

## TEMPERATURNI USLOVI RADA I NAPREZANJA U RADNOM SLOJU VALJAKA ZA TOPLO VALJANJE ČELIKA

### TEMPERATURE AND STRESSES DISTRIBUTION IN WORKING LAYER OF ROLLS FOR HOT ROLLING

V. GORYANY

Institut für Angewandte Materialtechnik Gerhard-Mercator-Universität  
Duisburg, Deutschland

Primljeno: 23. 10. 2002.

#### IZVOD

Naveden je analitički pregled osnovnih rezultata eksperimentalnih i teoretskih istraživanja temperatura i naprezanja koja se javljaju u radnom sloju valjaka za toplo valjanje čelika, uzrocima termičkog razaranja površine valjaka u toku njihove eksploatacije.

**Ključne reči:** toplo valjanje, raspodela deformacije, raspodela temperature

#### ABSTRACT

An analytical overview of both theoretical and experimental approach to estimation of stress and temperature distribution in working layer of rolls for hot rolling, together with analysis of surface thermal damage is presented in this paper.

**Key words:** hot rolling, temperature distribution, stress distribution

#### UVOD

Za obezbjeđenje eksploatacione sigurnosti i otpornosti valjaka veoma je bitno rasvetljavanje stanja njihovog materijala pri radu u uslovima ciklično promjenljivih visokotemperaturnih djelovanja. Valjci se zagrijavaju uslijed toplote od valjanog metala koji ima temperaturu 850-1250°C (zavisno od tipa valjaonice i broja stana) i toplote koja potiče od transformacije i trenja. Valjci se hlade odvođenjem toplote rashladnom tečnošću, zračenjem toplote u okolni vazduh i predajom toplote elementima koji se dodiruju s valjcima - ležistima, podlogama, vodicama i dr.

## ANALITIČKI PREGLED OSNOVNIH REZULTATA

Promjena temperature radnog sloja valjaka u procesu eksploatacije predstavlja karakterističan slučaj polja sa periodičnom promjenom temperature tijela. Detaljnu opštu analizu takvih polja razradio je A.V.Lykov [1], naročito za poluograničeno tijelo kada se temperatura površine mijenja po zakonu proste harmonijske oscilacije, jednačina (1):

$$\Theta_n = T - \bar{T} = T_{mm} \cos \omega \tau \quad (1)$$

gdje je:  $\bar{T}$  - srednja vrijednost temperature površine;

$T_{mm}$  - amplituda promjene temperature na površini;

$\omega$  - ciklična frekvencija oscilacija temperature ( $\omega = 2\pi\nu$ )

$\tau$  - vrijeme.

U početku procesa na temperaturno polje tijela vrši uticaj početna raspodjela temperature. Zatim nastupa kvazistacionarno periodično stanje pri kojem vrednost temperature u bilo kojoj tački tijela vrši harmonijsku oscilaciju sa amplitudom koja se postepeno smanjuje zbog udaljavanja od površine tijela.

Rješenje za poluograničeno tijelo ima izgled, jednačina (2):

$$\Theta = \frac{T - \bar{T}}{T_{mm}} = \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x\right) \cos\left(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x\right) \quad (2)$$

gdje je:  $a$  - koeficijent termičke provodnosti;

$x$  - rastojanje od površine tijela.

Maksimum i minimum temperature smanjuju se sa dubinom, uslijed udaljenja od površine oni se sve kasnije i kasnije primjećuju. Vrijeme kašnjenja temperaturnog talasa se izračunava prema jednačini (3):

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{1}{2a\omega}}x \quad (3)$$

Intenzitet slabljenja temperaturnih oscilacija u dubini materijala određuje se pomoću koeficijenta prijema toplote, jednačina (4):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{a}{\omega}} \quad (4)$$

