

KONCEPT EKOLOŠKIH TEHNOLOGIJA PLASTIČNOG OBLIKOVANJA METALA U RAZVOJU SAVREMENIH PROIZVODNIH SISTEMA

Tomislav Vujinović | docent, Apeiron Univerzitet, Banja Luka

Milentije Stefanović | red. prof., Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Dragan Adamović | red. prof., Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Rezime: Tehnologije plastičnog oblikovanja (TPO), u savremenoj industrijskoj proizvodnji dominira u odnosu na ostale tehnologije, prije svega u industrijski razvijenim zemljama. U cilju zaštite kako ograničenih resursa tako i zaštiti čovjekove okoline, neminovno je usaglašavanje ove tehnologije sa savremenim zahtjevima uvođenja tzv. "čistih" proizvodnih postupaka i tehnologija. U ovom radu dat je savremeni pristup modeliranja sistema TPO sa posebnim osvrtom na tehnologije oblikovanja na završnu formu (Net shape forming, NSF) koje omogućavaju uštedu u materijalu i ekološki su prihvatljive. Osim ekoloških aspekata u oblasti TPO, ukazano je na značaj izbora sredstava za podmazivanje kako sa tehnološkog tako i sa ekološkog stanovišta.

Takođe se, pored navedenih pregleda izučavanja u ovoj oblasti, navode i rezultati sopstvenih istraživanja, sa preporukama za korišćenje ekoloških komponenti obradnih procesa, u različitim postupcima TPO - pri hladnom kovanju, preradi limova i sl.

Ključne riječi: tehnologija plastičnog oblikovanja (TPO), net shape forming (NSF), ekotribologija

UVOD

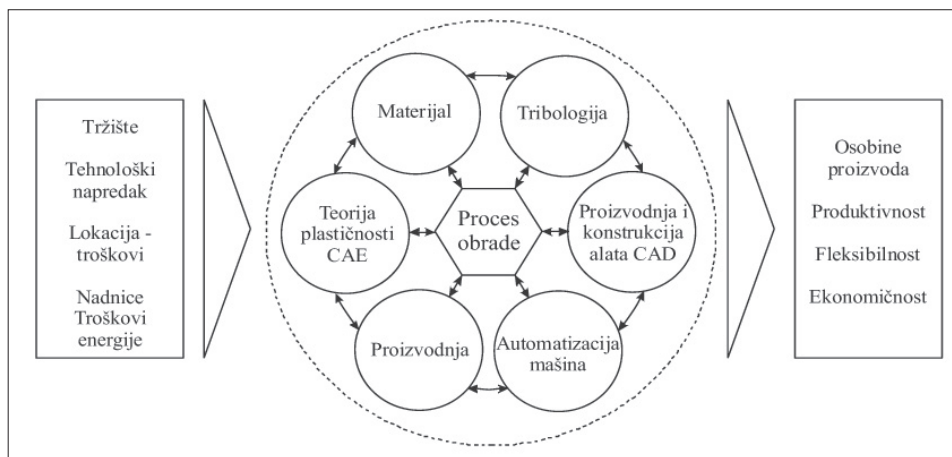
Sa industrijskog aspekta, dvadeseti vijek se može okarakterisati kao period masovne proizvodnje i visoke potrošnje. Prirodni resursi, formirani stotinama miliona godina ubrzano se troše. Posledice su poznate - uništenje ozonskog omotača, globalno zagrijavanje i poremećaji u eko sistemima na različitim nivoima. Smatra se da se ovaj novi vijek mora učiniti vijekom zaštite okoline.

Proizvodne tehnologije, a posebno postupci plastičnog oblikovanja metala (TPO), poslednjih decenija doživljavaju buran razvoj. Osnovne karakteristike TPO su: razvoj postupaka numeričko-fizičkog modeliranja procesa oblikovanja-tečenja metala, definisanje naponsko-deformacionih polja i sl., u cilju optimizacije parametara obrade, primjena sistema Computer-aided Design (CAD/CAM) za projektovanje i izradu alata, razvoj i primjena veštačke inteligencije i eksperntnih sistema u osvajanju procesa obrade i konstrukcije alata, razvoj različitih postupaka, alata i mašina za dijelove koji se ne obrađuju naknadano ("Net Shape Forming" - NSF obrada) itd.

