

**TERMOMEHANIČKA PRERADA MIKROLEGIRANIH  
ČELIKA KONCERNA SARTID: III DEO - POREĐENJE  $T_{nr}$   
TEMPERATURA ODREĐENIH U LABORATORIJSKIM  
I INDUSTRIJSKIM USLOVIMA**

**THERMOMECHANICAL PROCESSING OF  
MICROALLOYED STEELS IN SARTID A.D.: PART III -  
COMPARISON OF  $T_{nr}$  TEMPERATURES DETERMINED  
ON LABORATORY AND INDUSTRIAL SCALE**

N. RADOVIĆ<sup>1</sup>, G. VUKIĆEVIĆ<sup>2</sup>, D. JEREMIĆ<sup>2</sup>, Đ. DROBNJAK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Katedra za fizičku metalurgiju Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd*

<sup>2</sup> *SARTID a.d, Topla valjaonica traka, Smederevo, Jugoslavija*

Primljeno: 25. 01. 2002.

**IZVOD**

U radu su upoređene  $T_{nr}$  temperature dobijene u laboratorijskim ( $T_{nr}^L$ ) i industrijskim uslovima ( $T_{nr}^I$ ). U laboratorijskim uslovima  $T_{nr}^L$  temperatura je određena na uređaju za ispitivanje uvijanjem na povišenim temperaturama, a u industrijskim uslovima  $T_{nr}^I$  temperatura je određena na osnovu modela dobijenog analizom podataka sa završne pruge Tople valjaonice traka SARTID ad. Rezultati pokazuju dobro slaganje, uz napomenu da je  $T_{nr}^L$  viša od  $T_{nr}^I$  za oko 30 °C. Pretpostavljeno je da je razlika posledica korišćenja prosečnih vrednosti kojima je računata  $T_{nr}^I$ .

**Ključne reči:** mikrolegirani čelik, kontrolisano valjanje,  $T_{nr}$  temperature, simulacija

**ABSTRACT**

The aim of this work was to compare the  $T_{nr}$  temperatures of microalloyed steels estimated on laboratory ( $T_{nr}^L$ ) and industrial scale ( $T_{nr}^I$ ). Laboratory and industrial scale are related to testing on high temperature torsion machine, and calculation based on rolling mill log data obtained from SARTID six stand Hot Strip Mill (HSM), respectively. Obtained results are in good agreement, showing the difference of about 30°C. It is assumed that  $T_{nr}^L$  has higher value due to use of average values in simulation.

**Key words:** Microalloyed steel, Controll rolling,  $T_{nr}$  temperature, Simulation

## 1. UVOD

Glavni ciljevi laboratorijskih simulacija su (i) izvođenje serija eksperimenata sa ciljem da se odrede brojne vrednosti za konstante koje se javljaju u modelima kojima se opisuju zavisnosti naprezanja od brzine deformacije, stepena deformacije i temperature ( $\sigma = \sigma(\dot{\epsilon}, \epsilon, T)$ ); odnosno (ii) izvođenje termomehaničkog režima bliskog industrijskom, na uređaju za simulaciju i koreliranje dobijenih rezultata [1].

Testovi simulacije se izvode na uređajima koji omogućavaju ostvarenje zadatog termomehaničkog režima. Za simuliranje procesa završnog valjanja se najčešće koriste ispitivanja na uređaju za ispitivanje uvijanjem na povišenim temperaturama[2-9]. Glavni razlog je da se uvijanjem može ostvariti stepen deformacije koji odgovara onome na završnoj pruzi. Druge metode nisu pogodne za simulaciju završnog valjanja jer, usled brzog dostizanja plastične nestabilnosti, nije moguće ostvariti stepen deformacije koji se postiže na završnoj pruzi. Ukoliko bi se koristilo ispitivanje zatezanjem, do preloma uzorka dolazi pri malom stepenu deformacije, dok je ispitivanje pritiskivanjem ograničeno pojavom buričavosti uzorka. Sa druge strane, jasno je da sistem naprezanja pri uvijanju ne odgovara onome pri valjanju. Zato se, već standardnim postupkom, izmerene vrednosti momenta uvijanja i ugaoone deformacije preračunavaju u ekvivalentno naprezanje i ekvivalentnu deformaciju (naprezanje i deformacija koje po vrednosti odgovara naprezanju u testu jednoosnog zatezanja), jednačine (1) i (2)[2-4]:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} \cdot \frac{Mu}{2 \cdot \pi \cdot R^3} \cdot (3 + m + n') \cdot 1000(MPa) \quad (1)$$

gde su:

