



Society of Production
Engineering

SPMS 2018

37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

ICPE-S 2018

37th International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

MODEL KLIZANJA OBODA LIMA IZMEĐU RAVNIH KONTAKTNIH POVRŠINA U PROCESU DUBOKOG IZVLAČENJA PRI PROMENLJIVOM KONTAKTNOM PRITISKU

Srbislav ALEKSANDROVIĆ¹, Milan ĐORĐEVIĆ^{2,*}, Vukić LAZIĆ¹, Ružica R. NIKOLIĆ³, Dušan ARSIĆ¹, Aleksandra PATARIĆ⁴

¹Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, Srbija, omdlab@kg.ac.rs, vlazic@kg.ac.rs, dusan.arsic@fink.rs

²Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Prištini, Kosovska Mitrovica, Srbija,
milan.t.djordjevic@pr.ac.rs

³Istraživački centar Univerziteta u Žilini, Žilina, Slovačka, ruzicarnikolic@yahoo.com

⁴Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina ITNMS, Beograd, Srbija,
a.pataric@itnms.ac.rs

*Corresponding author: milan.t.djordjevic@pr.ac.rs

Apstrakt: Uticaj kontaktnog pritiska u postupcima dubokog izvlačenja je aktuelna istraživačka tema tehnologije oblikovanja limova. U ovom istraživanju razvijen je tribološki model baziran na procesu klizanja trake lima između ravnih kontaktih površina pri promenljivom pritisku za vreme procesa i realizovan je originalni eksperimentalni kompjuterizovani uređaj. Cilj je odrediti u kojoj meri je moguće uticati na trenje, a preko trenja i na proces oblikovanja. Izveden je složeni višefaktorni eksperiment, primenom lima od Al legure, kontaktih elemenata različitih hrapavosti, različitih maziva i promenljivog kontaktnog pritiska za vreme procesa. Pored opisa aparature, u radu je pokazan i način određivanja teorijskih zavisnosti pritiska. Na osnovu unapred zadatih, teorijskih promena pritiska za svaki od navedenih uslova dobijen je realni pritisak u kontaktu. Na osnovu toga je moguće odrediti uticaj triboloških faktora na stvarni pritisak. Dobijeni stvarni pritisak u kontaktu pokazuje pouzdanost eksperimentalne aparature, odnosno stepen prisutnih odstupanja teorijskih zavisnosti pritiska od stvarnih.

Ključne reči: test klizanja lima između ravnih kontaktih površina, duboko izvlačenje, promenljiv kontaktni pritisak, kompjuterizovana eksperimentalna aparatura

1. UVOD

Mogućnosti uticaja na proces dubokog izvlačenja za vreme njegovog trajanja su ograničene. Svode se na uticaje na obodu lima, uglavnom preko kontaktnog pritiska (sile držanja) i delovanjem zateznih rebara na

držaću. U većini dosadašnjih istraživanja iz ove oblasti zadavane su konstantne vrednosti sile držanja ili pritiska držaća u alatu za duboko izvlačenje. Kontinualno zadavanje promenljivog pritiska, preko unapred definisanih funkcija, za vreme procesa klizanja i razvoj odgovarajućeg fizičkog modela predstavlja predmet ovog

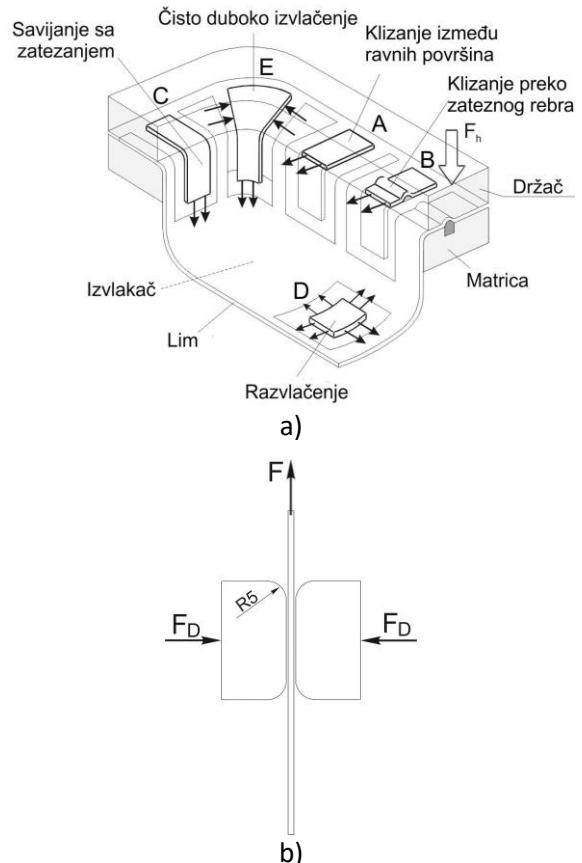
istraživanja sa ciljem da obuhvati uticaj promenljivog pritiska pored ostalih odgovarajućih uticaja (alat, kontaktni uslovi, materijal). Uticaj promenljivog kontaktnog pritiska u procesu dubokog izvlačenja predstavlja aktuelnu temu istraživanja u cilju otkrivanja novih mogućnosti za upravljanje ovim procesom. U tom cilju razvijaju se fizičko-tribološki modeli, od kojih je najzastupljeniji model klizanja trake lima između ravnih površina, o čemu svedoče brojni radovi iz ove oblasti [1, 2, 3, 4, 5]. U pomenutim radovima obrađena je problematika modeliranja procesa dubokog izvlačenja na obodu lima između ravnih kontaktnih površina držača i matrice. Tribološki modeli su formirani u potpuno realnom okruženju: materijal, alat, mašina, kontaktni uslovi, i dr. U većini istraživanja prati se promena koeficijenta trenja i deformacione (vučne) sile variranjem pomenutih realnih uslova u kojima se proces odvija. Primenjuju se alati različite hrapavosti ravnih površina. Kontaktni uslovi se, pored stanja kontaktnih površina alata, ostvaruju primenom više vrsta maziva za duboko izvlačenje i limovima sa raznim prevlakama (Al i čelični limovi). Pored toga, moguće je varirati brzinu klizanja lima [6, 7]. Cilj većine istraživanja je upravljanje izlaznim parametrima procesa dubokog izvlačenja uz težnju da se dobiju što niže vrednosti koeficijenata trenja i deformacionih sila, s jedne strane, i željena geometrija, bez defekata na obodu (nabori) [8, 9, 10].