Dubina,  $X_n$ , na kojoj se temperaturne oscilacije smanjuju  $n$ -puta u poređenju sa oscilacijama na površini iznosi

$$X_n = \sqrt{2\varepsilon \ln n} \quad (5)$$

Količina toplote, akumulirane u jedinici površine poluograničenog zida za poluperiod iznosi:

$$Q_s = 2c\gamma T_{\text{min}} \sqrt{\frac{a}{\omega}} \quad (6)$$

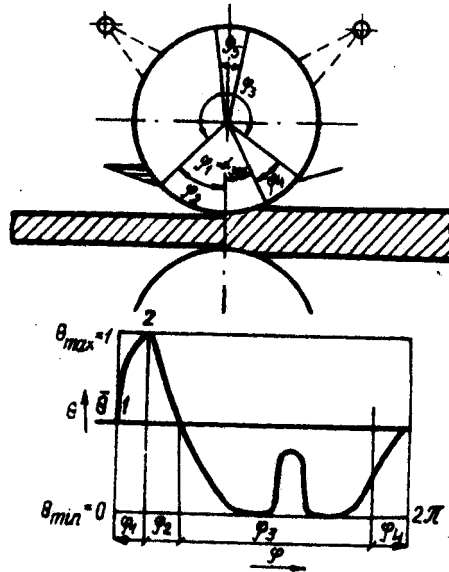
gdje je:  $c$  - specifični toplotni kapacitet tijela;

$\gamma$  - gustina tijela.

Ispitivanju temperaturnog režima valjaka posvećen je niz teorijskih i eksperimentalnih radova. Utvrđeno je da procesi razmijene toplote valjaka sa valjanim metalom, zavise od intenziteta rada valjačke pruge koji se određuje sabijanjem metala i brzinom valjanja, dužine valjanog profila, vremena valjanja i pauza, temperature trake, uslova i intenziteta hlađenja [2-10], debljine sloja kovarine [11]. Jak uticaj na temperaturu kontaktne površine ispoljava takođe i rad sila spoljašnjeg trenja i vrijeme deformacije [3,11].

Maksimalni gradijent temperatura u valjku javlja se pri njegovom prvom obrtanju [12] i određen je brzinom obrtanja. Pri malom broju ( $n = 5$  ob/min) gradijent iznosi  $570$  °C/mm u sloju debljine  $0.7$  mm i  $224$  °C/mm u sloju debljine  $3.4$  mm. U slučaju  $n = 120$  ob/min temperaturni gradijent pri prvom obrtanju iznosi  $1050$  °C/mm. Vrijeme zagrijavanja hladnih valjaka do ravnotežnog stanja i temperatura zagrijavanja valjaka, određuju se pomoću njihovih dimenzija, toplotne provodnosti materijala valjaka i trake, veličine sabijanja, brzine valjanja, dužine protila, ritma valjanja, količine, pritiska i temperature rashladne vode i t d [13]. Poslje 1-2 sata rada valjaonice, ako se bitno ne mijenjaju uslovi valjanja i hlađenja, toplotni profil valjaka se manje intenzivno mijenja i može se stabilizirati [14]. Prema nekim autorima [15], temperatura površine valjka stabilizuje se otprilike poslje 20 obrtaja i iznosi oko  $670$  °C. Pokazano je, da toplota koja se izdvaja pri deformaciji valjanog metala i koja nastaje pri trenju između valjka i valjanog metala, skoro ne utiče na povećanje temperature površine valjka. Maksimalne vrijednosti temperature odgovaraju sredini tijela valjka smanjujući se ka krajevima [14,16,17].

Analitičko rješenje zadatka toplotne provodnosti u skladu sa uslovima rada valjka za toplo valjanje metala, najpotpunije je istražio A.N.Šičkov [18]. Autor uzima da je poznata raspodijela temperature na površini valjka  $\Theta(\varphi)$  sl.1, tj, da su zadani uslovi I-roda.

