

ISTRAŽIVANJE STANJA TERMIČKOG NAPREZANJA RADNOG SLOJA VALJAKA ZA VRUĆE VALJANJE

RESEARCH STATE OF THERMAL STRESS OF WORKING LAYER OF ROLLS IN HOT ROLLING

V. GORYANY

*Institut für Angewandte Materialtechnik Gerhard-Mercator-Universität
Duisburg, Deutschland; E-mail: goryany@t-online.de*

Primljeno: 15. 03. 2003.

IZVOD

Analizirana je veza između stanja termičkog naprezanja i fizičko-mehaničkih i toplofizičkih osobina materijala valjaka za vruće valjanje u procesu njihove eksploatacije.

Izvršena je analiza stanja naprezanja radnog sloja valjaka posle nastajanja termičkih pukotina. Formulisan je uslov nastajanja pukotina koji omogućava regulisanje tog procesa putem optimalizacije hemijskog sastava i osobina materijala radnog sloja valjaka za različite uslove eksploatacije i obezbjeđuje smanjenje njegove sklonosti ka razaranju uslijed termičkog zamora.

ABSTRACT

Relationship between thermal stresses and physical-mechanical properties of material for hot-rolls during their exploitation has been analyzed in this paper.

Stress analysis of working layer on hot rolls after initiation of thermic cracks is evaluated. Also, critical conditions for crack initiation are described together with ways of controlling initiation via optimization of chemical composition and mechanical properties of surface layer, resulting in decrease of susceptibility towards thermal induced damage.

UVOD

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

Promjena temperature radnog sloja valjaka u procesu eksploatacije izaziva temperaturna naprezanja, koja dovode do razaranja površinskog sloja valjaka uslijed termičkog zamora.

Analiza pregleda radova o uzrocima termičkog razaranja valjaka, dovela je do sljedećih zaključaka:

1. Termičke pukotine nastaju na površini valjka poslje njenog izlaska iz žarišta deformacije i jakog hlađenja.
2. Razvijanje pukotina ima karakter zamora.
3. Nastajanje i razvijanje pukotina zavisi od uslova valjanja (uslovi hlađenja, specifični pritisci, temperatura valjanja i dr.) a takođe od materijala valjka.
4. U poznatim radovima malo se pažnje posvećuje pokušajima povezivanja mehaničkih i fizičkih osobina materijala radnog sloja valjka sa temperaturnim uslovama 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 još manje daju polaznih podataka za optimalizaciju hemijskog sastava i osobina materijala radnog sloja valjaka za različite uslove valjanja.

VLASTITA ISTRAŽIVANJA

Analiziraćemo vezu između stanja naprezanja i osobina materijala valjka, što će pomoći da se odrede zahtjevi za mehaničke i toplofizičke osobine materijala i odrede pravci izbora tih osobina.

Na slici 1 prikazan je dijagram "naprezanje-deformacija" u tankom površinskom sloju valjka pri prvom opterećenju.

Deformaciju sloja izaziva njegovo zagrijavanje od srednje temperature mase valjka pri uspostavljenom režimu valjanja (T_n) do maksimalne temperature površine valjka (T_m):

$$\epsilon_{term} = \alpha T_{mn} \quad (1)$$

gdje je α - koeficijent termičkog širenja, T_m - amplituda promjene temperatura na površini valjka.

Termičko širenje realizuje se kao elastična i plastična deformacija

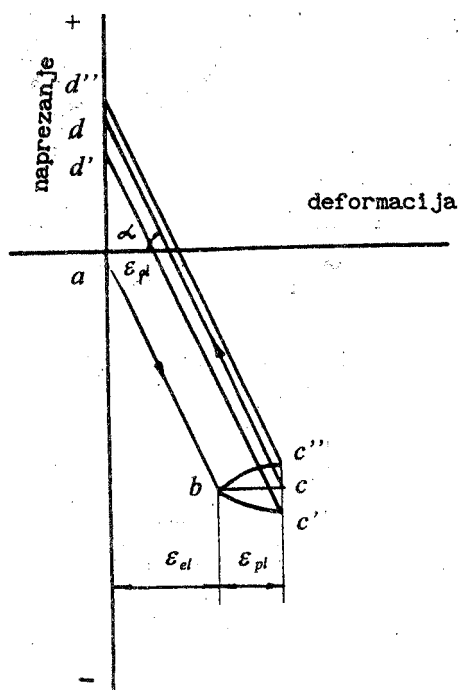
$$\epsilon_{term} = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} \quad (2)$$