2. TRIBOLOŠKI MODEL I EKSPERIMENTALNA APARATURA

2.1 Tribološki model klizanja između ravnih kontaktnih površina

Duboko izvlačenje delova složene geometrije prati mnoštvo relevantnih parametara. Zato je ovaj proces jedan od najsloženijih i najzahtevnijih u tehnologiji plastičnog oblikovanja. Za bolje razumevanje ovog procesa primenjuje se princip fizičkog modeliranja karakterističnih zona složenog dela (Sl.1a) koje se koristi kao osnova za potpuno tribološko modeliranje [11]. Klizanje

lima (provlačenje) između ravnih površina držača i matrice (model „A“, Sl.1a) odgovara zonama komada koji nisu izložene tangencijalnom sabijanju, već samo zatezanju u radikalnom pravcu. Sila zatezanja, kao posledica dejstva izvlakača, prenosi se preko zaobljenja ivice matrice na zone ispod držača (Sl.1b).



Slika 1. a) Šema fiz. modeliranja kod izvlačenja delova složene geometrije, b) Šema klizanja između ravnih kontaktnih površina

Vrednosti površinskih pritisaka pri klizanju su niže od napona na granici tečenja i odgovaraju vrednostima ispod držača. Lim klizi između pritisnutih površina, deformisanje je elastično, pošto udužni napon ne prelazi granicu tečenja. Promene na kontaktnim površinama (habanje, nalepljene čestice itd.) mogu da poremete stabilan tok procesa klizanja.

2.2 Eksperimentalna aparatura

Eksperimentalni uređaj, razvijen za potrebe ovog istraživanja, predstavlja simulator za realizaciju i izučavanje fizičkog modela bitnog

segmenta procesa dubokog izvlačenja u potpuno realnim uslovima. Strukturu uređaja u osnovi čine: laboratorijska presa trostrukog dejstva *ERICHSEN 142/12*, sklop hidraulično-mehaničkog modula, poseban hidraulični modul i elektro-elektronski modul.

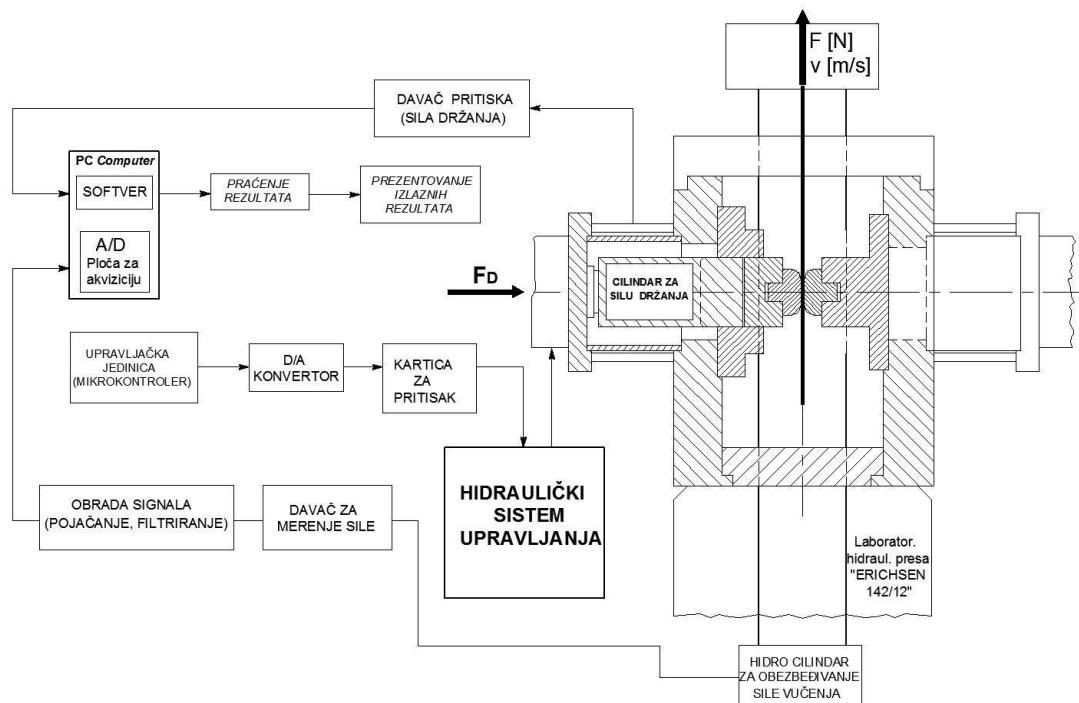
Poseban hidraulični modul se sastoji od hidrauličnog agregata (pumpa, rezervoar, filter, regulacioni ventil i tropoložajni razvodnik sa ručnim upravljanjem) koji obezbeđuje potreban pritisak (Sl. 2). Elektro-elektronskim modulom se obezbeđuje pouzdano napajanje svih komponenata i programsko (PLC) upravljanje hidrauličnog sistema kako bi se ostvarile funkcionalne promene pritiska.

