

**TEMPERATURNI REŽIM PROCESA KONTINUIRANOG
VALJANJA ČELIČNIH ŠIPKI**
**TEMPERATURE REGIME OF CONTINUAL PROCESS
OF STEEL BARS ROLLING**

M. MIŠOVIĆ¹⁾, S. RADOVIĆ²⁾, A. KOPRIVICA³⁾

¹⁾ *Metallurško-tehnološki fakultet-Podgorica,*
²⁾ *Željezara-Nikšić,* ³⁾ *ICM-Nikšić*

Primljeno: 12. 02. 2004.

IZVOD

Ispitivan je temperaturni režim za proces kontinuiranog valjanja čeličnih šipki. Kod šipke prečnika 10mm ustanovljeno je da se temperatura površine dominantno promjeni na predpruzi (~90% ukupnog smanjenja temperature). Na među- i završnoj pruzi temperatura se smanji preostalih ~10%. Interval završnih temperatura valjanja je ~60°C. Šipke većeg prečnika (20 mm) se valjaju sa većom brzinom, pa je ukupno vrijeme valjanja kraće i odnosi temperatura površine drugačiji.

Proračunata temperatura kod šipki prečnika 20 mm korišćenjem raspoloživih jednačina se razlikuje od eksperimentalno izmjerenih temperatura površine. Razlika se identifikuje već na prvom stanju pruge i uvećava se do 4-og stana gdje iznosi 80°C. U nastavku se ova razlika zadržava približno konstantnom do kraja pruge.

Ključne riječi: temperatura površine, kontinuirano valjanje, čelične šipke

ABSTRACT

Temperature regime for process of continual rolling of steel bars was investigated. By bar with diameter 10 mm, surface temperature constantly changes in front of train (~90% of total temperature reduction). At between and final train temperature reduces at remained 10%. Interval of final rolling temperatures is ~60C. Bars with greater diameter (20mm) are rolling with higher velocity, so that total rolling time is shorter and temperature relations are different. Calculated bar temperatures with diameter 20 mm, using available equations are different from experimentally measured surface temperatures. The differences are identified at first mill already and increase till fourth mill where temperature is 80C. In continuation this difference is delayed approximately constantly till the end of the train. This difference, afterwards, remains approximately constant till the end of train.

Key words: surface temperature, continual rolling, steel bars

1. UVOD

Poznata su dva načina rješavanja problema temperaturnog režima pri procesu valjanja. Jedan od njih se zasniva na teoretskim zavisnostima procesa razmjene toplote, a drugi na statističkoj analizi rezultata eksperimentalnih ispitivanja temperatura valjanih komada [1-3].

Teoretska analiza predviđa sastavljanje jednačina zbirnog toplotnog bilansa, koje uključuju: hlađenje izazvano zračenjem, konvekcijom, kontaktom komada sa radnim valjcima i vodom za njihovo hlađenje, i zagrijavanje na račun toplotnog efekta rada deformacije i egzotermnih reakcija oksidacije.

Statistički model temperaturnih uslova valjanja se izvodi na osnovu podataka eksperimentalnog proučavanja promjene temperature komada na različitim djelovima. Ovaj model odražava konkretne uslove i odgovara određenom dijapazonu promjena parametara valjanja, karakterističnom za određeni stan. Time je oblast primjene ovih modela ograničena.

Modeli za proračun temperaturnog režima valjanja na novoprojektovanim stanovima, čiji se tehnološki proces bitno razlikuje od onih za koje već postoji model, moraju koristiti zavisnosti zasnovane na teoretskoj analizi procesa razmjene toplote, što znači da prednost imaju teoretske zavisnosti u odnosu na statistički pristup [3].

Cilj ovog rada je istraživanje temperaturnog režima za procese kontinuiranog valjanja čeličnih šipki na kombinovanoj valjaonici i provjera mogućnosti primjene postojećih jednačina za proračun temperaturnih promjena.

2. TOPLOTNI BILANS TOPLO VALJANIH ČELIČNIH ŠIPKI

2.1. Hidro spiranje kovarine

Zagrijani polazni komadi pri kretanju od zagrevne peći prema prvom stanu prolaze kroz spirač kovarine. Funkcija spirača je uklanjanje kovarine sa površine gredice pomoću vode pod pritiskom. Isti je izveden u obliku zatvorene konstrukcije u kojoj je smješten prsten sa mlaznicama. Voda pod pritiskom dolazi iz stanice za vodu.

Uslovi toplotne emisije u sistemu komad-para-voda su kompleksni, mada se za proračun promjene temperature valjanja usljed dejstva hidrospiranja predlažu sledeće jednostavne empirijske zavisnosti:

Jednačina	Veličine	Literater. izvor	Broj
$\Delta t = 0.73 t_0 / H_k (1 + v_k)$	t_0 - ulazna temperatura gredice, °C n - broj sekcija hidrospiranja,	[3÷6]	1
$\Delta t = 500 n / (H_k v_k)$	H_k - deblj. komada u zoni hidrospr., mm		2
$\Delta t = 660 / (H_k v_k)$	v_k - brzina komada u zoni hidrospr., m/s		3

2.2. Zračenje

Zračenje kao oblik prenosa toplote je prisutno nakon izlaza komada iz peći duž cijele kontinuirane pruge.