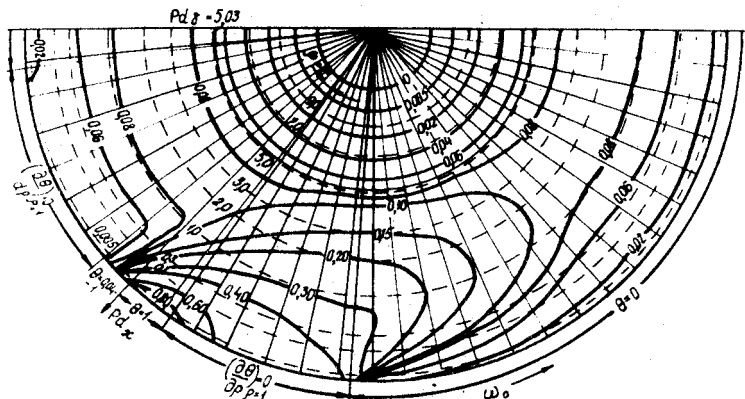


Slika 1 - Raspored graničnih uslova na površini gornjeg radnog valjka valjačke pruge za toplo valjanje lima [18]:  $\Phi_1$  - zona dodirivanja površine valjka sa valjanim metalom;  $\Phi_2$  i  $\Phi_4$  - zone gdje valjak apsorbira toplotu putem prenosa toplote zračenjem sa valjanim metalom i odaje toplotu konvekcijom okolnom vazduhu;  $\Phi_3$  - zona hlađenja valjaka tečnošću iz kolektora sa prskanjem;  $\Phi_5$  - zona dodira sa potpornim valjkom.

Figure 1 - Distribution of boundary conditions on surface upper work roll in plate hot rolling [18]:  $\Phi_1$  - contact zone between roll surface and metal;  $\Phi_2$  i  $\Phi_4$  - zone in which roll absorbs heat irradiated by metal and loses heat to environment by convection;  $\Phi_3$  - liquid cooling (sprayed);  $\Phi_5$  - contact zone with supporting rollzona dodira sa potpornim valjkom

Na kvazistacionarnom režimu (tj. pri uspostavljenom procesu valjanja)  $\Theta(\varphi)$  se ne mijenja. Srednja temperatura u zapremini valjka uspostavlja se zavisno od uslova valjanja i hlađenja. Karakteristično rješenje kvazistacionarnog polja prikazano je na slici2.

U principu ono se podudara sa drugim rješenjima [12,19-21]. Na osnovu analize temperaturnog polja valjaka u procesu toplog valjanja vršeni su pokušaji da se ocijeni stanje naprezanja valjaka u cjelini i njihovog površinskog sloja [12,23-31].



Slika 2 - Kvazistacionarno polje površinskog sloja valjaka pri  $\varphi_1 = \alpha_{z\text{min}} = 8^\circ; \varphi_2 = 35^\circ; \varphi_4 = 30^\circ; \omega_0 = 3,14 \text{ s}^{-1}$  [18]. Punim linijama su prikazane izoterme gdje su  $Q$  dati u granicama jedinice, a isprekidanim nivoi sa konstantnim veličinama kriterijuma Predvoditeljeva  $Pd_x = \frac{\omega x^2}{a}$ , gdje je  $x$  - rastojanje po radijusu od površine u dubinu valjaka.

Figure 2 - Quasistationery array in surface layer when  $\varphi_1 = \alpha_{z\text{min}} = 8^\circ; \varphi_2 = 35^\circ; \varphi_4 = 30^\circ; \omega_0 = 3,14 \text{ s}^{-1}$  [18]. Full lines represent isothermes, while dashed lines represent constant level of Predvoditel's criterion  $Pd_x = \frac{\omega x^2}{a}$ , where  $x$  - distance from surface.

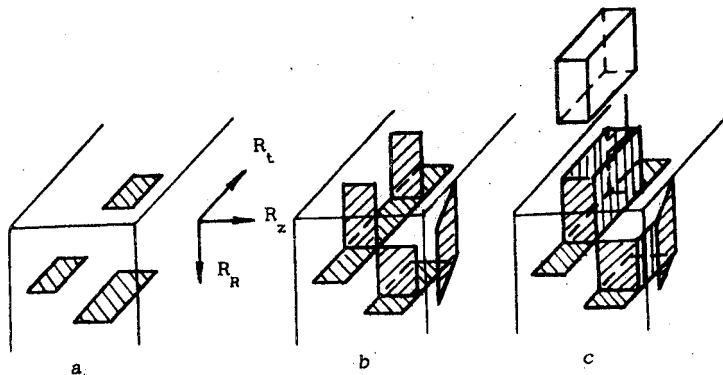
Rezultati eksperimentalnih i teoretskih istraživanja raspodjele temperatura u valjcima slabinga prikazani su u članku [32]. Mehanizam termičkog zamora i obrazovanja termičkih prkotina autori objašnjavaju zbirnim uticajem termičkih naprezanja zatezanja i sabijanja i mehaničkih naprezanja izazvanih valjanjem.