gdje je

$$\varepsilon_{el} = \frac{R_{p0.2}^{sab}}{E} \tag{3}$$

$$\alpha T_{nm} = \frac{R_{p0.2}^{sab}}{E} + \varepsilon_{pl} \tag{4}$$

$$\varepsilon_{pl} = \alpha T_{nm} - \frac{R_{p0.2}^{sab}}{E} \tag{5}$$



Slika 1 - Dijagram naprezanje-deformacija u površinskom sloju valjka pri prvom opterećenju

Na slici 1 slijedi

$$\frac{ad}{\varepsilon_{pl}} - \operatorname{tg} \alpha = E \tag{6}$$

$$R^{sal} = E \varepsilon_{pl} \tag{7}$$

$$R^{zat} = E\alpha T_{mn} - R_{p0.2}^{sab} \quad (8)$$

U momentu zagrijavanja površinski sloj se nalazi u uslovima svestranog pritiska, pri čemu je mogućnost obrazovanja pukotina malo vjerovatna, čak ako je dostignuta granica elastičnosti $R_{p0.2}^{sab}$. Poslije hlađenja sloja zatezna naprezanja dostižu maksimalnu vrijednost pri T_n (tačka d na sl.1). Na šemi je prikazan slučaj kada naprezanja na zatezanje nisu dostigla granicu elastičnosti.

Analiza pokazuje da se veličina naprezanja na zatezanje određuje: amplitudom oscilacije temperature na površini valjka T_{mn} ;

- koeficijentom termičkog širenja, koji za bijelo i melirano gvožđe iznosi $(1,2 - 1,6)10^{5^{\circ}C^{-1}}$, u intervalu temperatura 20-500°C. Manje vrijednosti odgovaraju meliranom, veće - bijelom gvožđu;

- modulom elastičnosti, koji se mijenja u granicama $(2,2 - 1,4)10^5$ MPa i jako zavisi od strukture gvožđa, smanjujući se pri povećanju nivoa "sive" komponente strukture.

Naprezanja na zatezanje će biti manja ako dolazi do očvršćavanja materijala pri deformaciji (kriva $bc'd'$).

U momentu zagrijavanja pri naprezanjima sabijanja razvijaju se procesi puzanja i relaksacije naprezanja (kriva bc'').

Naprezanja na zatezanje biće veća što se više razvijaju ti procesi, tj. što je veća temperatura zagrijavanja materijala T_m . Sa druge strane, legiranje željezo-ugljeničnih legura nizom elemenata (molibden, volfram, nikl, hrom) omogućava smanjenje puzanja.

Razaranje materijala postaje moguće kada naprezanja na zatezanje dostižu $R_{p0.2}^{zat}$

$$R^{zat} = R_{p0.2}^{zat} \quad (9)$$

$$R_{p0.2}^{zat} = E\alpha T_{mn} - R_{p0.2}^{sab} \quad (10)$$

Sistematska istraživanja mehaničkih osobina meliranog i bijelog gvožđa [1] pokazala su postojanje tijesne korelacione veze između čvrstoće na zatezanje i sabijanje:

$$R_{p0.2}^{zat} = 0,96 R_{p0.2}^{sab} - 925 \text{ MPa (za } 1275 \leq R_{p0.2}^{sab} \leq 1668 \text{ MPa)} \quad (11)$$