$\sigma_{eq}$  - ekvivalentno zatezno naprezanje, MPa

$Mu$  – moment uvijanja, Nm

$R$  – poluprečnik mernog dela epruvete, mm

$m$  – osetljivost na brzinu deformacije

$n'$  - indeks deformacionog ojačavanja pri uvijanju

$$\epsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R \cdot \theta}{Lo} \quad (2)$$

gde su:

$\epsilon_{eq}$  - ekvivalentna deformacija

$\theta$  - ugao uvijanja, rad

$R$  – poluprečnik mernog dela epruvete, mm

$L_0$  - dužina mernog dela epruvete, mm

Ipak, najveće ograničenje uređaja za ispitivanje uvijanjem na povišenim temperaturama je ostvarivanje zadate brzine deformacije i termičkog režima. Najveće brzine deformacije koje se sa sigurnošću mogu kontrolisati u laboratoriji su do  $10 \text{ s}^{-1}$ , dok su iste na završnoj pruzi za jedan red veličine veće. Sa druge strane, u novijim radovima je pokazano da brzina deformacije nema toliko veliki uticaj na kinetiku statičke rekristalizacije, odnosno  $T_{nr}$  temperaturu [10-13]. Na brzinu deformacije se može uticati geometrijom uzorka (skraćenje merne dužine dovodi do povećanja brzine deformacije), odnosno brojem obrtaja motora. Tako je brzina deformacije limitirana snagom motora, tj. brojem obrtaja motora. Još jedan nedostatak ove metode što se zahtevani stepen i brzina deformacije ostvaruju samo na spoljnom površinskom sloju. Na taj način je veoma otežano otkrivanje mikrostrukture, pošto je površina najčešće oksidisana, odnosno ne može se precizno ispolirati jer nije ravna.

Cilj ovog rada je bio da uspostavi korelaciju između  $T_{nr}$  temperatura dobijenih u industrijskim uslovima i testovima simulacije.

## 2. EKSPERIMENTALNI DEO

Detalji vezani za određivanje  $T_{nr}$  temperature u laboratorijskim uslovima su detaljno opisani u ref [14], a u industrijskim uslovima u ref.[15]. Rezime parametara deformacije je dat u tabeli 1.

*Tabela 1 - Rezime termomehaničkih parametara korišćenih u ovom ispitivanju*

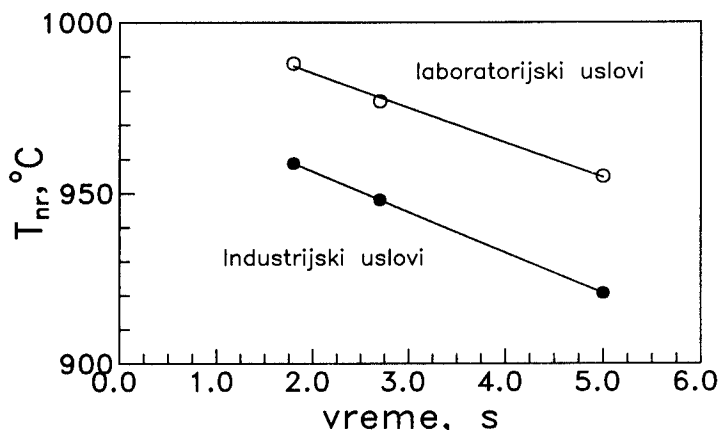
*Table 1 - Summary of thermomechanical parameters used in this work*

Parametar	Simulacija	Valjaonica
stepen deformacije	0.35	0.175 -0.317
brzina deformacije, $\text{s}^{-1}$	1.50	5.81 -54.25
pauza između provlaka, s	1.80; 2.70; 5.00	1.66-5.53

## 3. REZULTATI

$T_{nr}$  temperaure su određene na uobičajeni način [16,17]. Na slici 1 su prikazane dobijene vrednosti  $T_{nr}$  temperatura dobijene u laboratorijskim ( $T_{nr}^L$ - otvoreni simboli) i industrijskim uslovima ( $T_{nr}^I$ - puni simboli). Obe zavisnosti pokazuju da se  $T_{nr}$  temperature snižavaju sa povećanjem

dužine pauze između provlaka. Takođe, zavisnosti pokazuju gotovo identičan trend, ali su vrednosti  $T_{nr}$  temperature dobijene u industrijskim uslovima za oko  $30^{\circ}\text{C}$  niže od  $T_{nr}$  temperatura dobijenih u laboratorijskim uslovima.