Široko je rasprostranjena teorija nastajanja prkotina uslijed termičkog širenja i sabijanja površinskih slojeva valjka [33].

U procesu valjanja toplotni režim valjaka karakteriše mjestimično zagrijavanje kontaktnih površina u djelićima sekunde i naknadno brzo hlađenje. Za vrijeme rada ti slojevi trpe svojevrsno termomehaničko djelovanje koje prate specifične fazne i strukturne promjene povezane s promjenama zapremine metala. Uslijed jakih oscilacija temperature javljaju se termička naprezanja koja dostižu veličine i do 500 MPa [34] i koja, zajedno s naprezanjima valjanja i preostalim naprezanjima u valjku, mogu prelaziti granicu elastičnosti i/ili granicu čvrstoće [17] materijala valjka, a uslijed čega se obrazuje mreža prskotina izazvanih termičkim zamorom [34]. Razvijena mreža prskotina uslijed termičkog zamora intenzivira habanje valjka, a naročito termičko habanje jer rasprskavanje površine slabi odvod toplote od površine kontakta [35].

Sa povećanjem maksimalne temperature površine valjaka i smanjenjem minimalne temperature u kontaktu sa valjanim metalom, raste plastična deformacija sabijanja površinskog sloja valjka koja, sa svoje strane, izaziva povećanje deformacije zatezanja. Međusobni odnos tih temperatura za vrijeme obrtanja valjka određuje otpornost radnih valjaka na obrazovanje mreže prkotina uslijed termičkog zamora [36].

Danas je široko zastupljen stav da do nastanka i rasprostiranja prkotine u valjcima dolazi u krtoj i tvrdoj komponenti - karbidima [3,33,37,38]. U početnom momentu u cementitu se javljaju najveće prskotine u osnom i tangencijalnom pravcu (sl. 4), koje se mogu djelimično rasprostirati i na perlitnu komponentu, ali uslijed velike plastičnosti posljednje i relaksacije naprezanja, prodiru u nju na malu dubinu. Zatim prskotine narastaju i pojavljuju se oštećenja koja ih spajaju u radijalnom pravcu. Radijalne prskotine prolaze takođe po cementitu, jer u procesu eksploatacije valjak podnosi ciklično zagrijavanje slojeva koje se višekratno ponavlja, do temperatura koje dovode do raspada cementita [39].



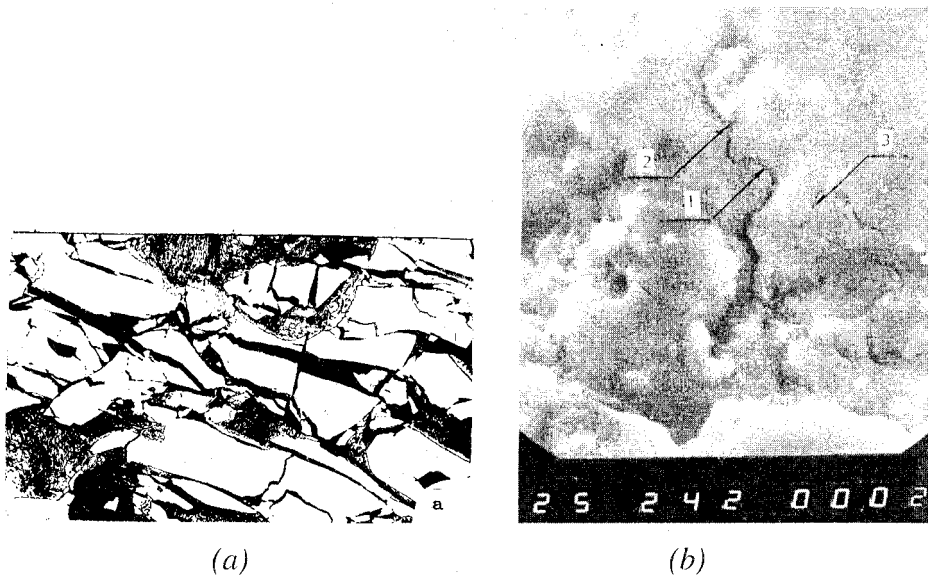
Slika 4 - Šema nastajanja prkotina u površinskom sloju livenog gvoždenog valjka [39]: a - tangencijalno-osne prkotine; b - radijalne prkotine; c - spajanje tangencijalno-osnih i radijalnih prkotina koje dovodi do ispucalosti površine.  $R_z, R_t, R_r$  - osna, tangencijalna i radijalna ukupna naprezanja.