Generalno, TPO se ne može realizovati kroz individualne nezavisne mjere, već jedino kroz dobro koordinisan sistem odlučivanja u okviru slijedećih aktivnosti [1]:

- strateškim pomjeranjem od empirijskih ka naučnim saznanjima (korišćenje *know-how* visoko kvalifikovanih stručnjaka);
- specifičnom aplikacijom CA tehnologija za konstrukciju dijelova, simulaciju, vođenje i upravljanje obradnog procesa;
- selekcijom materijala koji su razvijani za određene aplikacije, sa optimalnim finalnim karakteristikama materijala;
- korišćenjem visoko-preciznih tehnologija izrade alata;
- korišćenjem naprednih mašina u TPO;
- razvojem kvalitetne poslovne politike preduzeća.

Savremeni model sistema TPO karakteriše sinergijski efekt između komponenta i elemenata sistema, prema sl.1.



Slika1. Struktura modela sistema TPO [1]

Centralni dio sistema, obrada u užem smislu (geometrija komada i alata i odgovarajuća kinematika) je povezana sa više modula, raspoređenih oko jezgra procesa. To su: fundamentalni dio teorije plastičnosti (uključuje analizu procesa i projektovanje - metod konačnih elemenata), tehnologija materijala, tribologija, tehnologija alata, mašina i automatizacija procesa, okruženje u preduzeću.

Sa ekološkog stanovišta, kao i u drugim tehnologijama, ključna pitanja u oblasti TPO su:

- zaštita raspoloživih resursa i
- smanjenje uticaja na životnu sredinu.

Ova dva glavna pitanja se mogu dalje razložiti na više složenih aktivnosti, koje je neophodno sistemski ugraditi u pojedine elemente industrijskih sistema:

- očuvanje bazičnih resursa i materijala,
- optimalna konstrukcija proizvoda,
- optimalna proizvodnja,
- smanjenje potrošnje energije,
- zaštita čovekove okoline.

Preporuke za optimalnu konstrukciju odnose se na korišćenje obnovljivih i materijala koji se recikliraju, tribološki prihvatljive konstrukcije i materijale; optimalna proizvodnja podrazumijeva automatsko upravljanje, visoku efikasnost i smanjenje potrošnje maziva. Najbolji načini za ostvarivanje zaštite okoline su: korišćenje ekološki prihvatljivih materijala (recikliraju se, lako se odlažu, ne utiču na okolinu ukoliko se ne recikliraju, pri njihovoj proizvodnji se ne generišu štetni otpaci), korišćenje maziva koja manje štetno utiču na okolinu (sprečavanje isticanja, produžavanje vijeka upotrebe maziva, upotreba-recikliranje-odlaganje, upotreba ekološki prihvatljivih maziva).

Prethodno nabrojane aktivnosti moraju biti usklađene sa opštim i pojedinačnim zahtjevima za podizanje energetske efikasnosti u procesima TPO [2].

