

Dušan Čurčija, Ilija Mamuzić, Marian Buršak, Jiri Kliber

ISSN 0350-350X

GOMABN 51, 2, 123-147

Izvorni znanstveni rad / Original scientific paper

UTJECAJ POPREČNE HRAPAVOSTI NA PROCES HLADNOG VALJANJA S MAZIVIMA

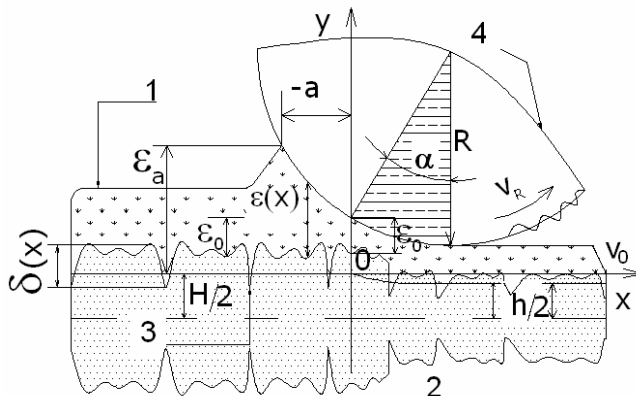
Sažetak

U radu su dana rješenja za proračun visine sloja maziva na ulaznom presjeku zone deformacije u ovisnosti o poprečnoj hrapavosti valjaka i uzdužne trake. Analitička rješenja koja prekrivaju područja svih zahvatnih kutova hladnog valjanja, uzimaju u obzir i utjecaj visine sloja maziva na traci ispred valjaka. Dana su i objašnjenja kako izvršiti proračun visine sloja maziva kada se hrapavost može zanemariti, tj. kada se približava idealno glatkim površinama, i kada se može zanemariti utjecaj visine sloja maziva na traci ispred valjaka. Rješenja koja vrijede za laminarni tok maziva i izotermne uvjete procesa hladnog valjanja s mazivima, koliko se može vidjeti u podacima literature su jedinstvena.

1. Uvod

Za slučaj glatkih površina valjaka i trake matematički je opis predstavljen diferencijalnom jednadžbom (1):

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6\mu(v_0 + v_R)}{\varepsilon^2(x)} - \frac{12\mu Q}{\varepsilon^3(x)} \quad (1)$$



Slika 1: Geometrija tehnološkog procesa

Geometriju kontakta maziva opisuje izraz (2), dužinu mazivoga klina izraz (3), prema slici 1:

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_0 + R \left[\cos \alpha - \sqrt{1 - \left(\sin \alpha - \frac{x}{R} \right)^2} \right] \quad (2)$$

$$a = R \left[\sqrt{1 - \left(\cos \alpha - \frac{\varepsilon_a}{R} + \frac{\varepsilon_0}{R} \right)^2} - \sin \alpha \right] \quad (3)$$

Izraz (2) razvijen je u Mac-Laurinov red i predstavljen je u izrazu (4) do zaključno četvrtoga člana kada zahvatni kutevi teže nuli, tj. za procese dresiranja i hladnoga valjanja s malim zahvatnim kutevima:

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_0 - \alpha x + \frac{x^2}{2R} - \frac{\alpha x^3}{2R^2} + \frac{x^4}{8R^3} \quad (4)$$

Diferencijalna jednadžba(1) u koju se ugrađuje efekt poprečne hrapavosti trake ili uzdužne hrapavosti valjaka poprima sljedeći oblik [1-6], prema slici 1:

$$\left\langle \frac{dp}{dx_0} \right\rangle = 6\mu(v_0 + v_R) \left[\left\langle \frac{1}{\varepsilon^2(x_0)} \right\rangle - \frac{\left\langle \frac{1}{\varepsilon^2_0} \right\rangle}{\left\langle \frac{1}{\varepsilon^3_0} \right\rangle} \left\langle \frac{1}{\varepsilon^3(x_0)} \right\rangle \right] \quad (5)$$

Nominalnoj visini za glatke površine $\varepsilon(x)$, dodaje se slučajna visina mazivoga sloja $\delta(x)$, uvjetovana hrapavosti valjaka i trake:

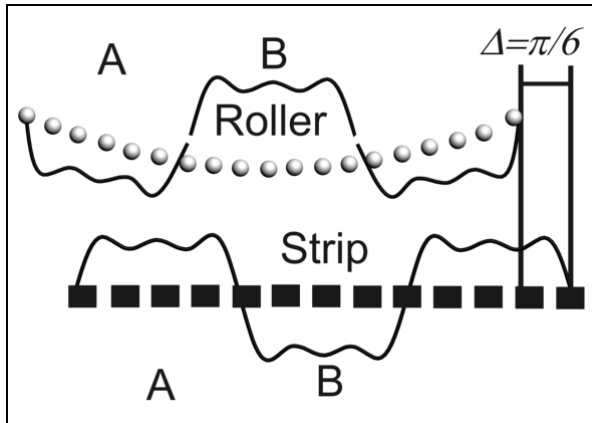
$$\langle \varepsilon(x_0) \rangle = \varepsilon(x) + \delta(x) \quad (6)$$