Figure 4 - Sketch of crack initiation in surface layer of as-cast iron roll: (a) tangential cracks; (b) radial cracks; (c) coalescence of radial and tangential cracks leading to surface damage;  $R_z, R_t, R_r$  - axial, tangential and radial stresses

Uslijed objedinjavanja uzdužnih i poprečnih radijalnih prskotina s tangencijalno-osnim prkotinama dolazi do nastajanja izolovanih mikrozapremina

(sl.4). Dalje prkotina raste u radijalnom pravcu uslijed djelovanja sumarnih naprezanja.

Na slici 5 prikazana je mikrostruktura metala u radnom sloju valjaka od hrom-nikl gvožđa dobijena pri ispitivanju metala na cilindričnoj površini tijela valjka poslje njegove eksploatacije u univerzalnoj valjačkoj pruzi pri valjanji I-nosača [40]. Glavni uzrok razaranja metala je termički zamor. Za tu zonu radne površine karakteristično je prisustvo termičkih prkotina velike prostranosti, lokalizovanih u karbidnoj fazi (sl. 5a). Do pojave mikroprskotina može doći kako na zavojima magistralne mikroprskotine (sl.5b), nezavisno od toga da li se ravnomjerno (strelica 1) ili oštro (strelica 2) mijenja pravac njenog širenja, tako i na neprekidnim zonama karbidnih uključaka koji nemaju tragova prethodnog razaranja (strelica 3).



*Slika 5 - Mikrostruktura na površini livenog gvoženog valjka poslje eksploatacije: a - x500, nital; b - SEM x2400*

*Figure 5 - Surface microstructure of as casted iron roll after exploitation: a - x500, nital; b - SEM x2400*

Djelovanje termičkog zamora znatno se pojačava sa ciklično promjenljivim plastičnim deformisanjem površine valjka i prisustvom abraziva u zoni trenja čiju ulogu igra kovarina i čestice zdrobljene karbidne faze. Jedna od takvih čestica prikazana je na slici 6.



Slika 6 - SEM mikrofotografija čestice zdrobljene karbidne faze. x20 000 [41].

Figure 6 - SEM microphotograph of fractured carbide particle x20 000 [41].

Popunjavanje prkotina nekim materijalom (kovarina, produkti habanja, voda i dr.) smanjuje mogućnost slobodnog širenja radnog sloja pri zagrijavanju, smanjuje efektivnu vrijednost zazora prkotina i mogu igrati ulogu rasklinjavanja [35,42], a takođe dovodi do vezivanja i obrazovanja naljepa [43]. Nastala prkotina ne može se zavariti jer se radni valjak hladi vodom, koja dospjevši u prkotinu sprečava njeno zavarivanje. Voda i para potpomažu razaranje [44], naročito u momentima kada se mikroprkotina zatvara valjanim metalom. Prema podacima G.I.Beljčenka, pritisak u mikroprkotini pri temperaturi 1000°C iznosi  $27 \cdot 10^4$  MPa.