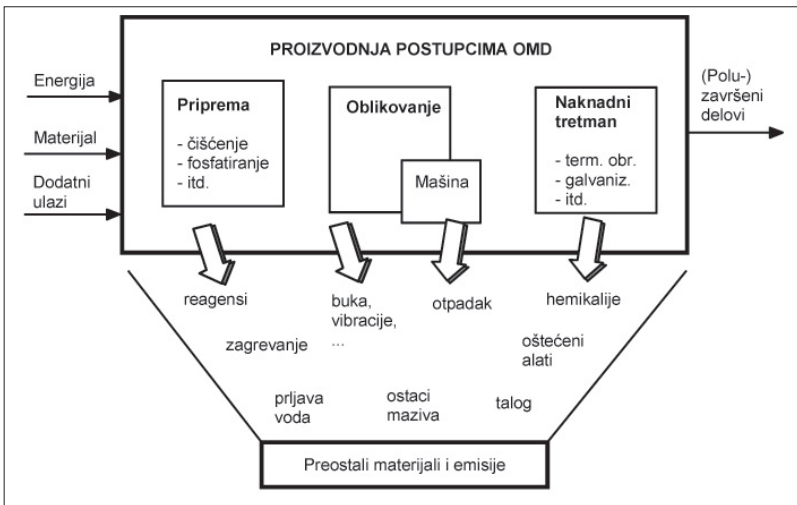
EKOLOŠKI ASPEKTI U OBLASTI TPO

Pojedine faze u osvajanju i eksploataciji novih proizvoda, kao što su konstruisanje, proizvodnja, servisiranje, održavanje i reciklaža se neprekidno ispituju i usavršavaju. Pri masovnoj produkciji, mora se preispitivati svaki detalj sa aspekta zaštite okoline. Na primer, prelaz sa toplog na hladno kovanje značajno štedi energiju. *Net shape* obrada smanjuje gubitke u materijalu.

Tribološki pristup odnosi se na smanjenje zagađenja otpadnih voda i maziva, obezbeđenje prihvatljivog koeficijenta trenja, kako bi se dobila kvalitetna površina komada i umanjilo trošenje alata.

Ne ulazeći u sve detalje kompleksne eko-tribologije [3], na slici 2 pokazani su mogući izvori uticaja na okolinu pri proizvodnji postupcima TPO [4]. Posebne strategije i često visoka ulaganja su neophodna za rešavanje problema otpadnih materija i štetnih emisija, u oblasti odlaganja, recikliranja, zamjene ili potpune eliminacije. Očigledna je složena priroda nastajanja i rješavanja iznijetih problema, u cilju stvaranja tzv. „čistih“ TPO. U prvom koraku, po pravilu se razrješavaju poteškoće koje nastaju pri korišćenju i uklanjanju maziva, bez kojih je najčešće i nemoguće realizovati proizvodnju.

Poznato je da se tribo-uslovi u kontaktu opisuju preko kontaktnog pritiska, relativne brzine klizanja u kontaktu i temperature površine. U tabeli 1 pokazani su rangovi značajnih obradnih uslova pri različitim TPO.



Slika 2. Uticaji na okolinu u postupcima TPO [4]

Tabela 1. Uslovi obrade u različitim postupcima TPO

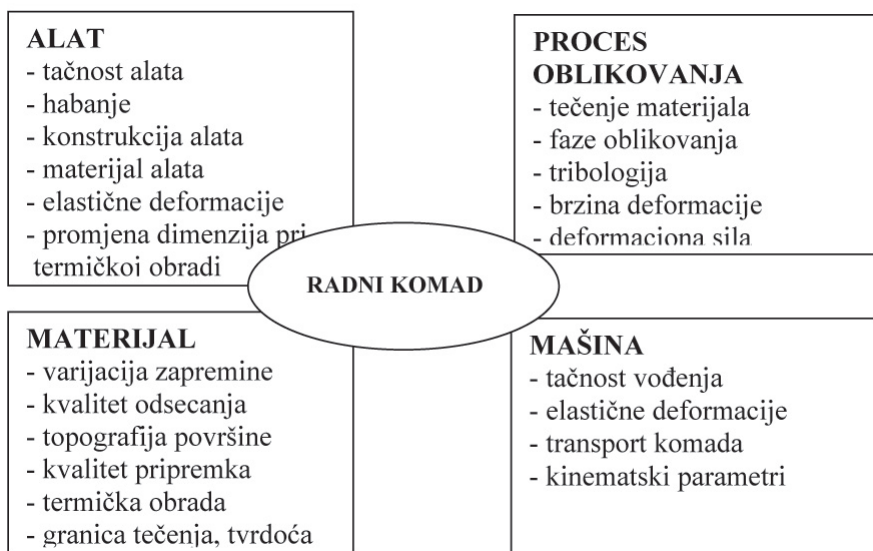
PROCES → USLOVI ↓	Obrada lima	Vučenje, izvlačenje sa stanjenjem	Valjanje, orbitalna obrada	Kovanje, istiskivanje
Faktor pritiska, p^1/Rp^2	0,1-1	1-3	1-3	2-5
Kontaktni pritisak, p , MPa	1-100	100-1000	100-1000	100-3000
Brzina deformacije, s^{-1}	10^{-3} do 10^{-1}	10^{-2} do 10^2	10^{-2} do 10^2	10^{-3} do 10^{-1}
Relativna brzina klizanja	0 do 10^{-2}	10^{-2} do 10^2	10^{-2} do 0	0 do 10^{-1}
Temperatura kont. površine, °C	Sobna do 150	Sobna do 300	Sobna do 150 ili topla obrada	Sobna do 400 ili topla obrada
Promjena površine, %	0,5-1,5	1-2	1-2	1-100