različitim površinama (brušene, nitrirane, polirane i sa TiN prevlakom, Sl. 3b).

Laboratorijska hidraulična presa *ERICHSEN* sa svojim glavnim dejstvom korišćena je za ostvarivanje sile vučenja trake. Glavno dejstvo mašine poseduje senzor koji daje analogni (naponski) signal.

Naponski signal na izlazu ima relativno mali intenzitet, koji je pojačan, filtriran i prilagođen tipu A/D konvertora. A/D konvertor je ugrađen direktno na konektore matične ploče PC računara.

Upravljačka jedinica (mikrokontroler) je najbitniji segment elektro-elektronskog modula jer pomoću ugrađenog softvera pruža



Slika 2. Šema aparature za provlačenje trake lima između ravnih kontaktnih površina

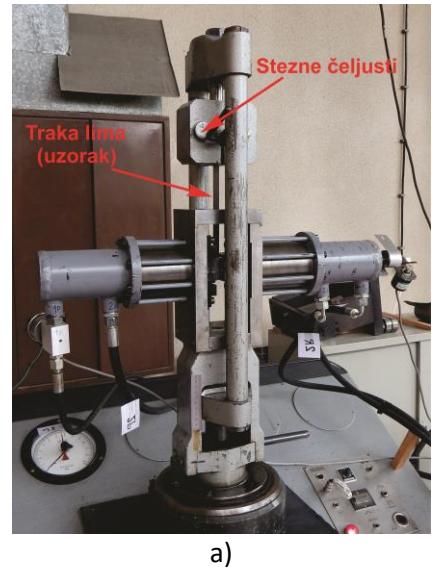
Mehaničko-hidraulični modul (Sl. 3a) je deo uređaja kojim se ostvaruje vučenje epruvete od lima između dva kontaktna elementa. Montiran je na hidrauličnoj presi koja obezbeđuje vučno dejstvo, a pritisak kliznih elemenata (Sl. 3b) ostvaruje se posredstvom hidrauličnih komponenata ovog modula [12].

Blok šema eksperimentalne aparature prikazana je na slici 2. Traka lima je pozicionirana između para kontaktnih elemenata sa ravnim površinama i radijusom od 5 mm (Sl. 1b), koji su izmenljivi i izrađeni sa

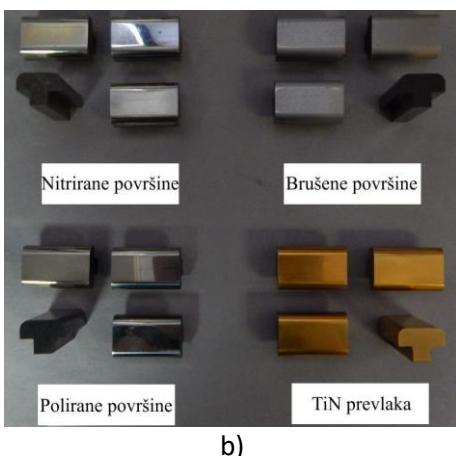
podršku sistemu upravljanja. Preko upravljačke kartice za pritisak generiše upravljačke signale izvršnim elementima hidrauličnog sistema [12]. U memoriju mikrokontrolera učitan je program za šest promenljivih zavisnosti pritiska i dve konstantne vrednosti pritiska (Sl. 2).

Ključni element u posebnom hidrauličnom modulu je naponski proporcionalni ventil. Za određenu vrednost naponskog signala iz upravljačke kartice dobije se određeni protok, odnosno određeni pritisak u cilindru koji

obezbeđuje silu držanja. Ta sila se prenosi na izmenljive kontaktne elemente u hidraulično-mehaničkom delu uređaja koji obezbeđuju držanje epruvete-trake lima. Traka lima je uklještena u čeljusti sa gornje strane nosača (Sl. 3a).



a)



b)

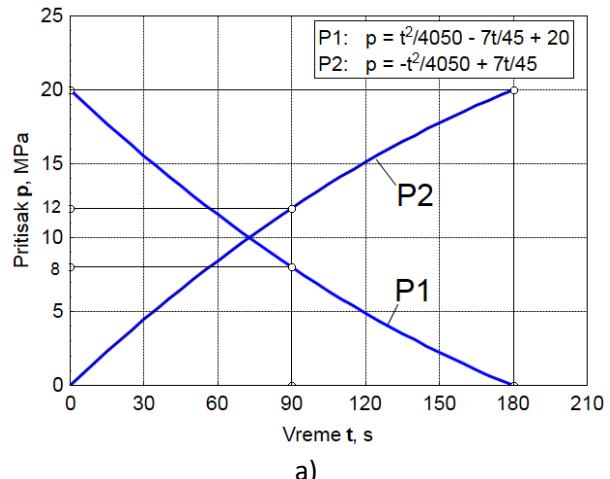
Slika 3. a) Mehaničko-hidraulični deo uređaja, b) Izmenljivi kontaktni elementi

Bitan deo elektro-elektronskog modula je uređaj za merenje pritiska i vučne sile. Davač pritiska postavljen je na hidraulični vod koji napaja cilindar za ostvarivanje sile držanja. Davač meri pritisak oslobođen od svih prethodnih gubitaka koji su nastali od regulacionog ventila do cilindra (Sl. 2).