V.N.Hloponin i M.V.Kosireva smatraju [36] da kriterijum optimalnosti tempera-turnih uslova rada valjaka može biti amplituda plastične deformacije površinskih slojeva valjka za vrijeme njegovog obrtanja

$$\varepsilon_i = |\varepsilon_{rz}| + |\varepsilon_{rh}| \quad (8)$$

gdje je  $\varepsilon_{rz}$  - plastična deformacija sabijanja pri zagrijavanju površinskog sloja valjka;  $\varepsilon_{rh}$  - plastična deformacija zatezanja pri hladjenju površinskog sloja valjka.

Određen je optimalni odnos maksimalne i minimalne temperature na površini valjka u toku ciklusa obrtanja, pri kojem bi materijal površine livenih valjaka ciklički radio u elastičnoj oblasti.

Formulisani su zahtjevi koji se odnose na materijal površinskog sloja valjka, predstavljeni u vidu nejednačine čije ostvarenje isključuje obrazovanje mreže prkotina na površini valjka, nastalih uslijed termičkog zamora:



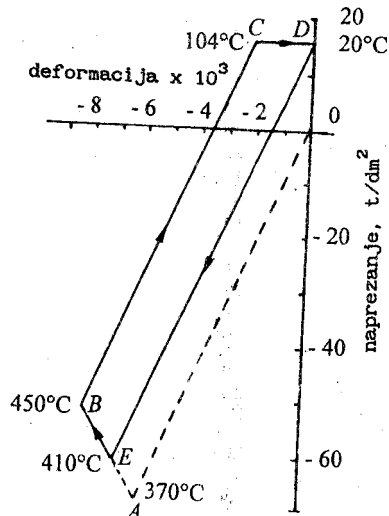
$$\frac{R_{p0.2}^{zat}(T_{min})}{E(T_{min})} + \frac{R_{p0.2}^{sab}(T_{max})}{E(T_{max})} \geq 2(\alpha_{max} T_{max} - \alpha_{min} T_{min}) \quad (9)$$

gdje je  $R_{p0.2}^{zat}(T_{min})$  - granica popuštanja na zatezanje materijala površinskog sloja valjka pri  $T_{min}$ ;  $R_{p0.2}^{sab}(T_{max})$  - granica popuštanja na sabijanje materijala površinskog sloja valjka pri  $T_{max}$ ;  $E(T_{min}), E(T_{max})$  - modul elastičnosti materijala valjka pri  $T_{min}$  i  $T_{max}$ ;  $\alpha_{min}, \alpha_{max}$  koeficijent linearnog raširenja pri  $T_{min}$  i  $T_{max}$ .

Razrada mjera koje obezbjeđuju održavanje temperatura površine valjka u elastičnoj oblasti ( $20^{\circ}\text{C} < T < 450^{\circ}\text{C}$  [36]) izvođena je [27] na osnovu analize promjene maksimalne i minimalne temperature na površini valjka u zavisnosti od uslova valjanja (temperatura trake, brzina valjanja) i hlađenja njegove površine.

Sistematsku proračunsku analizu naprezanja u valjcima izvršio je A.N.Šičkov [18]. Prema njegovoj metodici zasebno se razmatraju naprezanja izazvana osno- simetričnom komponentom temperaturnog polja valjka i neosno- simetričnom komponentom koja izaziva temperaturna naprezanja, koja zajedno s kontaktnim dovode do razaranja površinskog sloja valjaka uslijed zamora.

P.G.Stevens i dr.[22] su opisali mehanizam termičkog zamora površine valjka rukovodeći se rezultatima eksperimentalnog mjerenja temperatura kontinuirane valjaonice za toplo valjanje, slika 7.



Slika 7 - Razvijanje histerezisne petlje naprezanje-deformacija na površini valjka u početku valjanja [22]

Figure 7 - Development of stress-strain hysteresis loop on roll surface at start of rolling [22]

Poslije prvog ciklusa naprezanja i deformacije se mijenjaju po konturi DEBC. Na zoni BE javlja se deformacija u uslovima svestranog sabijanja radnog sloja, na zoni CD- plastična deformacija zatezanja. U tom momentu je moguća pojava prkotina uslijed termičkog zamora. Po mišljenju autora, radna sposobnost valjka zavisi, prije svega, od uslova njegovog hlađenja, tj. temperature koja odgovara tačkama E,B,C,D na histerezisnoj petlji.