1- Radni pritisak

2- Granica tečenja

U skladu sa obradnim uslovima, odnosno definisanim zahtjevima, razvijena su i vrlo različita maziva za pojedine vrste TPO. Generalno, od maziva se zahtjevaju slijedeće funkcionalne karakteristike: smanjenje površine kontakta metala po metalu, posebno u zonama visokog pritiska, smanjenje habanja alata putem intenzivnog odvođenja toplote, kao i uklanjanje nečistoća, komadića metala i dr., obezbjeđenje željenih otpora trenja, odnosno upravljanje tečenjem metala pri obradi, dobijanje željenog kvaliteta površine komada.

Razvoj metoda NSF može se reći, predstavlja pravi tehnološki pokret u okviru tehnologija plastičnog oblikovanja metala, pri čemu je za uspješnu realizaciju

**Slika 3.** Uticajni parametri na tačnost pri NSF

NSF neophodna integracija znanja iz oblasti novih materijala i proizvodnih tehnologija. Zbog potrebe za izradom dijelova visoke tačnosti, redovno u otežanim tribo-uslovima, potrebno je strogo kontrolisati faktore koji utiču na proces habanja alata. Na slici 3 su pokazani osnovni uticajni faktori na tačnost pri obradi postupcima NSF [1].

RAZVOJ EKOLOŠKI PRIHVATLJIVIH MAZIVA I PRIMJERI ISPITIVANJA MAZIVA

U skladu sa prethodno definisanim zahtjevima, razvijaju se vrlo različita maziva za pojedine vrste tehnologija PO. Generalno, od maziva se zahtevaju slijedeće funkcionalne karakteristike [5]:

- Smanjenje kontakta metala po metalu, posebno u zonama visokog pritiska
- Smanjenje habanja alata putem intenzivnog odvođenja toplote, kao i uklanjanje nečistoća, komadića metala i dr., posebno u uslovima visokoserijske proizvodnje
- Obezbeđenje željenih otpora trenja, odnosno upravljanje tečenjem metala pri obradi
- Dobijanje željenog kvaliteta površine komada.

Zahtev eko-okruženja je ultimativno korišćenje suvih tehnologija ili korišćenje maziva koja postoje u prirodi, ne mijenjaju se u procesu obrade i ne treba ih posebno uklanjati kasnije. Na primjer, voda je vrlo prihvatljivo mazivo.