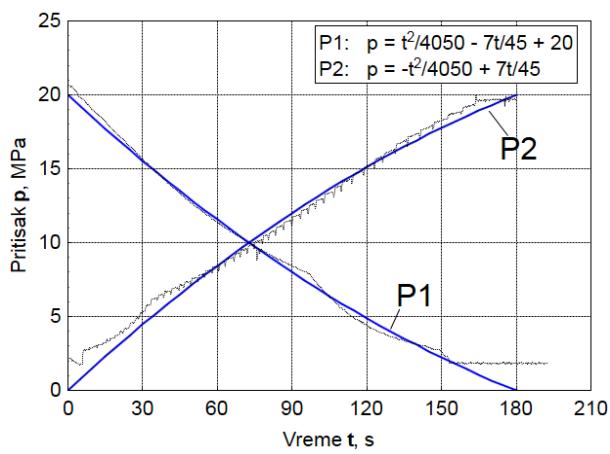
3. PRETHODNO DEFINISANE I REALNO OSTVARENE ZAVISNOSTI PRITISAKA

Za potrebe planiranog eksperimenta, definisano je 6 promenljivih zavisnosti kontaktnog pritiska od vremena. Zavisnosti su

date krivama prikazanim na slikama od 4 do 6. Pomenute krive su označene simbolima P1-P6. Zavisnosti P5 i P6 su linearne, a P1, P2, P3 i P4 su nelinearne. Funkcije su definisane na osnovu empirijskih vrednosti minimalnog i maksimalnog pritiska (0-20 MPa) [13, 14]. Hod klizanja iznosi 60 mm u skladu sa mogućnostima laboratorijske prese [15]. Odabrana je brzina vučenja trake od 20 mm/min, što je omogućavalo rešavanje upravljanja parametrima procesa. Na taj način dobijeno je maksimalno trajanje procesa od 180s. Parabolične kvadratne funkcije su definisane kroz tri tačke u empirijski definisanom okviru 20MPa - 180s. (Sl.4, Sl.5). Formiran je širok raspon funkcija pritiska različitog karaktera: monotono opadajuća (P1), monotono rastuća (P2), kombinovana rastuće-opadajuća (P3), kombinovana opadajuće-rastuća (P4), linearna opadajuća (P5) i linearna rastuća (P6).



a)



b)

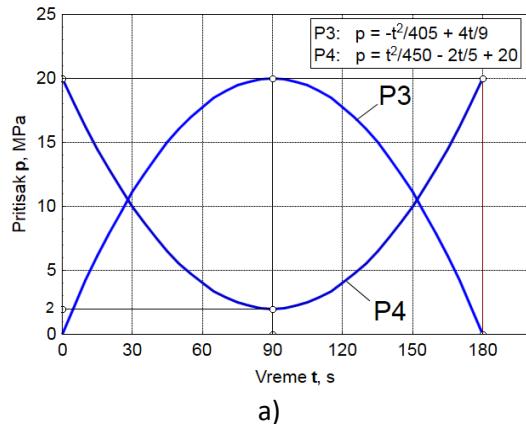
Slika 4. a) Analitički definisane funkcije, b) Uporedni prikaz analitičkih i eksperimentalnih zavisnosti

Na taj način stvorena je mogućnost istraživanja uticaja promenljivog kontaktnog pritiska na vučnu silu, koeficijent trenja i promenu hrapavosti lima simultano sa drugim uticajnim faktorima. Od tih faktora treba pomenuti vrstu materijala lima, tip prevlake na alatu i uticaj različitih maziva u kontaktu. Cilj je doći do odgovora na pitanja:

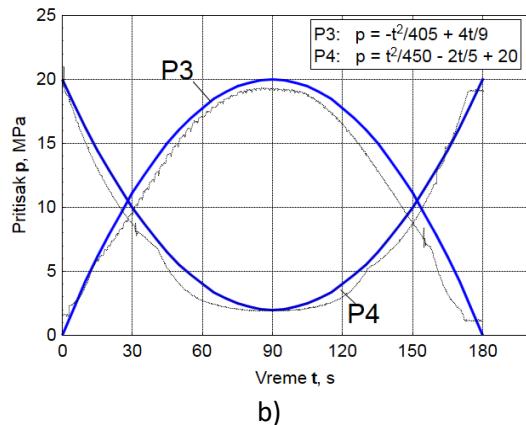
a) Da li je moguće promenom karaktera funkcije kontaktnog pritiska direktno menjati vučnu silu i koeficijent trenja?