## ZAKLJUČCI

1. Termičke prskotine nastaju na površini valjka poslije njenog izlaska iz žarišta deformacije i jakog hlađenja
2. Razvijanje prskotina ima karakter rasta zamorne prskotgine.
3. Nastajanje i razvijanje prskotina zavisi od uslova valjanja (uslovi hlađenja, specifični pritisci, temperatura valjanja i dr.) a takođe i od materijala valjka.
4. U poznatim radovima malo se pažnje posvećuje pokušajima povezivanja mehaničkih i fizičkih osobina materijala radnog sloja valjka sa temperaturnim uslovima njihove eksploatacije.
5. Eksperimentalne i proračunske metode neposrednog određivanja temperaturnog polja i polja naprezanja u radnom sloju valjaka ne daju mogućnost da se izvrše neposredni proračuni valjka na čvrstoću, a jos manje daju polaznih podataka za optimalizaciju hemijskog sastava i osobina materijala radnog sloja valjaka za različite uslove valjanja.

## LITERATURA

- [1] A. V. Lykov. Teplomassoobmen. Energija, Moskva, 1978, s. 480.
- [2] O. Kato, H. Matsumoto, T. Onuki e.a. Tetsu-to-hagane, 66(1980)4, s. 335.
- [3] T. S. Skoblo, L. A. Malašenko, L. P. Kosik i dr. Stal', (1988)1, s. 56-59.
- [4] J. Čizmar, P. Harbaj. Hutniczky Listy, 45(1990)9, s. 639-644.
- [5] E. A. Garber, M. P. Šaravin, A. A. Gončarskij. Tehničeskij progress sistem ohlažde-nija prokatnih stanov. Metallurgija, Moskva, 1991, s. 282.
- [6] I. P. Vidišev, V. M. Gorjanov, Ju. V. Gončarov i dr. Problema trenja i habanja, Tehnika, Kijev, (1991)39, s. 21-24.
- [7] I. P. Vidišev, V. M. Gorjanov, R. A. Burkova i dr. Mežvuzovskij sbornik naučnih trudov "Resursosberegajuščie tehnologii v transportnom i gidrotehničeskom stroiteljstve", Dnepropetrovsk, 1996, s. 74-76.

- [8] V. M. Gorjanoj, V. S. Radzinskij. XXIX Oktobarsko Savetovanje rudara i metalurga, Zbornik radova, Bor, 1997, s. 619-622.
- [9] V. M. Goryanoy, V. S. Radzinsky, O. Yu. Mironova e.a. Metaloznavstvo ta termična obrobka metaliv, (1998)1, s. 40-43.
- [10] V. M. Gorjanoj, V.S.Radzinskij. XXX Oktobarsko Savetovanje rudara i metalurga, Zbornik radova, Donji Milanovac, 1998, Knjiga II, s. 199-202.
- [11] D. A. Derkać, A.A.Gorbanjov, G.V.Pančoha. Čermetinformacija, Moskva, 1983, #2076-D83, s. 16.
- [12] N. M. Voroncov, V.T.Žadan, B.Ja.Šneerov i dr. Eksploatacija valkov obžimnih i sortovih stanov. Metallurgija, Moskva, 1973, s. 288.
- [13] P. I. Poluhin, V. P. Poluhin, V. N. Terehov i dr. Izvestija Vuzov. Černaja Metallurgija, (1972)4, s. 91-94.
- [14] A. A. Čmeljov, A. M. Safjan, V. L. Mazur i dr. Metallurgičeskaja i gornorudnaja promišlennost, (1984)4, s.18-21.
- [15] P Funke e.a. Archiv für das Eisenhüttenwesen, 46(1975)8, s. 495-502.
- [16] V.P.Hloponin, V.P.Poluhun, V.V.Medvedev i dr. Stal', (1981)6, s. 39-42.
- [17] V.N.Hloponin, E.I.Latuhin, O.N.Soskovec i dr. Stal', (1988)2, s. 59-63.
- [18] A.N.Šičkov. Temperaturnij režim listoprokatnih valkov, LGU, Leningrad, 1974, s.144.
- [19] C.F.Peck, J.M.Bonetti, F.T.Mavis. Iron and Steel Engineer, 31(1954)6, p.45-47.
- [20] C. F. Peck, F.T.Mavis. Iron and Steel Engineer, 32(1955)8, p. 121-127.
- [21] O. Pawelski, E.Bruns. Stahl und Eisen, (1976)8, s. 8-12.
- [22] P. G.Stevens, K. P. Evens, P. Harper. Journal of the Iron and Steel Institute, 209(1971)1, p.1-13.
- [23] Y. Sekimoto. Tjutandzo, 19(1966)5, p. 48-55.
- [24] Y. Sekimoto, M. Tanaka, R. Savada e.a. Tetsu-to-hagane, 61(1975)10, p.2337-2349.
- [25] Inoue, T.Takao, H.Ueda e.a. Dzaire, 19(1970)198, p. 241-247.
- [26] V.N.Hloponin, M.V.Kosireva. Teorija i tehnologija deformacii metallov, Metallurgija, Moskva, (1982)140, s. 102-108.
- [27] V.N.Hloponin, M.V.Kosireva. Teorija i tehnologija deformacii metallov, Metallurgija, Moskva, (1982)145, s. 43- 47.
- [28] A. Trens, S. Tong, F. Lin. J. Term. Stresses, 12 (1989)4, p. 427- 450.
- [29] C. N. Hamill, L.McLean, A.A.Chobarah. Iron and Steel Engineer, 51(1974)6, p. 51-55.
- [30] H. Gotoh. Curr. Adv. Mater. And Proc. 3(1990)3, p. 759.