Ovaj proračun moguće je ostvariti samo numeričkim metodama u matematičkim aplikacijama. U programu mathematica korištena je numerička metoda Monte-Carlo. U teorijskim istraživanjima za model poprečne hrapavosti trake uzeta je sljedeća funkcija „kvadratni val“ koja se razvijala do trećega člana u Fourierovom redu:

$$\delta(x) = \frac{4}{\pi} \left(\sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x \right) R_z \quad (7)$$

$$\mu = \mu_0 \exp(\gamma * p) \quad (8)$$

Slika 2 donosi pomak hrapavosti trake za oko $\pi/6$ ili 30 stupnjeva u odnosu na rotirajuću hrapavost valjaka.

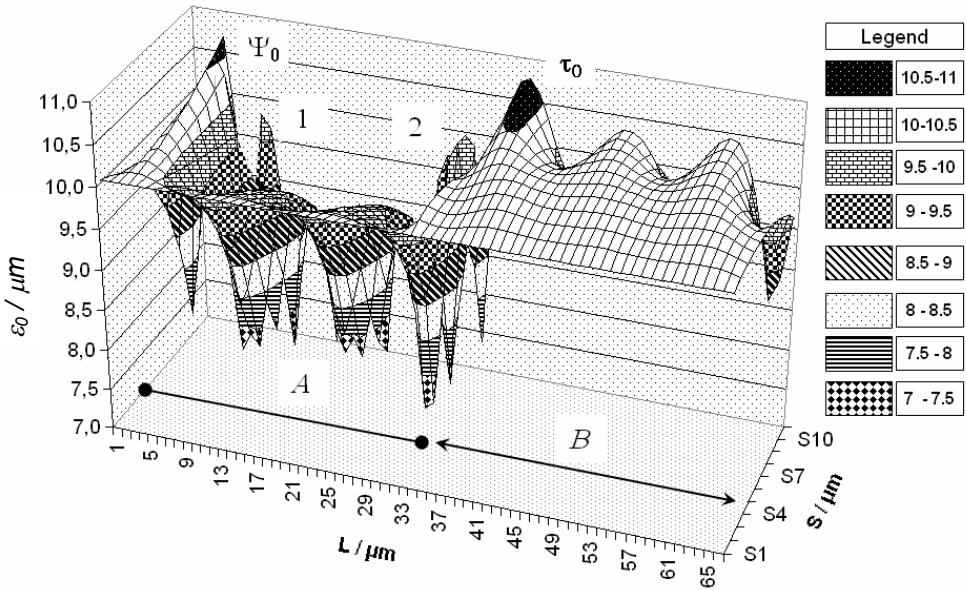


Slika 2: Poprečna hrapavost trake i uzdužna hrapavost valjka s faznim pomakom

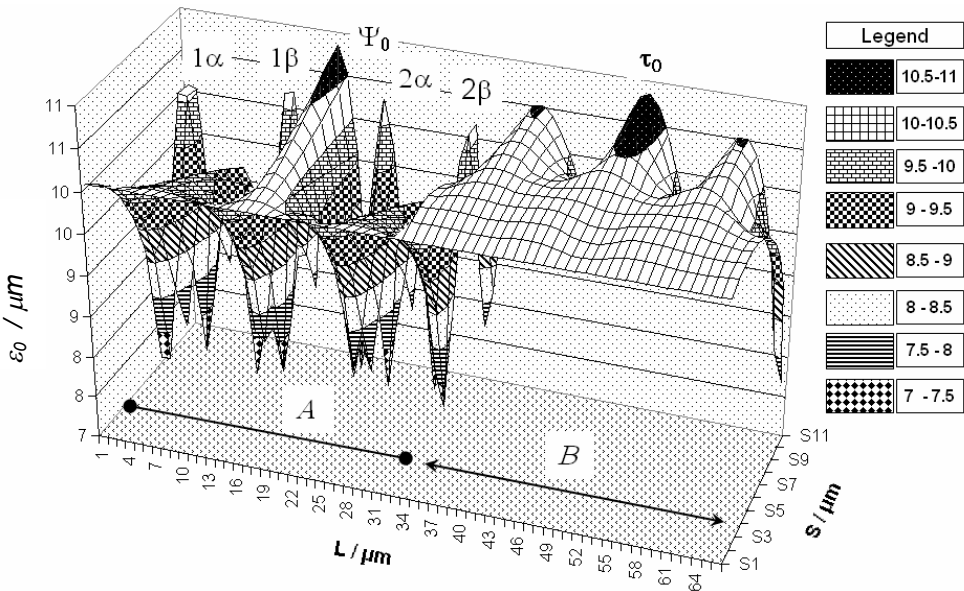
2. Rješenja diferencijalne jednačbe i diskusija rezultata