Slika 1 -  $T_{nr}$  temperature određene u laboratorijskim ( $T_{nr}^L$  - otvoreni simboli) i industrijskim ( $T_{nr}^I$  - puni simboli) uslovima

Figure 1 -  $T_{nr}$  temperatures estimated on laboratory ( $T_{nr}^L$  - open symbols) and industrial ( $T_{nr}^I$  - closed symbols) scales

#### 4. DISKUSIJA

Sniženje  $T_{nr}$  temperature sa povećanjem, dužine pauze je u dobroj saglasnosti sa ranije publikovanim rezultatima drugih autora [10,18-20]. Kako su u pitanju kratke pauze glavni mehanizam blokiranja rekristalizacije je prisustvo rastvorenih atoma u čvrstom rastvoru i njihov uticaj na pokretljivost granica zrna. Sa druge strane, razlika od oko  $30^{\circ}\text{C}$  predstavlja tolerantno rasipanje. Pretpostavljeno je da su ove temperaturne razlike posledica razlika u ostvarenim parametrima simulacije u odnosu na uslove valjanja.

- **Brzina deformacije.** Brzina deformacije primenjena u testovima simulacije je za red veličine manja od onih koje se registruju u toku toplog valjanja (Tabela 1). Bai et al.[12,13] su utvrdili da se, u testovima simulacije sa stepenom deformacije  $\epsilon=0.35$ , pri smanjenju brzine deformacije sa 10 na  $0.2 \text{ s}^{-1}$   $T_{nr}$  temperatura povećava. Porast temperature je pripisan dužem vremenu zadržavanja na temperaturi deformacije, što može dovesti do početka dinamičkog taloženja koje odlaže rekristalizaciju, odnosno povišava  $T_{nr}$  temperaturu. Kako je razlika u ostvarenoj brzini deformacije u testu simulacije u istom redu veličine, to se može smatrati sličnom.

- Stepen deformacije. U toku valjanja, stepen deformacije se smanjuje od prvog pa sve do šestog provlaka, dok je u testovima simulacije konstantan i ima prosečnu vrednost. U prva dva stana, završne pruge, tipični stepen redukcije je 0.5, što prema jednačini 3 odgovara ekvivalentnoj deformaciji od 0.8 [2].

$$\varepsilon_{eq} = 1.15 \cdot \ln \left( \frac{1}{1 - \varepsilon} \right) \quad (3)$$

gde je:  $\varepsilon$  - stepen redukcije u svakom stanu

$\varepsilon_{eq}$  - ekvivalentna deformacija

Povećanje stepena deformacije proizvodi dva efekta: (i) povećanje ukupne gustine dislokacija a time i akumuliranje energije, i (ii) produženje vremena zadržavanja na temperaturi testa. Prvi efekat ubrzava rekristalizaciju time što se povećava pokretačka sila i povećava broj mesta na kojima se nukleiraju rekristalisana zrna, što generalno vodi ka sniženju  $T_{nr}$  temperature, a drugi omogućava eventualni početak dinamičkog taloženja koje odlaže rekristalizaciju, odnosno povisava  $T_{nr}$  temperaturu. Rezultujući efekat je sniženje  $T_{nr}$  temperature. Kvantitativni opis ove zavisnosti, za čelik sa 0.07%Nb, u oblasti  $\varepsilon > 0.26$  je dat jednačinom (4) [12,13]:

$$T_{nr} = 1050 - 314 \cdot \varepsilon, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

gde je:  $\varepsilon$  stepen deformacije.

Prema navedenoj jednačini, sniženje temperature ako je stepen deformacije  $\varepsilon=0.35$  iznosi  $\Delta T_{nr}=109.9^\circ\text{C}$ , a u testu u kome je stepen deformacije  $\varepsilon=0.5$   $\Delta T_{nr}=157^\circ\text{C}$ , te se može smatrati da je  $T_{nr}$  temperatura dobijena uprošćenom simulacijom u granicama očekivanih vrednosti.

- Dužina pauze između provlaka. U toku valjanja, pauza nije konstantna, već je najduža posle prvog stana, a najkraća posle predposlednjeg. Npr. u testu u kome je prosečna dužina pauze 2.7s, prva pauza je skoro 5s, što omogućava duže vreme u kome se rekristalizacija završava, odnosno rekristalizacija s može završiti i na nižoj temperaturi. Sa druge strane, korišćenje uprošćene simulacije pretpostavlja da je pauza između provlaka konstantna, te se za proračun računa sa srednjom vrednosti. Kako su prve dve pauze duže od nominalne vrednosti, to se potpuna rekristalizacija može očekivati na sve nižim temperaturama. Na taj način se pretpostavlja da je razlika u dobijenim vrednostima posledica korišćenja prosečne vrednosti u modelu za proračun  $T_{nr}$  u industrijskim uslovima.