b) Koliko drugi uticaji (materijali, prevlake, maziva) mogu da poremete delovanje pritiska i prenošenje karaktera funkcije pritiska na vučnu silu?

c) Kako promenljive funkcije pritiska deluju na hrapavost lima?



a)



b)

Slika 5. a) Analitički definisane funkcije, b) Uporedni prikaz analitičkih i eksperimentalnih zavisnosti

Osnovni oblik kvadratne funkcije pritiska dat je izrazom: $p = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$, gde su a, b i c nepoznate konstante. Za krivu pritiska P1 (Sl. 4a) konstante su određene na sledeći način:

$$p = 20 \text{ MPa} \rightarrow t = 0 \rightarrow c = 20, \quad (1)$$

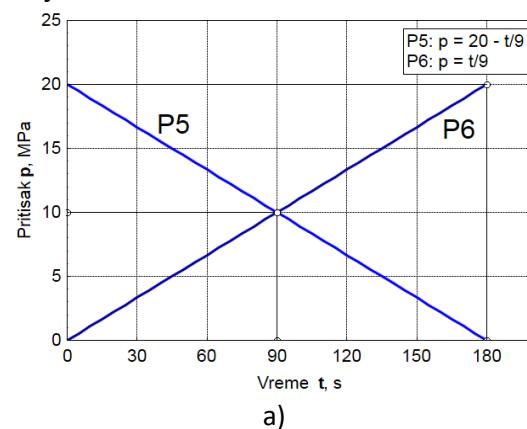
$$p = 0 \text{ MPa} \rightarrow t = 180 \text{ s} \rightarrow 0 = 32400a + 180b + 20, \quad (2)$$

$$p = 8 \text{ MPa} \rightarrow t = 90 \text{ s} \rightarrow 8 = 8100a + 90b + 20. \quad (3)$$

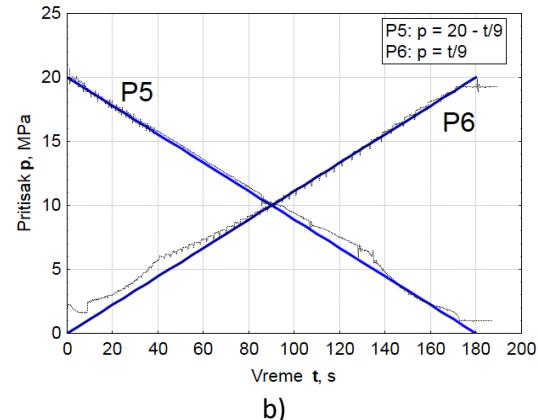
Na osnovu izraza u prethodnom koraku dolazi se do konstanti a, b i c, a time i konačne forme funkcija:

$$a = \frac{1}{4050}; b = -\frac{7}{45}, \quad p = \frac{1}{4050}t^2 - \frac{7}{45}t + 20. \quad (4)$$

Analognim postupkom moguće je doći do analitičkih izraza funkcija pritiska P2, P3 i P4 (Sl.5a i Sl.5b). Definisanje linearnih funkcija P5 i P6 je slično i jednostavno (Sl. 6). Prikazane realne zavisnosti pritiska na Sl.4b, Sl.5b i Sl.6b su ostvarene radi provere, bez aktiviranja hoda vučenja trake.



a)



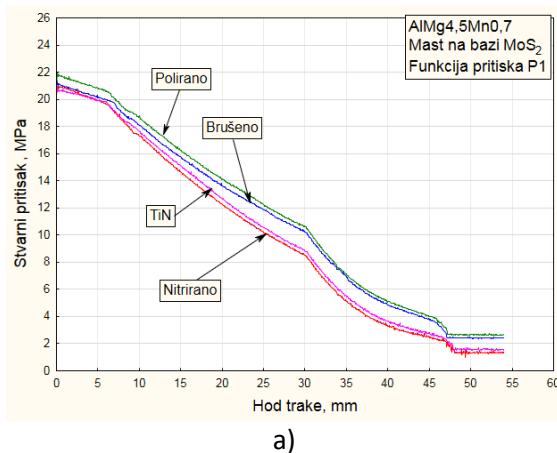
b)

Slika 6. a) Analitički definisane funkcije, b) Uporedni prikaz analitičkih i eksperimentalnih zavisnosti

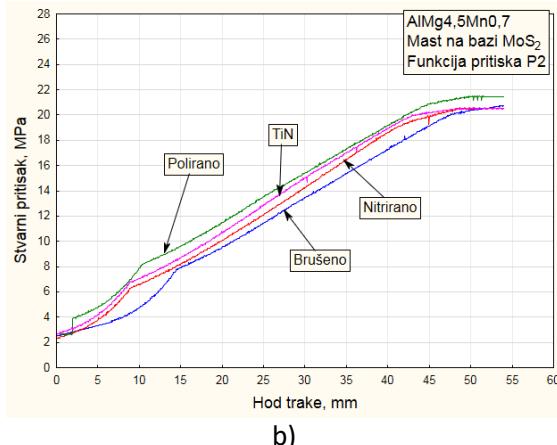
4. EKSPERIMENTALNA REALIZACIJA ZADATIH FUNKCIJA PRITISAKA

Prikazanom aparaturom izveden je složeni višefaktorni eksperiment sa velikim brojem kombinacija triboloških uslova u kontaktu. To podrazumeva različite hrapavosti kontaktnih

površina kliznih elemenata, različite vrste limova i maziva [16, 17, 18] uz simultano zadavanje prethodno definisanih zavisnosti pritiska P1-P4 (Sl.4, Sl.5). Dobijen je veliki broj rezultata uslovjen različitim kombinacijama pomenutih uslova. U radu će biti pokazan jedan deo rezultata koji se odnosi na analizu realno ostvarenih zavisnosti pritiska od hoda na aluminijumskom limu AlMg4.5Mn0.7 (0.9 mm), za dva tipa maziva (ulje za duboko izvlačenje, maziva mast na bazi MoS₂) za zadate funkcije pritiska P1-P4.