Slika 3 donosi rješenje diferencijalne jednačbe (5), kada su hrapavosti trake i valjka kongruentne, odnosno kada je na slici 2 fazni pomak $\Delta \approx 0$. Sučeljavanje pozitivnih krila hrapavosti [A—A] doziraju vidno manju visinu mazivoga sloja u području $L \approx \{1-33\}$, dok sučeljavanje negativnih krila hrapavosti [B—B] doprinosi boljoj akumulaciji maziva na ulaznom presjeku zone deformacije, a time i povećanju visine mazivoga sloja u području $L \approx \{33-66\}$. Relativni maksimumi mazivog sloja postižu se u područjima Ψ_0 i τ_0 . Za $L = A$ formiraju se dva maziva otoka [1 i 2]. Za razred hrapavosti, $S = 1$, proračun mazivoga sloja izvodi se za idealno glatke površine gdje teorijski ne postoje krila hrapavosti [A—B]. Pri tome mazivi sloj ima neprekinutu kontinuiranu visinu. Za $S = 11 \mu\text{m}$, hrapavost površina označava razred hrapavosti od $10 \mu\text{m}$. Na krilima [A—A] vidimo isprekidane amorfne mazive slojeve koji se javljaju za $S > 7$ mikrona.

Ovdje je mazivi sloj približan elastohidrodinamičkom podmazivanju jer su površine metala u plastičnom stanju s otežanim dotokom maziva na $0 < L < A$. Pri tome su visine mazivoga sloja od $7-8,5 \mu\text{m}$. Za $S > 7$ amorfni mazivi sloj ukupnjava se u dva maziva otoka [1 i 2] koji na malom nosećem profilu hrapavosti u područjima $L \approx 9$ i $L \approx 29$, može izvoditi otežanu funkciju podmazivanja. Samo formiranje i postojanje ovih mazivih otoka koji nude rješenje diferencijalne jednačbe (5) ostaje fenomen. Nije prihvatljiv efekt matematičara Gibssa kao fenomen koji izranja iz razvoja Fourierovih redova, jer bi u tome slučaju ista pojava morala biti detektirana i na [B—B], odnosno za $33 < L < 66$, kao neki osebujni prikaz.



Slika 3: Rješenja diferencijalne jednačbe kada su hrapavosti valjaka i trake kongruentne



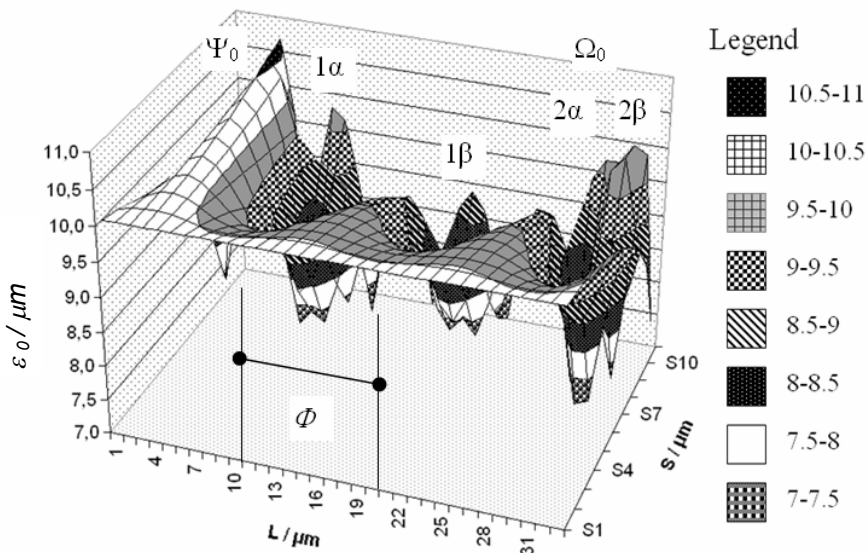
Slika 4: Rješenja diferencijalne jednačbe za slučaj slike 2

Slika 4 sadrži rješenja diferencijalne jednadžbe za iste uvjete tehnološkoga procesa uz fazni pomak hrapavosti trake kako je predstavljen na slici 2. Relativni maksimumi mazivog sloja postignuti u područjima Ψ_0 i τ_0 pomaknuti su uzduž osi L proporcionalno faznom pomaku hrapavosti na slici 2. Pri tome je došlo do dijeljenja mazivih otoka i to uz pretpostavku:

$$1 - \frac{1\alpha}{1\beta} \quad \text{i} \quad 2 - \frac{2\alpha}{2\beta} \quad \text{ili} \quad 1 - \frac{2\alpha}{1\beta} \quad 2 - \frac{1\alpha}{2\beta} \quad \text{Shema (I)}$$

Koja je od ovih pretpostavki realnija, teško je utvrditi preko faznoga pomaka i uz pretpostavku laminarnog toka maziva.

