- [17] V. S. Karpov., G. A. Okolovič, A .S. Vražkin: Ocenka frikcionih svojstv par trenija harakternih dlja holodnoj objemnoj šampovki. "Obrabotka metallov davleniem", Vip.11, s. 122-125, 1984.
- [18] V.Marinković: Analitičko - eksperimentalni metod određivanja radnog pritiska istosmernog istiskivanja čelika u hladnom stanju. *SIMOD*, god. III, br. 2, s. 55-73, 1977.
- [19] V. Marinković: Primena metoda sabijanja prstena za određivanje koeficijenta trenja u procesima zapreminskog deformisanja. "Tribologija u industriji", Vol.18, No 4, s.135-142. 1996.

DETERMINATION OF THE FRICTION COEFFICIENT IN EXTRUSION PROCESSES

Abstract: *The calculation, modeling and simulation of any metal forming process requires the knowledge of friction forces, that is, friction coefficients. In order to determine friction forces and/or friction coefficients, numerous experimental-analytical methods (tests) have been developed. In the processes of bulk metal forming, the most popular and the most frequently applied method is that of the free ring compression. When it comes to the complex metal forming processes, a simple test of ring compression does not fully represent stress/strain relations; neither does it represent the given tribological conditions. That is why it is considered more reliable to use concrete metal forming processes in order to determine friction coefficients since, in this way, the real forming conditions and all the friction surfaces of the tool are comprised. The paper deals with the process of forward extrusion in cold and warm states. The friction coefficient is analytically determined on the basis of the known (recorded) diagram of the extrusion force. Two variants of the selected methods are discussed. In the case of the warm forward extrusion the expected results are obtained. As for the cold forward extrusion, it is noticed that the friction coefficients obtained by the applied method and by the standard ring compression test are considerably different.*

Key words: *friction coefficient, bulk metal forming, forward extrusion process, ring compression test*