a)



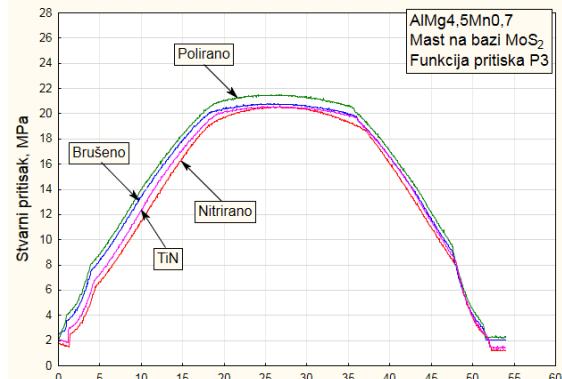
b)

Slika 7. Dobijene zavisnosti pritisaka primenom mazive masti na bazi MoS₂: a) P1, i b) P2

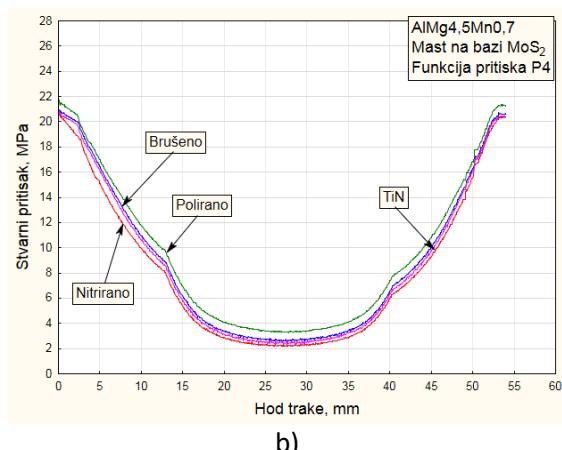
Akcentat je stavljen na proveru pouzdanosti realno dobijenih zavisnosti pritisaka za svaku od analitički zadatih funkcija (P1, P2, P3 i P4, definisanih u odeljku 3 rada). Primenjena su četiri tipa kontaktne površine kliznih elemenata (brušene površine, nitrirane površine, polirane površine i površine sa TiN prevlakom) (Sl. 7, Sl. 8, Sl. 9 i Sl. 10).

Na taj način mogu se izvesti zaključci o radu aparature, tj. u kojoj su meri prisutna odstupanja realno ostvarenih funkcija pritiska

pri pomenutim uslovima u odnosu na teorijske krive pritiska. Pored toga, moguće je odrediti koliki je uticaj triboloških uslova na realno ostvareni pritisak.



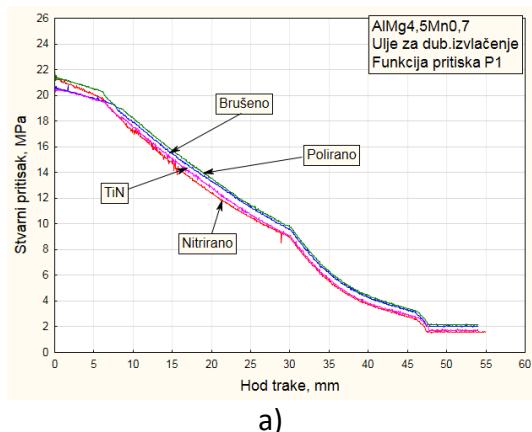
a)



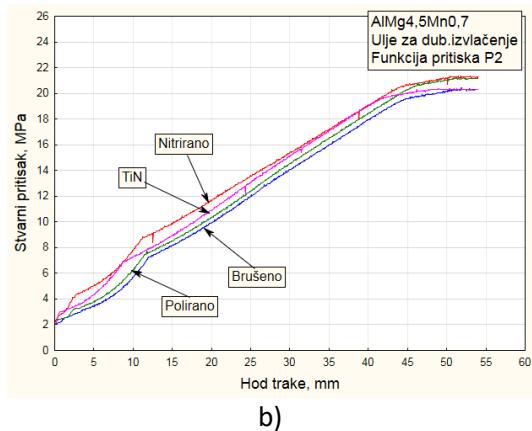
b)

Slika 8. Dobijene zavisnosti pritisaka primenom mazive masti na bazi MoS₂: a) P3, i b) P4

Krive realno ostvarenog pritiska sa malim odstupanjima prate zadate analitičke zavisnosti kako za slučaj intenzivnijeg trenja (podmazivanje uljem) tako i za slučaj manjeg trenja (primena mazive masti na bazi molibden-disulfida). Uticaj tipa kontaktne površine kliznih elemenata na stvarni pritisak je minimalan. Poklapanje krivih je naročito izraženo za slučaj funkcije P4 pri podmazivanju mašću na bazi MoS₂ (Sl. 8b), a takođe i kod funkcije P1 (ulje za duboko izvlačenje, Sl. 9a). Manje odstupanje krivih primećeno je kod dijagrama na slici 9b i 10a, što se može pripisati nešto većoj hravavosti nitrirane površine i pojavi lepljenja čestica materijala lima na alat što je posledica dugotrajnog ispitivanja. Odstupanja su relativno mala i nalaze se u prihvatljivim granicama.