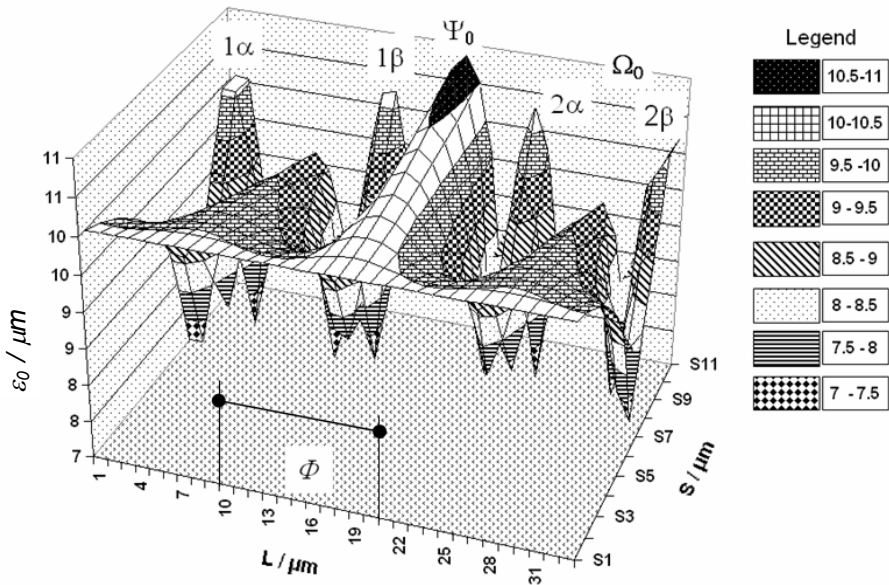
Zbog te dvojbe ponavlja se numerička metoda Monte-Carlo preciznijom nultom aproksimacijom samo na krilima hrapavosti $\Gamma A-A$. Dijagramski prikaz na slici 5. ukazuje da se prvi otok stabilnosti već podijelio u dva otoka bez faznog pomaka $\Delta \approx 0$, dok drugi otok Ω_0 čeka sigurno dijeljenje u jednom dinamičkom modelu.



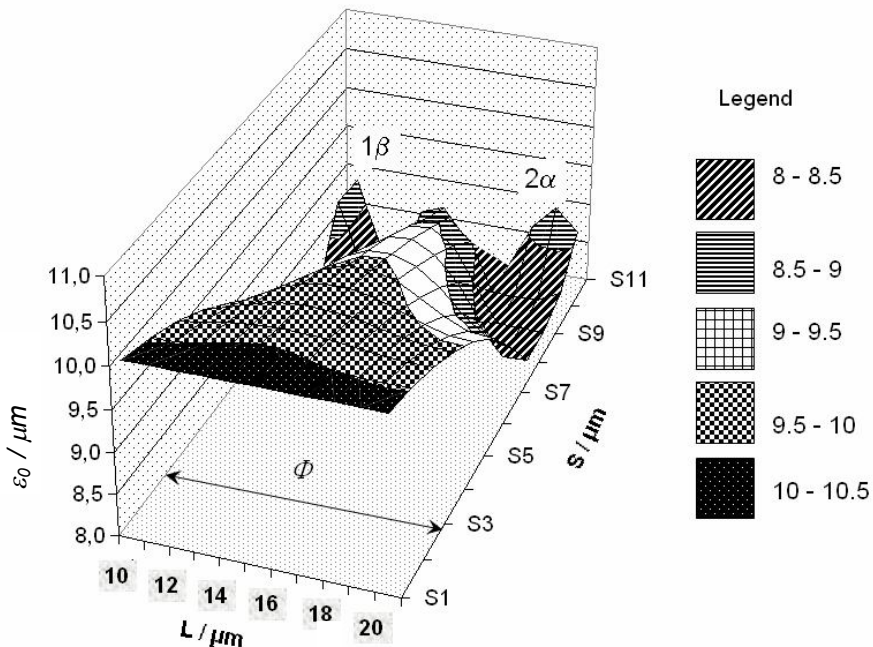
Slika 5: Rafinirani pristup negativnom krilu hrapavosti za uvjete slike 3

Kako će se to odraziti za fazni pomak $\Delta \approx \pi/6$, na slici 6, sada je još teže prognozirati. Ono što je sigurno vidljivo na slici 6 jest činjenica, da će mazivi sloj biti ravnomjernije zastupljen s faznim pomakom uzduž $L \approx \{1-33\}$.