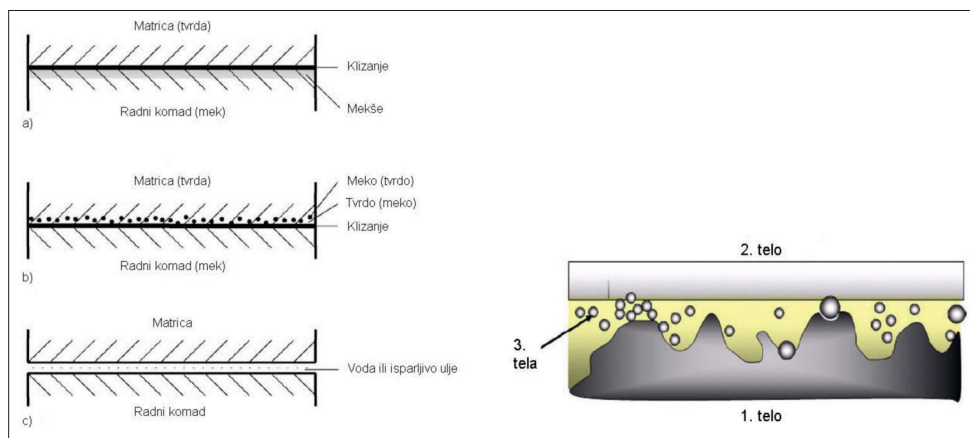
Međutim, u pojedinim postupcima TPO u uslovima visokih kontaktnih pritiska, režimi trenja su veoma nepovoljni, te ekološke TPO ne mogu imati za osnovu realizaciju suvog trenja. Pri hladnoj zapreminskoj obradi, npr. pri istiskivanju, lokalni pritisci dostižu vrijednosti i do 3.000 MPa, te se u ovakvim slučajevima na kontaktnoj površini komada mora formirati tzv. nosač maziva; kod čeličnih materijala je to često na bazi fosfat zinka, $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$. Formiranje ovakvog sloja, i naknadno odmašćivanje površina komada je dobro poznat problem, koji se i poslije svih napora istraživača u ovoj oblasti ne može u potpunosti prevazići .

Na slici 4. su pokazana tri pristupa u realizaciji osnovnih principa „zelenog oblikovanja“ [6].

- na komadu je meka prevlaka koja igra ulogu maziva,
- na alatu je meka prevlaka,
- podmazivanje vodom ili isparljivim uljem.

U oblasti prerade tankih limova, obrada dubokim izvlačenjem zauzima posebno mjesto sa aspekta podmazivanja. U uslovima visokoserijske proizvodnje, kakva je automobilska industrija, pri korišćenju maziva postoje određene poteškoće. Za vrijeme obrade, mazivo se aplicira u zoni kontakta lima i alata, kako bi se povećala obradivost lima. Klasična maziva, koja obezbjeđuju granični režim podmazivanja pri obradi, najčešće su mineralnog porijekla s dodatkom ditiva za ekstremne pritiske (EP). Metalni sapuni koji se formiraju na površini lima omogućavaju dobro podmazivanje uz otežano uklanjanje i zagađenje vode pri odmašćivanju i čišćenju pre bojenja.

Mazivo koje se sve više koristi pri obradi limova i zadovoljava savremene ekološke zahtjeve ima u osnovi bornu kiselinu (H_3BO_3). To je čvrsto mazivo i ima dobre mazive karakteristike i ne zahtijeva posebne troškove odlaganja. Razvoj i upotreba u TPO traje dvadesetak godina. Borna kiselina je uobičajeni termin za ortobornu kiselinu, koja je hidrat oksida bora B_2O_3 . Na atmosferskom pritisku, borna kiselina dehidrira na temperaturi od $170^{\circ}C$ i vraća se u vrlo slabo podmazujuću supstancu-oksidi bora. Za obradu limova na uobičajenoj, sobnoj temperaturi, mazivo zadržava dobre mazive karakteristike.