Iz jednačina (10) i (11) dobijamo uslov nastajanja termičkih pukotina

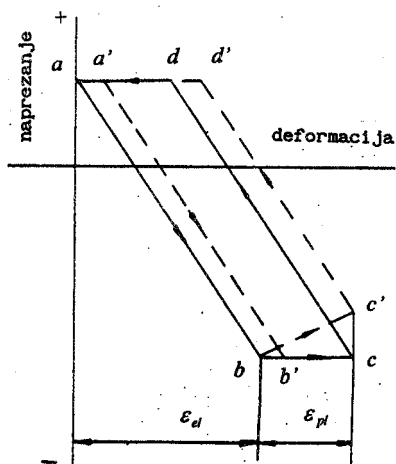
$$R^{zat} = \frac{E\alpha T_{mn} - 925}{1,96} \geq R_{p0,2}^{zat} \quad (12)$$

Npr. za $E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $T_n = 80^\circ\text{C}$, $T_m = 450^\circ\text{C}$

$$R^{zat} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 370 - 925}{1,96} = 71,7 \text{ MPa}$$

Veličina tih napreznaja se može porediti sa čvrstoćom bijelog gvožđa na kidanje koja, prema podacima Štoka [2] iznosi 80 MPa.

Ako su vrijednosti plastične deformacije pri sabijanju i zatezanju jednake i ne prelaze kritične, ciklus opterećenja i rasterećenja se ponavlja (slika 2, kriva *abcd*).



Slika 2 - Ciklus naprezanje-deformacija sa akumulacijom preostale deformacije

Međutim, zagrijavanje materijala u momentu termičkog opterećenja izaziva djelimičnu relaksaciju napreznaja sabijanja i puzanja. Plastična deformacija u zoni *bc'* protiče pri temperaturi T_m (450-650°C), u zoni *ad(a'd')* - pri T_n (40-80°C). Pošto se relaksacija napreznaja i puzanje povećavaju sa temperaturom, šerna opterećenja i rasterećenja se mijenja (*bc'd'a'b'*, slika 2). Kao rezultat, za svaki ciklus akumulira se preostala deformacija zatezanja *aa'*, i ma kako mala bila ta deformacija za jedan ciklus, ona će neizbježno kroz određen broj ciklusa dovesti do nastajanja pukotine (termički zamor).

Osnovni faktori koji određuju proces termičkog zamora su temperatura zagrijavanja površine valjka i osobine njegovog materijala. Energetski proces karakteriše se takođe količinom toplote koju valjci dobiju za poluciklus [3]:

$$Q_s = 2c\gamma T_{mn} \sqrt{\frac{a}{\omega}} \quad (13)$$

gdje je c - specifični toplotni kapacitet tijela valjka;

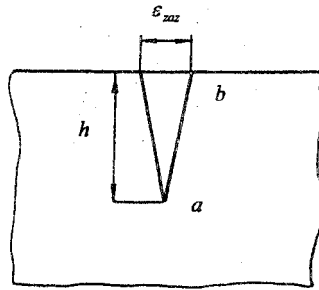
γ - gustina materijala valjka;

a - temperaturna provodnost materijala valjka;

ω - ciklička frekvencija oscilacije temperature.

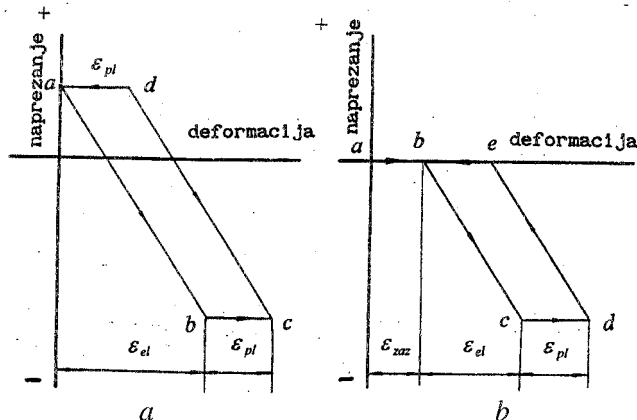
Interesantna je analiza stanja naprezanja radnog sloja valjka poslije nastajanja termičkih pukotina u njemu.