Za razred hrapavosti $S > 7 \mu\text{m}$ stvorena su 4 maziva otoka u amorfnom mazivom sloju na potezu $1 < L < 33$, prema shemi slike 2.



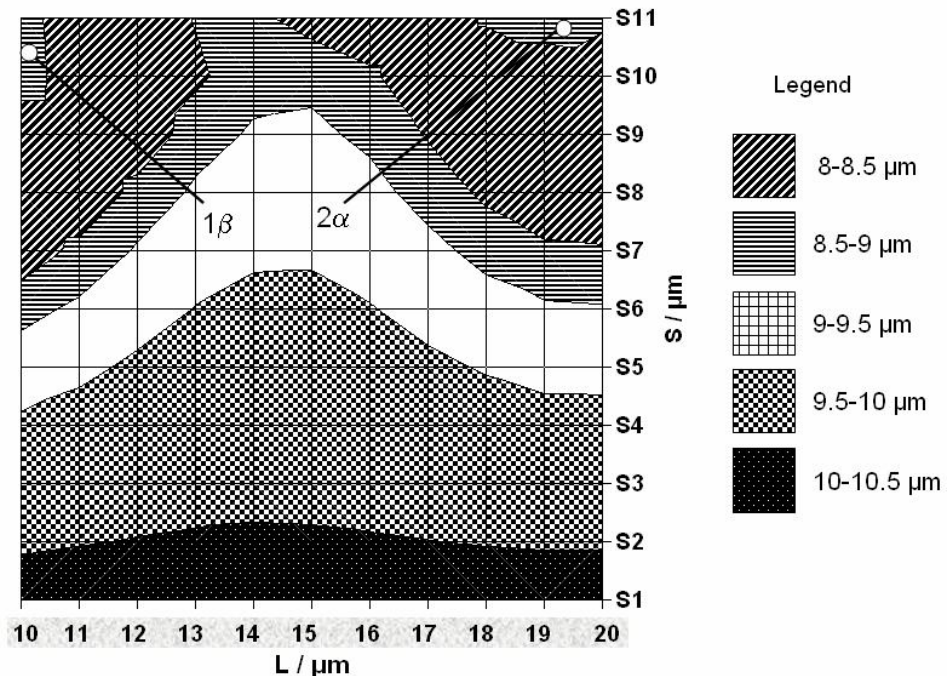
Slika 6: Rafinirani pristup negativnom krilu hrapavosti za fazni pomak



Slika 7: Pojašnjenje negativnog krila hrapavosti u 3D prikazu slike 5

Rafinirani pristup negativnom krilu hrapavosti zuman na slici 5 u inkrementu Φ , predstavljen je na slici 7. Jasno je uočljiva činjenica da se prvi otok podijelio i bez faznoga pomaka hrapavosti.

Novo ponavljanje proračuna za $L = \Phi$, ne lišava nas dvojbi oko pojave relativnoga maksimuma mazivoga sloja, na slici 8. Zbog tih nedoumica tragalo se za približnim analitičkim rješenjima koja bi potvrdila numeričku metodu Monte-Carlo, za neke jednostavne slučajeve, koja je ovdje nagovijestila taj fenomen.



Slika 8: Konturni grafički prikaz negativnog krila hrapavosti u području $L=\Phi$, slike 7

Ova slika na području $L=\Phi$, ne može dati nagovještaj koji bi se mazivi otoci prirodnije preslikali na sliku 6 prema shemi (I).

3. Usporedba približnih analitičkih rješenja s numeričkom metodom Monte-Carlo u prolaznoj točki

Numerička integracija diferencijalne jednadžbe (6), uspoređivana je preko približnih analitičkih rješenja do kojih se moglo doći da bi imala praktično značenje. Ona su sadržana u formulama (9) i (11). Formula (9) predstavlja najjednostavniji oblik analitičkoga rješenja koja ne uzima u obzir visinu mazivoga sloja na traci, tj. $\varepsilon_a \gg \varepsilon_0$. Formula (11) otklanja taj nedostatak uz vidnu složenost koju donosi.