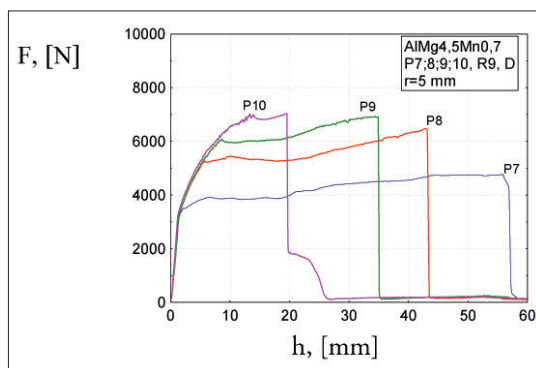


Slika 4. Principi prihvatljivog

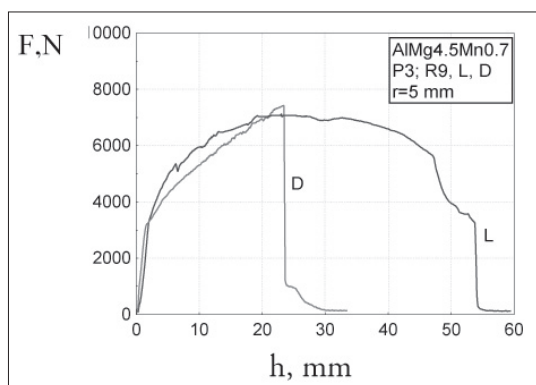
Slika 5. Borna kiselina – treće tijelo pri podmazivanju [6] podmazivanju [7]

Borna kiselina ima formu belog praha, rastvara se u zagrijanoj vodi, stabilna je i lako se rukuje sa njom. Cijena je oko 4,5 \$/kg. Najčešće se koristi u kombinaciji sa repičinim uljem, 5% težinski, sa česticama oko $100 \mu m$. Pri podmazivanju, čestice borne kiseline u biljnom ulju igraju ulogu trećeg tijela, koje razdvaja površine alata i materijala i omogućava mješovito podmazivanje, slika 5 [7].

U Laboratoriji za obradu metala deformisanjem na Fakultetu inženjerskih nauka u Kragujevcu, dugi niz godina, realizuju se istraživanja u oblasti tribologije procesa TPO, posebno u oblasti obrade limova dubokim izvlačenjem [8]. Rezultati ovih istraživanja su publikovani u brojnim naučnim radovima.



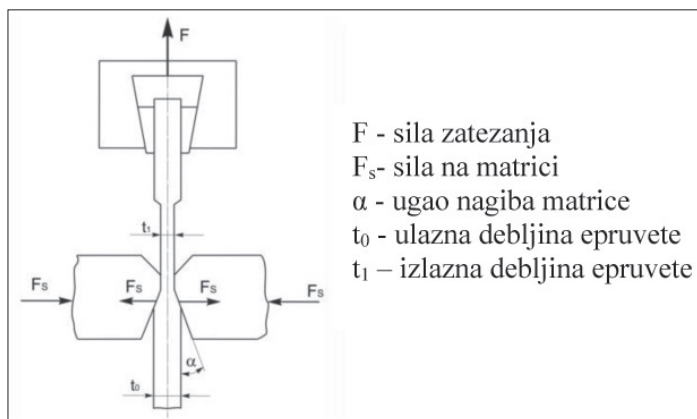
Slika 6. Promjena sile klizanja sa hodom za suve površine (D)



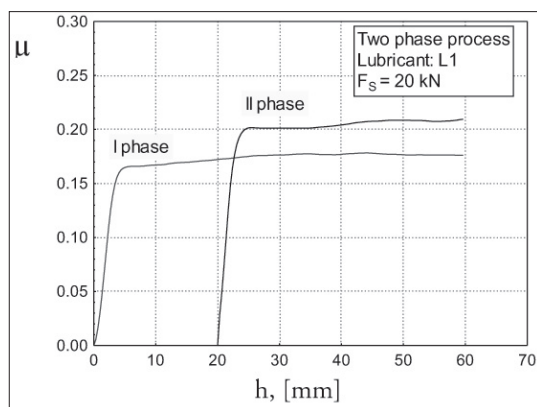
Slika 7. Promjena sile klizanja za suve (D) i podmazane površine (L)

Na slikama 6 i 7 pokazani su rezultati eksperimentalnih ispitivanja na specijalnom uređaju za simulaciju triboloških uslova na obodu komada od lima, u procesu dubokog izvlačenja, pri klizanju lima preko zateznog rebra [9]. Na ovom uređaju se mogu realizovati veoma složena ispitivanja, kojima se simuliraju uslovi promjene pritiska držača lima po unaprijed zadatom zakonu. U uslovima stalnog pritiska i visine rebra, moguće je realizovati klasičan test za ispitivanja maziva u uslovima tzv. niskih pritisaka, kakvi i vladaju na kontaktnim površinama pri dubokom izvlačenju. Na slikama je pokazana promjena sile vučenja-klizanja u zavisnosti od dužine klizanja za različite (nepromjenljive) pritiske od 5, 10, 15 20 MPa. Visina rebra je 6mm, do razaranja ne dolazi samo u slučaju $p_7=5$ MPa [9].