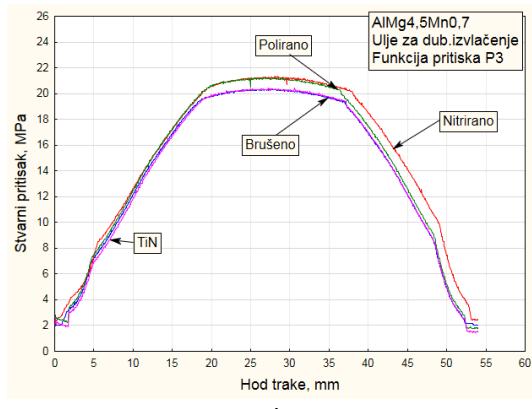


a)

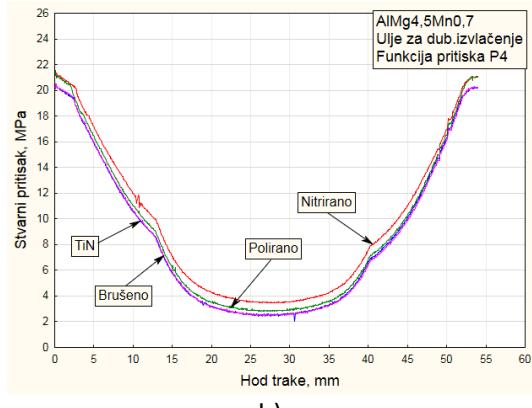


b)

Slika 9. Dobijene zavisnosti pritisaka primenom ulja za duboko izvlačenje: a) P1, i b) P2



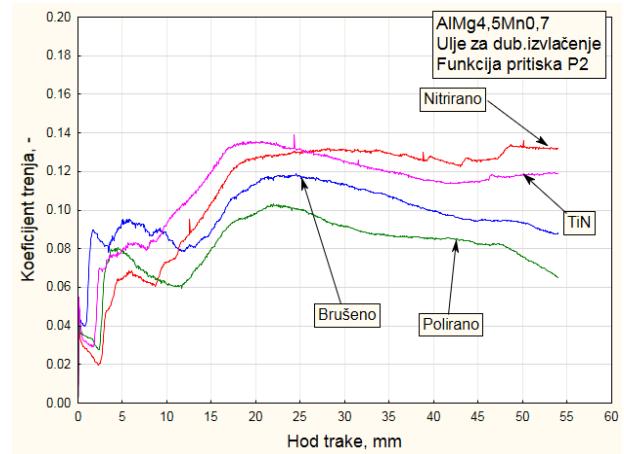
a)



b)

Slika 10. Dobijene zavisnosti pritisaka primenom ulja za duboko izvlačenje: a) P3, i b) P4

Funkcije promenljivih kontaktnih pritisaka primenjene na izračunavanje koeficijenta trenja biće date u nekom od narednih istraživanja. Jedan primer promene koeficijenata trenja biće prikazan na slici 11.



Slika 11. Dobijene zavisnosti koeficijenta trenja primenom funkcije pritiska P3 i ulja za duboko izvlačenje

ZAKLJUČAK

U radu je opisana originalna eksperimentalna aparatura razvijena za realizaciju fizičkog modela izučavanja ponašanja lima na obodu pri dubokom izvlačenju. Prikazani rezultati svedoče da se odgovarajućim izborom funkcionalne zavisnosti kontaktnog pritiska i triboloških uslova može uspešno uticati na klizanje lima na obodu u procesu dubokog izvlačenja. Na taj način se doprinosi boljem razumevanju ponašanja materijala na obodu lima i minimiziranju mnogih problema koji prate ovaj proces u realnim proizvodnim uslovima. Zaključci izvedeni iz ovog istraživanja se mogu sažeti na sledeći način:

- Aparatura je u potpunosti funkcionalna i veoma uspešno realizuje zadate matematičke funkcije pritisaka, što je pokazano dijagramima realno dobijenih zavisnosti pritisaka (Sl.7, Sl.8, Sl.9, i Sl.10). Ponovljivost rezultata je veoma dobra i prisutna su minimalna odstupanja teorijskih funkcija pritiska u odnosu na realne zavisnosti (Sl. 4, Sl. 5, i Sl. 6);
- Uticaj vrste maziva i stanja kontaktnih površina na stvarno izmereni pritisak je

- zanemarljiv. Variranje pomenutih triboloških uslova bi dovelo do različitih zavisnosti vučne sile i koeficijenta trenja, što otvara prostor za dalja istraživanja i primenu ove aparature u te svrhe;
- c) Realizacija ove eksperimentalne aparature i ostvarenih rezultata ima širi značaj kao alternativni pristup u jednoj oblasti savremene tehnologije oblikovanja tankih limova. Uz odgovarajuće izmene u mehaničkom delu aparature, kao i u sistemu upravljanja, moguće je istraživati i druge uticaje, na pr. uticaj zateznih rebara na obodu;
 - d) U narednim istraživanjima planirano je korišćenje različitih materijala, kao što su čelični limovi povišene jačine, nerđajući čelični limovi itd.