$$315AR^3\alpha^7 - 168R^2\alpha^4 - 1824\delta^2 = 0$$

$$\varepsilon_0 = 0.5R\alpha^2 \dots A = \frac{1 - \exp(-\gamma p_0)}{6\mu\gamma(v_0 + v_R)} \quad (9)$$

$$W1 = \left[\frac{4}{3\alpha^3 \cdot R} - 4 \cdot \frac{R^2}{3 \cdot \left[R \sqrt{1 - \left(\cos(\alpha) - \frac{\varepsilon_a}{R} + \frac{\varepsilon_0}{R} \right)^2} - R \cdot (\sin(\alpha) - \alpha) \right]^3} \right] \quad (10a)$$

$$W2 = \left[\frac{16}{7\alpha^7 \cdot R^3} - 16 \cdot \frac{R^4}{7 \cdot \left[R \sqrt{1 - \left(\cos(\alpha) - \frac{\varepsilon_a}{R} + \frac{\varepsilon_0}{R} \right)^2} - R \cdot (\sin(\alpha) - \alpha) \right]^7} \right] \quad (10b)$$

$$W3 = \frac{(\varepsilon_0)^3 + 3 \cdot \varepsilon_0 \cdot \delta^2}{(\varepsilon_0)^2 + 6 \cdot \delta^2} \quad (10c)$$

$$W4 = \left[\frac{8}{5\alpha^5 \cdot R^2} - 8 \cdot \frac{R^3}{5 \cdot \left[R \sqrt{1 - \left(\cos(\alpha) - \frac{\varepsilon_a}{R} + \frac{\varepsilon_0}{R} \right)^2} - R \cdot (\sin(\alpha) - \alpha) \right]^5} \right] \quad (10d)$$

$$W5 = \left[\frac{32}{9 \cdot \left[R \sqrt{1 - \left(\cos(\alpha) - \frac{\varepsilon_a}{R} + \frac{\varepsilon_0}{R} \right)^2} - R \cdot (\sin(\alpha) - \alpha) \right]^9} \right] \quad (10e)$$

$$W1 + W2 + W3 \cdot (W4 + W5) = 0 \quad (11)$$

Ta komparacija učinjena je na uobičajenom primjeru teorijskih istraživanja[5] i tehnološki parametri su predstavljeni u prilogu. Rezultati proračuna sadržani su u tablici 1. Prema rezultatima tablice 1 gornji primjer predstavlja stabilno podmazivanje, a drugi primjer, trenje nedovoljno navlaženih površina što je česta pojava u praksi.

Drugi primjer blizak je amorfnom mazivom sloju pa možemo zaključiti da numerička metoda Monte-Carlo pravilno interpretira matematičko modeliranje. Međutim, geneza formiranja mazivih otoka time nije riješena, ona je smo naslućena.

Tablica 1: Usporedba metode Monte-Carlo u prolaznoj točki s približnim analitičkim rješenjima

| Parametar | Monte-Carlo (5) | Formula (11) | Formula (9) |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | ε_0 | ε_0 | ε_0 |
| $x = 0$ (ishodišni profil hrapavosti), valjci su glatki $R_Z = 1 \mu\text{m}$ $R_Z \approx 6 \delta$ $\alpha = 0,00918759 \text{ rad}$ $A = 1965512 \text{ m}^{-1}$ $R = 0,35 \text{ m}$ $\varepsilon_a \gg \varepsilon_0$ | $\varepsilon_0 = 14,772 \mu\text{m}$ | $\varepsilon_0 = 14,771 \mu\text{m}$ | $\varepsilon_0 = 14,721 \mu\text{m}$ |
| $x = 0$ (ishodišni profil hrapavosti) $R_Z = 10 \mu\text{m}$ $R_Z \approx 6 \delta$ $\alpha = 0,00840867 \text{ rad}$ $A = 3934525 \text{ m}^{-1}$ $R = 0,25 \text{ m}$ $\varepsilon_a = 0,001 \text{ m}$ | $\varepsilon_0 = 8,755 \mu\text{m}$ | $\varepsilon_0 = 8,776 \mu\text{m}$ | $\varepsilon_0 = 8,838 \mu\text{m}$ |

5. Zaključak

Istraživana hrapavost površina kod procesa dresiranja trake i hladnoga valjanja s mazivima donosi zanimljive poglede. Kod sučeljenja pozitivnih krila hrapavosti valjaka i trake dolazi do otežanog unosa maziva kroz ulazni presjek zone deformacije. Pri tome uz prirodno stvaranje područja nedovoljno namočenih površina mogu se parcijalno stvarati i područja namočena mazivom. Ove subzone ovise o neravninama trake i valjka, a njihova vjerojatnost stvaranja može biti povezana s efektima „ukotrljana okalina“ u površinskom sloju valjanog metala koja također djeluje kao mazivo.