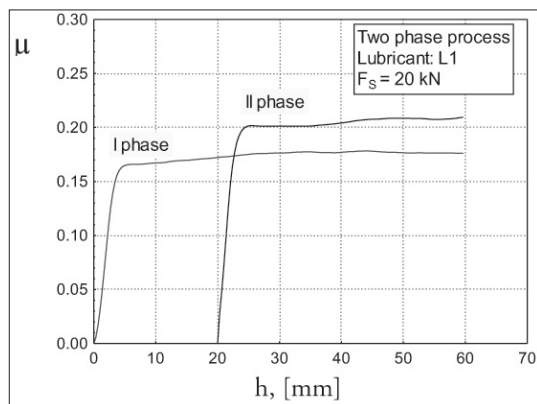
Kao ilustracija mogućeg korišćenja ekoloških maziva, navode se rezultati uporednih ispitivanja klasičnih i novih maziva, koja su realizovana na uređaju za tribo-ispitivanja u uslovima visokih kontaktnih pritiska (simulacija uslova pri hladnom kovanju, vučenju, izvlačenju sa stanjenjem zida i sl.). Različita geometrija kontaktnih površina pritisnih parova (matrica alata), od ravnih površina do kontakta po liniji, upravo omogućava ostvarivanje različitih i visokih lokalnih pritisaka, slika 8. [10].



Slika 8. Model klizanja u uslovima visokih kontaktnih pritisaka



Slika 9. Zavisnost koeficijenta trenja od dužine klizanja za klasično mazivo



Slika 10. Zavisnost koeficijenta trenja od dužine klizanja za ekološko mazivo

Na dijagramima (slike 9 i 10), su pokazani rezultati ispitivanja promjene koeficijenta trenja u zavisnosti od puta klizanja, za različita maziva i iste pritisne sile. Mazivo L2 po sertifikaciji proizvođača pripada grupi ekoloških maziva, nanosi se posebnim postupkom i ne zahtijeva pripremu fosfatizacijom, slika 10. Pri ispitivanju, u laboratorijskim uslovima, pokazalo je bolja svojstva od klasičnog maziva, L1 (mineralno ulje), slika 9.

ZAKLJUČAK

Razvoj tehnologije plastičnog oblikovanja metala podrazumeva i usklađivanje sa savremenim zahtjevima za uvođenje tzv. „čistih“ proizvodnih postupaka, koji se temelje na: očuvanju bazičnih resursa i materijala, optimalnoj konstrukciji proizvoda i proizvodnji, smanjenju potrošnje energije i zaštiti čovekove okoline, čime se i bavi eko-

tribologija. Korišćenje ekološki prihvatljivih maziva je samo jedan od aspekata globalnog pristupa u oblasti TPO.

Napredne TPO, usaglašene sa postupcima NSF, omogućavaju značajnu uštedu u materijalu i ekološki su prihvatljive. Međutim, zbog obrade u uslovima visokih kontaktnih pritiska, neophodno je koristiti kvalitetna maziva, najčešće sa tzv. nosećom prevlakom, čije nanošenje i uklanjanje zahtijeva upotrebu rizičnih supstanci sa aspekta očuvanja životne sredine. U ovakvim slučajevima, reinžinjerinng procesa obrade se mora uskladiti i sa zahtjevima ekološke prirode.