ZAHVALNOST

Istraživanja predstavljena u ovom radu delimično su finansirana od strane Ministarstva obrazovanja, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije kroz projekte TR34002 i ON174004.

LITERATURA

- [1] L. Fratini, S. Lo Casto, E. Lo Valvo: A technical note on an experimental device to measure friction coefficient in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, pp. 16-21, 2006.
- [2] E. D. Szakaly, J. G. Lenard: The effect of process and material parameters on the coefficient of friction in the flat-die test, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 868-876, 2010.
- [3] L. Figueiredo, A. Ramalho, M. C. Oliveira, L. F. Menezes: Experimental study of friction in sheet metal forming, *Wear*, Vol. 271, pp. 1651-1657, 2011.
- [4] J. Coello, V. Miguel, A. Martinez, F. J. Avellaneda, A. Calatayud: Friction behavior evaluation of an EBT zinc-coated trip 700 steel sheet through flat friction tests, *Wear*, Vol. 305, pp. 129-139, 2013.
- [5] A. Yanagida, A. Azushima: Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 58, pp. 247-250, 2009.
- [6] A. V. Manoylov, M. J. Bryant, H. P. Evans: Dry elasto-plastic contact of nominally flat surfaces, *Tribology International*, Vol. 65, pp. 248-258, 2013.
- [7] J. Kondratuk, P. Kuhn: Tribological investigation on friction and wear behavior of coatings for hot sheet metal forming, *Wear*, Vol. 270, pp. 839-849, 2011.
- [8] A. Ghiotti, S. Bruschi: Tribological behavior of DLC coatings for sheet metal forming tools, *Wear*, Vol. 271, pp. 2454-2458, 2011.
- [9] B. H. Lee, Y. T. Keum, R. H. Wagoner: Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, pp. 60-63, 2002.
- [10] L. Kirkhorn, V. Bushlya, M. Andersson, J. E. Stahl: The influence of tool steel microstructure on friction in sheet metal forming, *Wear*, Vol. 302, pp. 1268-1278, 2013.
- [11] S. Aleksandrović, M. Stefanović, D. Adamović, V. Lazić, M. Babić, R. Nikolic, T. Vujinovic: Variable tribological conditions on the flange and nonmonotonous forming in deep drawing of coated sheets, *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol. 17, No. 2, pp. 165-178, 2011.
- [12] T. Vujinović: *Duboko izvlačenje tankih limova pri upravljanju klizanjem na obodu*, Doktorska disertacija, Fakultet inženjerskih nauka Kragujevac, 2011.
- [13] M. Stefanovic: *Tribology of deep drawing*, monograph, Yugoslav Society for Tribology and Faculty of Mechanical Engineering, Kragujevac, 1994. (In Serbian).
- [14] W. Emmens: *Tribology of flat die contact*, PhD thesis, Netherlands, 1996.
- [15] S. Aleksandrović, M. Babić, B. Nedeljković, T. Vujinović, D. Taranović, V. Lazić, D. Milosavljević: Variable draw bead height and variable contact pressure as tribological influences in sheet metal stripe sliding test, *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol. 18, No. 2, pp. 184-194, 2012.
- [16] M. Djordjević, S. Aleksandrović, V. Lazić, D. Arsić, R. R. Nikolić, B. Hadzima: The variable contact pressure influence on the tensile force in the process of strip sliding in the flat die in ironing, *Materials Engineering - Materialove inžinierstvo*, Vol. 23, No. 2, pp. 74-83, 2016.

- [17] L. Peña-Parás D. Maldonado-Cortés, J. Tahar-Tijerina, P. García-Pineda, G. Tadeo Garza, M. Irigoyen, J. Gutiérrez, D. Sánchez: Extreme pressure properties of nanolubricants for metal-forming applications, Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 68, No. 1, pp. 30-34, 2016.
- [18] J. Mucha, J. Jaworski: The tool surface wear during the silicon steel sheets blanking process, Maintenance and Reliability, Vol. 18, No. 3, pp. 332-342, 2016.

FLAT DIE SLIDING MODEL WITH VARIABLE CONTACT PRESSURE IN DEEP DRAWING PROCESS

Abstract: The influence of contact pressure in deep drawing processes is the current research subject related to sheet processing technology. Within this research, a tribological model was developed based on the flat die sliding process between contact surfaces under variable pressure during the process, and an original experimental computerized device was made for this purpose. Main goal is to evaluate possibility of influencing on friction, and through friction on entire forming process. A complex multi-factor experiment was performed, using an Al alloy and contact elements of varying roughness, various lubricants and variable contact pressure during the process. In addition to the description of the machinery, this paper also presents the way in which theoretical variable contact pressure dependencies were determined. Based on the predefined, theoretical pressure variations for each of the conditions mentioned here, real contact pressure was obtained. Based on this, it was possible to determine the effect of tribological factors on real pressure. Obtained real contact pressure shows the reliability of the experimental machinery, i.e. the degree of present deviations of theoretical pressure.

Keywords: flat-die test, deep drawing, tribological model, variable contact pressure, computerized experimental apparatus