Prilikom faznoga pomaka hrapavosti valjka u odnosu na hrapavost trake, „utisnuti odgarc“ kreću se uzduž promatranoga profila hrapavosti proporcionalno faznim pomacima. Pri tome postoji vjerojatnost dijeljenja „mazivih otoka“ u više stabilnih otoka što praktično gledano pridonosi boljem podmazivanju onoga profila hrapavosti gdje je mazivo u manjku prilikom sučeljavanja pozitivnih krila hrapavosti. Potrebno je naglasiti da kongruencija hrapavosti valjka i trake postoji praktično u milisekundama. Treba istaknuti činjenicu o različitim brzinama gibanja trake i obodne brzine valjaka, koja pod pretpostavkom zupčastoga zahvata ne bi bila moguća. To sasvim sigurno dovodi do proklizavanja valjanoga metala između valjaka kao fenomena koji je teško objasniti, a zasigurno ovisi o različitim zahvatima hrapavosti valjka s hrapavosti trake, kao i drugim parametrima tehnološkog procesa. Dijeljenjem subzona „mazivih otoka u više slojeva“ s različitim faznim pomacima hrapavosti, ravnomjernije dozira mazivo na onim dijelovima trake gdje je otežan dotok maziva, umanjujući vibracije trake koja se dresira ili valja s velikim brzinama. Istraživanje ovoga efekta kojega najavljuju ovdje navedeni teorijski proračuni mora se obaviti u više sukcesivnih etapa dijeljenjem nosećega profila hrapavosti u ekvidistancije i primjenom metode Monte-Carlo jer za takav dinamički pristup, ponuđena analitička rješenja nisu relevantna. Ona samo mogu potvrditi činjenicu da dobro prate proračun u samo jednom dijelu hrapavosti trake kada se ona opisuje s „homogenom hrapavosti“ prosječne neravnine R_z .

Za visine maziva na traci iznad 1 mm predložena približna analitička rješenja mogu zadovoljiti matematički proračun za slučaj glatkih valjaka, približnom formulom (9).

Uzimanjem u obzir hrapavosti trake i valjaka približna analitička rješenja su sadržana u formuli (11). Ona vrijede za ulazni presjek zone deformacije metala u širem dijapazonu zahvatnih kuteva hladnoga valjanja, uz neku izotropnu homogenu hrapavost metala, koja komparirana s metodom Monte-Carlo daje zadovoljavajuću podudarnost.

Popis simbola i pojašnjenje slika

| Simbol | Napomena - Dimenzijska analiza dana je u tablici 2 (Dodatak / Appendix) |
|------------------|---|
| A | Tehnološki parametar po izrazu (11) |
| dp/dx | Gradijent tlaka u mazivom sloju uzduž ose x |
| μ | Dinamička viskoznost maziva za tlak valjaka |
| μ_0 | Dinamička viskoznost maziva za atmosferski tlak |
| γ | Piezokoeffcijent viskoznosti maziva |
| Exp | Eulerov broj (2,718...) |
| Sin x | Sinusna funkcija |
| P | Tlak valjanja |
| P_0 | Atmosferski tlak |
| v_0 | Brzina gibanja trake (slika 1) |
| v_R | Obodna brzina valjaka |
| Q | Potrošnja maziva po perimetru trake |
| $\varepsilon(x)$ | Visina maziva za glatke površine valjaka i trake |
| x, y | Decartove koordinate |