U pojedinim tehnološkim procesima, moguće je koristiti maziva na bazi biljnih ulja sa dodacima prirodnih materijala, koji ne zagađuju okolinu. Korišćenje ovakvih maziva zahtijeva i prilagođavanje proizvodne opreme i pratećih struktura. Npr. pri dubokom izvlačenju čeličnih i Al-limova, veoma uspješno se mineralna ulja sa EP-aditivima mogu zamjeniti mazivima na bazi biljnih ulja sa bornom kiselinom. Ovakva maziva su netoksična i bio-razgrađiva.

LITERATURA

- Bartz, W.J. (2006). Ecotribology: *Environmentally acceptable tribological practices*, Tribology International, Volume 39, Issue 8, pp. 728-733.
- Dordjevic, M., Aleksandrović, S., Lazic, V., Arsic, D., Stefanović, M., i Milosavljevic, D. *Two-phase ironing process in conditions of ecologic and classic lubricants application*, SERBIATRIB '15, 14th International Conference on Tribology, Belgrade, Proceed., pp. 407-413.
- Geiger, M. (1995). *Towards Clean Forming Techniques*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 44, Issue 2, pp. 581-588.
- Lovell, M., Higgs, C.F., Deshmukh, P., & Mobley, A. (2006). *Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 177, Issues 1-3, pp. 87-90.
- Stefanović, M., Adamović, D., Gulišija, Z., Aleksandrović, S., Kraišnik, M., i Mandić, V. *Characteristics and limitations of physical tribo-modelling in deep drawing of thin sheet metal*, SERBIATRIB '15, 14th International Conference on Tribology, Belgrade, Proceed., pp-382-387.
- Stefanović, M., Adamović, D., Gulišija, Z., Stefanović, A., i Milovanović, M. (2013). *Production technology and energy savings: General principles*, XI International Conference- Maintenance and Production Engineering, Budva: KODIP - Proceed, pp. 47-52.
- Stefanović, M., Aleksandrović, S., i Mandić, V. (2005). *Aktuelni trendovi razvoja tehnologije plastičnog oblikovanja metala*, 30. Savetovanje Proizvodnog Mašinstva Srbije i Crne Gore sa međ.

- učešćem, Vrnjačka Banja: Zbornik radova po pozivu (uvodni referati) 57-82.
- Stefanović, M., Aleksandrović, S., Stanojević, M.Đ., i Adamović, D. (2009). *Ekološki prihvatljive tehnologije obrade metala deformisanjem*, Zbornik radova sa XXXIII Savetovanja proizvodnog mašinstva Srbije, Beograd, str. 331-334.
- Vujinović, T. (2012). *Duboko izvlačenje tankih limova pri upravljanju klizanjem na obodu*, Doktorska disertacija, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu.
- Wang, Z.G. (2004). *Tribological approaches for green metal forming*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 151, Issues 1-3, pp. 223-227.

CONCEPT OF ECOLOGICAL METAL FORMING TECHNOLOGIES IN THE DEVELOPMENT OF MODERN PRODUCTION SYSTEMS

Tomislav Vujinović, Milentije Stefanović, Dragan Adamović

Summary: *All production technology and especially the metal forming technologies, due to the rapid development of the possibilities for numerical and physical modeling processes of forming, using systems like CAD / CAM for the design and manufacture of machines and tools, the use of new modern control systems, etc., have experienced rapid development. Development of metal forming technology (MFT) requires harmonization with the modern requirements for the introduction of the so-called. "Clean" manufacturing processes, which are based on: preserving basic resources and materials, optimal product design and production, reduce energy consumption and environmental protection. Using environmentally friendly materials and lubricants is only one aspect of a global approach in the area of MFT.*

The paper specifically discusses advanced TPO, harmonized with manufacturing operations by the principles of so-called shaping the final form (Net shape forming), which enable significant savings in material and environmentally friendly. However, due to the processing in terms of high operating conditions regime, it is necessary to fully provide the optimal impact of basic components of machining systems - machines, tools, materials and tribological conditions. For example, the use of modern lubricants with the so-called solid supporting layer, applying and removing requires the use of substances of concern from the aspect of environmental protection.

Keywords: *tehnology of metal forming, Net Shape Forming (NSF), eko-tribology.*