- [31] V. N. Hloponin, P. I. Poluhin, V. I. Pogorželjškij i dr. Gorjačaja prokatka širokih polos. Metallurgija, Moskva, 1991, s. 320.
- [32] K. Sudzuki, T. Morisue, S. Dzimpo e.a. Tetsu-to-hagane, 61(1975)9, p. 2214-2225.
- [33] I. Yarita. Transactions of Iron and Steel Institute of Japan, 24(1984)12, p. 1014-1035.
- [34] V. P. Severdenko, Ju. B. Bahtinov, V. B. Bahtinov. Valki dlja profiljnogo prokata. Metallurgija, Moskva, 1979, s. 224.
- [35] Y. I. Trejger, V. P. Prihod'ko. Povišenje kačestva i ekspluatacionnoj stojkosti valkov listovih stanov. Metallurgija, Moskva, 1988, s. 192.
- [36] V. N. Hloponin, M. V. Kosireva. Teorija i tehnologija deformacii metallov, Metallurgija, Moskva, (1977)100, s. 93-99.
- [37] A. A. Černovol, N. A. Nikolajev, T. I. Tuboljceva. Sbornik dokladov konf. po povišeniju effektivnoeti tehnologičeskikh processov proizvodstva otlivok metallurgičeskogo oborudovanija. Dmetl, Dnepropetrovsk, 1982, s. 35-36.
- [38] V. M. Gorjanov. Journal of Mining and Metallurgy, 34(1998)(1-2)B, s. 21-35.
- [39] V. N. Terehov, V. P. Poluhin, I. V. Doronin. Izvestija Vuzov. Černaja Metallurgija, (1972)11, s. 74-77.
- [40] V. Gorjanov. Livarski vestnik, 44(1997)3, s. 66-77.
- [41] V. M. Goryanov, V. Jokanović. Metaloznavstvo ta termična obrobka metaliv. (1999)2, s. 37-42.
- [42] V. S. Lihanskij, V. N. Grinavcev. Tehnologija proizvodstva fasonnih profilej s primenjenijem kasset. Metallurgija, Moskva, 1986, s. 232.
- [43] V. M. Gorjanov. Proizvodstvo i primeneniye upročnjonnogo prokata v stroiteljstve, DISI, Dnepropetrovsk, 1989, s. 72-75.
- [44] M. A. Garkavi. Temperaturnye napriženija v valkah prokatnyh stanov. Dissertacija, LPI, Leningrad, 1981, s. 130.