Neka je poslije dovoljno velikog broja ciklusa, pukotina prodrla na neku dubinu h (sl. 3) na kojoj se amplituda oscilacija temperature smanjuje n -puta.



Slika 3 - Šema pukotine nastale uslijed termičkog zamora u površinskom sloju valjka

Ako u tački a , koja se nalazi u dubini pukotine, maksimalna dostignuta temperatura ne dovodi do primjetne akumulacije deformacija, pukotina se neće razvijati, a u svakom slučaju njeno razvijanje se usporava (sl. 4a).



Slika 4 - Ciklus naprezanje-deformacija u dubini (a) i na površini (b) pukotine

U tački *b* (slika 3) na površini valjka termičko širenje djeluje na zatvaranje zazora ε_{zaz} , elastičnu i plastičnu deformaciju dubljih slojeva metala:

$$\varepsilon = \varepsilon_{term} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{zaz} \quad (14)$$

Prema tome, za jedan ciklus, naprezanja se mijenjaju po *abcdeba* (slika 4b). Naravno, u bilo kojoj tački između površine i dna pukotine, karakter stanja naprezanja će biti neutralan između prikazanih na slika 4a i 4b.

Popunjavanje pukotine nekim materijalom (okalina, produkti habanja, voda i dr.) smanjuje mogućnost slobodnog širenja radnog sloja pri zagrijavanju, smanjuje efektivnu vrijednost ε_{zaz} i može igrati ulogu rasklinjavanja [4-13].

Vjerovatno bitnu ulogu igra i korak pukotina. Ako su pukotine rijetke, stanje naprezanja približava se prikazanom na sl. 1 što dovodi do razaranja materijala valjka.

Na taj način, obrazovanje pukotina pri radu valjaka za vruće valjanje, je neizbježno. Ako su pukotine raspoređene po površini valjka ravnomjerno, tvoreći pravilan mozaik, ispucali sloj služi kao svojevrsni toplotni ekran za niže slojeve i kompenzira velike termičke deformacije jako zagrijanog spoljašnjeg sloja.

LITERATURA

- [1] P. Ruddeck Freiburger Forschungshefte, B(1965)110, s.83-116.
- [2] E. Piwowarsky. Hochwertiges Gußeisen, Springer Verlag, Berlin, 1965.
- [3] A.V.Lykov. Teplomassoobmen. Energija, Moskva, 1978, s. 480.
- [4] G.A.Tuljakov. Termičeskaja ustalost' v teploenergetike, Mašinstroenie, Moskva, 1978, s. 199.
- [5] R.A.Duljnev, P.I.Kotov. Termičeskaja ustalost' metallov, Mašinstroenie, Moskva, 1980, s. 200.
- [6] V.M.Gorjanov, I.V.Adamov, A.E.Krivošeev. Povyšenie effektivnosti proizvodstva i kačestva metallurgičeskoj produkcii, GPI, Tbilisi, 1981, s.102.
- [7] M.A.Garkavi. Temperaturnie napriaženija v valkah prokatnyh stanov. Kandidatskaja dissertacija, Politehničeskij institut, Leningrad, 1981, s.130.
- [8] A.P.Grudev, Ju.V.Zilberg, V.T.Tilik. Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem, Metallurgija, Moskva, 1982, s.312.

- [9] V.M.Gorjanov. Proizvodstvo i primenenie termičeski upročnjonnogo prokata v stroiteljstve. Dnepropetrovsk, DISI, 1989, s. 72-75.
- [10] V.Gorjanov. Metallurgija, 32(1993)4, p. 193-194.
- [11] V.Gorjanov. Livarski vestnik, 44(1997)3, s. 66-77.
- [12] V.M.Gorjanov. Journal of Mining and Metallurgy, 34(1-2)B (1998), s. 21-36.
- [13] V.Goryanov, V.Jokanovic. Metaloznavstvo ta termicna obrobka metaliv. 1999, #2, s. 37-42.