| | |
|------------------------------------|--|
| ε_0 | Visina maziva na ulaznom presjeku zone deformacije (računata) |
| R | Radius valjaka |
| R_0 | $R_0 = R \pm \delta(x)$ |
| R_z | Prosječna visina neravnina |
| α | Kut zahvata |
| -a | Aktivna dužina mazivoga klina (slika 1) |
| ε_a | Visina maziva na traci ispred valjaka |
| $\langle dp/dx_0 \rangle$ | Gradijent tlaka u mazivom sloju uzduž ose x, za hrapave površine |
| $\langle \varepsilon(x_0) \rangle$ | Slučajna visina mazivoga sloja uvjetovana hrapavosti valjaka i trake, koja se pokorava Gaussovom zakonu raspodjele u ishodištu (0,0) |
| $\langle \rangle$ | Operator matematičke nade (očekivanja) |
| $\delta(x)$ | Slučajna visina hrapavosti trake ili valjaka |
| $\varepsilon(x)$ | Nominalna visina mazivoga sloja kada $R_z \rightarrow 0$ (glatke površine) |
| Sin(x) | Razvoj kvadratnoga vala u Fourierov red, formula (7) |
| H/2 | Visina trake prije deformacije (dresiranja) |
| h/2 | Visina trake na izlazu iz zone deformacije |
| Number 1 | Mazivi sloj |
| Number 2 | Hrapava traka |
| Number 3 | Pikovi hrapavosti trake u području $\delta(x)$ |
| Number 4 | Valjak glatki, s pridodanom hrapavosti na izlazu iz zone deformacije |
| Δ | Fazni pomak hrapavosti između trake i valjaka |
| π | Kutna mjera u radianima |
| A | Pozitivna krila hrapavosti trake i valjka |
| B | Negativna krila hrapavosti trake i valjka |
| Roller | Hrapavi valjak |
| Strip | Hrapava traka |
| Kuglice | Valjci bez hrapavosti (govorimo o nominalnoj visini maziva) |
| Kvadrati | Traka bez hrapavosti (govorimo o nominalnoj visini maziva) |
| Number 1 | Prvi otok stabilnosti mazivoga sloja |
| Number 2 | Drugi otok stabilnosti mazivog sloja |
| ε_0 | Visina mazivoga sloja na ulaznom presjeku zone deformacije (slika 1) |
| Ψ_0 | Stabilni mazivi rog na pozitivnim krilima hrapavosti kada je $\Delta \cong 0$ stupnjeva |
| τ_0 | Stabilni mazivi rog na negativnim krilima hrapavosti |
| L | Noseći profil hrapavosti uzduž osi x |
| { 1-33 } | Inkrement po osi L_x |
| [A—A] | Pojašnjenje sučeljavanja krila hrapavosti za sliku 2 |
| [1 i 2] | Oznaka za mazive otoke |
| S | Razredi hrapavosti kao treća dimenzija u 3D prikazu |
| 1α | Nastanak novoga otoka stabilnosti za $\Delta \cong \pi/6$, dijeljenjem otoka Number 1 |
| 1β | Hipotetički nastanak novoga otoka uz iste pretpostavke kao i 1α |
| 2α | Nastanak novoga otoka stabilnosti za $\Delta \cong \pi/6$, dijeljenjem otoka Number 2 |
| 2β | Hipotetički nastanak novoga otoka uz iste pretpostavke kao i 2α |
| Ω_0 | Metastabilni mazivi otok već pripremljen za dijeljenje za fazni pomak |
| ϕ | Raspon apscise od 10 do 20 μm , koja će biti stavljena pod povećalo |
| ----- | Sadržani su svi dosadašnji simboli i pojašnjenja |
| Legend | Mazivi slojevi u μm |

| | |
|-----------------------|--|
| $x = 0$ | Hrapavost u ishodištu uzduž apscise prosječne neravnine R_z , jer se u približna analitička rješenja ne može ugraditi funkcija (7) |
| [1-6] | Oznaka za referencu |
| Shema (I) | Pojašnjava sliku 4 |
| π | Transcedentni broj (3.141...) |
| $W_1 \rightarrow W_5$ | Parcijalna analitička rješenja |

Literatura

1. D. Ćurčija, I. Mamuzić, *Mater. Tehnol.*, 43 (2009) 1, 23-30.
2. R. Boman, J.-P. Ponthot, *J. Mater. Process. Technol.*, 43 (2002) 405-411.
3. S. Thiruvarduchelvan, M. J. Tan, *J. Mater. Process. Technol.*, 167 (2005) 2-3, 161-166.
4. O. P. Maksimenko, A. A. Semenča, *Plast. Deform. Met.*, 8 (2005) 447-452.
5. D. Ćurčija, I. Mamuzić, *Goriva i maziva*, 46 (2007) 1, 23-45.
6. P. Heyer, J. Läuger, *Lubr. Sci.*, 21 (2009) 7, 253-268.

Ključne riječi: hladno valjanje, dresiranje trake, maziva, Reynoldsova jednadžba, metoda Monte-Carlo

Autori

Dušan Ćurčija, Croatian Metallurgical Society, Berislavićeva 6, 10000 Zagreb, Croatia

Ilija Mamuzić, Croatian Metallurgical Society, Berislavićeva 6, 10000 Zagreb, Croatia

Marian Buršak, Tehnical Univerzitet of Košice, Slovakia

Jiri Klíber, Tehnical Univerzitet of Ostrava, Czech Republic

Primljeno: 30.9.2011.

Prihvaćeno: 03.01.2012.

Dodatak

Tablica 2: Uobičajene karakteristike maziva za teorijska izračunavanja

| | | |
|--|------------------------|-----------|
| γ - piezokoeffcijent viskoznosti | 2,18E-7 | Pa^{-1} |
| p - tlak valjanja | 20E6 | Pa |
| v_R - obodna brzina gibanja valjaka | 10 | m/s |
| V_0 - brzina trake | 6 | m/s |
| R - radijus valjaka | 0,25 - 0,35 | m |
| μ_0 - dinamička viskoznost maziva $\mu = \mu_0 \exp(\gamma^* p_0)$ Formula Barussa | 0,024-0,048 | Pas |
| α - kut zahvata | 0 - 0,02 | rad |
| ε_a - visina maziva na traci | 0,001-0,00002 | m |
| A - tehnološki parametar | 1965512 - 3934525 | m^{-1} |
| $R_z \approx 6\delta$; (GOST-27189-S) ISO 1302-N | $R_z = (1 - 10) \mu m$ | μm |