Razlika  $T_{nr}$  temperatura od oko  $30^\circ\text{C}$ , predstavlja oko 3% iznosa temperature, te se i sa tog stanovišta može smatrati da se testovima uprošćene simulacije dobijaju zadovoljavajuće precizni rezultati. Takođe, postoje jasni fizički

razlozi zašto se javlja razlika između  $T_{nr}$  temperatura koje su određene na završnoj pruzi Tople Valjaonice traka i u testovima simulacije. I pored svih nedorečenosti, testovi uprošćenih simulacija su veoma značajni jer omogućavaju testiranje otpora deformaciji i određivanje  $T_{nr}$  temperature za nove klase čelika koji se prvi put proizvode, podataka koji su od velike važnosti za postavljanje plana valjanja na završnoj pruzi [2-9].

## 5. ZAKLJUČAK

Upoređene su  $T_{nr}$  temperature mikrolegiranih čelika određene u laboratorijskim i industrijskim uslovima. Rezultati ukazuju na veoma dobro slaganje  $T_{nr}$  temperatura. Rezultati simulacije se mogu sa velikom sigurnošću koristiti za predviđanje plana valjanja novih klasa mikrolegiranih čelika iz proizvodnog asortimana Sartida a.d. Pretpostavljeno je da razlika proističe iz uprošćenja termomehaničkog režima u testovima simulacije u odnosu na realne uslove.

## LITERATURA

- [1] C. M. Sellars, *Materials Science and Technology*, 6 (1990) 1072-1082
- [2] S. Yue, J. J. Jonas, *Physical Simulation of Industrial Forming Processes*, in: *Proc.Int.Symp. on Physical Simulation of Welding, Hot Forming, and Continuous Casting*, J. Bowker and D. L. Baragar eds., MTL, CANMET, Ottawa, Canada (1988)
- [3] T. Chandra et al., *The Science and Technology of Flat Rolling*, Deauville, France (1987) F18.1-8
- [4] T. Maccagno et al., *ISIJ Int.*, 34 (1994) 917-922
- [5] L. N. Pussegoda, P. D. Hodgson and J. J. Jonas, *Materials Science and Technology*, 8 (1992) 63-71
- [6] T. Maccagno, J. J. Jonas, *ISIJ Int.*, 34 (1994) 607-614
- [7] F. Samuel et al., *ISIJ Int.*, 30 (1990) 216-225
- [8] J. J. Jonas, C.M.Sellars, *Iron and Steelmaker*, Oct.-(1992) 67-71
- [9] J. J. Jonas, C. M. Sellars, *Future Developments of Metals and Ceramics*, Ed. J. A. Charle et al., *The Institute of Materials*, London (1992) 147-177
- [10] D. Q. Bai et al., *ISIJ Int.*, 36 (1996) 1084-1093
- [11] D. Bai et al., *Metallurgical Transaction*, 24A (1993) 2151

- [12] D. Bai et al., Proc. Int. Conf. on Processing, Microstructure and Properties of Microalloyed and Other Modern HSLA Steels, ed. A. DeArdo, Pittsburgh, ISS, Warrendale (1992)
- [13] S. Yue, D. Q. Bai, J. J. Jonas, Canadian Metallurgical Quarterly, 33 (1994) 145-154
- [14] N. Radović, G. Vukićević, D. Jeremić, Đ. Drobnjak, Metalurgija, 7 (2001) 13-20
- [15] G. Vukićević, D. Jeremić, N. Radović, Đ. Drobnjak, Metalurgija, 7 (2001) 151-159
- [16] F. Boratto et al., Proc. Int. Conf. on Physical Metallurgy of Thermo-mechanical Processing of Steels and Other Metals, ed. I. Tamura, ISIJ, Tokyo (1998) 383-391
- [17] J. Jonas, S. Yue, Materials Forum, 14 (1990) 245-254
- [18] Đ. Drobnjak et al., 37<sup>th</sup> MWSP Conf. Proc., ISS. (1996) 759-768
- [19] N. Radović et al., ISIJ International, 39 (1999) 575-582
- [20] W. Sun et al., Materials Science Forum, 113-115 (1992) 533-538