Sniženje temperature metala na račun gubitaka toplote zračenjem, ako se vrijednosti toplotnog kapaciteta (c), gustine (ρ) i faktora emisivnosti (ε) mogu uzeti kao konstantne ($\varepsilon=0.67-0.9$, $c=607-795$ J/kg°C, $\rho=7500-7800$ kg/m³), proračunava se po sledećim formulama:

Jednačina	Veličine	Liter. izvor	Broj
$\Delta t = \tau(T_0/100)^4 / 600h$	τ - vrijeme hlađenja, s T_0 - temp. početka valjanja, K	[3]	4
$\Delta t = 67(T_{sr}/1000)^4 \tau F/G$	h - debljina komada, mm; $F/G=2/h\rho$ T_{sr} - sr. temp. za period hlađenja, K		5

Prvo pojednostavljenje pri ovakvom načinu izračunavanja promjene temperature usled zračenja je prihvaćeni uslov kvazistacionarnog temperaturnog polja, koji se narušava u procesu valjanja masivnih komada, jer se temperatura njihove površine smanjuje intenzivnije u odnosu na temperaturu srednjih slojeva, što dovodi do pojave temperaturnog gradijenta po poprečnom presjeku.

Drugo značajno pojednostavljenje je prihvatanje koeficijenta toplotnog kapaciteta, gustine i faktora emisivnosti kao konstantnih veličina. U realnim uslovima c , ρ i ε zavise od temperature komada, stanja njegove površine i hemijskog sastava.

2.3. Konvekcija

Konvekcija kao oblik prenosa toplote je zastupljena, kao i zračenje, duž cijele valjaoničke pruge.

Teško je naći dovoljno egzaktn način proračuna konvektivnih gubitaka toplote koji odgovara realnim uslovima valjanja. Ovo se objašnjava time, što se proračun konvektivnih gubitaka svodi na određivanje koeficijenta prenosa toplote α (W/mK), koji zavisi od niza faktora: temperature, toplotne provodljivosti, toplotnog kapaciteta, gustine, dinamičkog viskoziteta, karaktera strujanja vazduha.

Jedna od formula za proračun sniženja temperature metala na račun konvektivnih gubitaka toplote je:

Jednačina	Veličine	Literaturni izvor	Broj
$\Delta t = t_0 \tau / 240h$	t_0 - temp. početka hlađenja, °C τ - vrijeme hlađenja, s h - debljina komada, mm	[3]	6

Različite su ocjene o udjelu konvekcije, kao komponente toplotnih gubitaka zbog teškoće eksperimentalnog i analitičkog određivanja konvektivnih gubitaka toplote.

Pri računanju promjene temperature na završnoj pruzi, imajući u vidu njihove male apsolutne vrijednosti, literaturni podaci dozvoljavaju usvajanje udjela konvektivnih gubitaka toplote 5-10% od gubitaka toplote zračenjem, a ne uzimanje u obzir konvektivnih gubitaka na završnoj pruzi izmijenice krajnji rezultat proračuna temperature ne više od 0.2-0.3% [4].

2.4. Hlađenje valjcima

Usljed kontakta komada sa radnim valjcima dolazi do gubitka toplote komada.

Formule za proračun sniženja temperature metala na račun toplotne razmjene u zoni kontakta komad - radni valjak, su sledeće:

Jednačina	Veličine	Liter. izvor	Broj
$\Delta t = 31.12(t_0 - t_v)\sqrt{\tau} F/G$	t_v - temperatura valjka, °C τ - kontakt komada sa valjkom, s	[3]	7
$\Delta t = \frac{4.87}{h_0 + h_1}(t_0 - t_v)\sqrt{\frac{2l_d h_0}{10^3(h_0 + h_1)v_k}}$	h_0 - ulazna debljina komada, mm h_1 - izlazna debljina komada, mm l_d - dužina luka zahvata, mm v_k - brzina komada, m/s		8

Zavisnosti su dobijene iz uslova idealnog kontakta valjanog komada i valjka.

Pojednostavljenja koja su primijenjena za dobijanje predhodnih izraza su sledeća: odsustvo toplotne razmjene sa okolnom sredinom, ne uzimanje u obzir izolacionog dejstva kovarine i ne uzimanje u obzir trenja na površini kontakta valjak-metal. Smatra se da trenje na površini kontakta kompenzuje izolaciono dejstvo kovarine [1-5].

Nezavisno od izabranog metoda proračuna temperature, poželjno je vrijednosti c , λ , ρ prihvatiti kao odgovarajuće stvarnoj temperaturi metala koji se valja [1-3].

2.5. Toplotni efekat rada deformacije

Energija deformacije povećava temperaturu valjanog komada. Izrazi za proračun povećanja temperature na račun energije deformacije su sljedeći:

Jednačina	Veličine	Liter. izvor	Broj
$\Delta t = \frac{1325 - t_0}{8.35} [1 + 1/3(l_d/h_{sr} - 1)] \log \frac{h_0}{h_1}$	h_{sr} - srednja debljina komada, mm R - poluprečnik valjka, mm	[3]	9
$\Delta t = 10^3 K_f \ln(h_0/h_1)/(\rho c)$	K_f - otpor deformaciji, N/mm ²	[5]	10
$K_f = 50 \exp(0.4646\sqrt{R\Delta h/h_0 h_1})$	K_f - otpor def. za pripr. stanove		11
$K_f = 60 \exp(0.3838\sqrt{R\Delta h/h_0 h_1})$	K_f - otpor def. za završne stanove		12

2.6. Toplotni efekat reakcija oksidacije

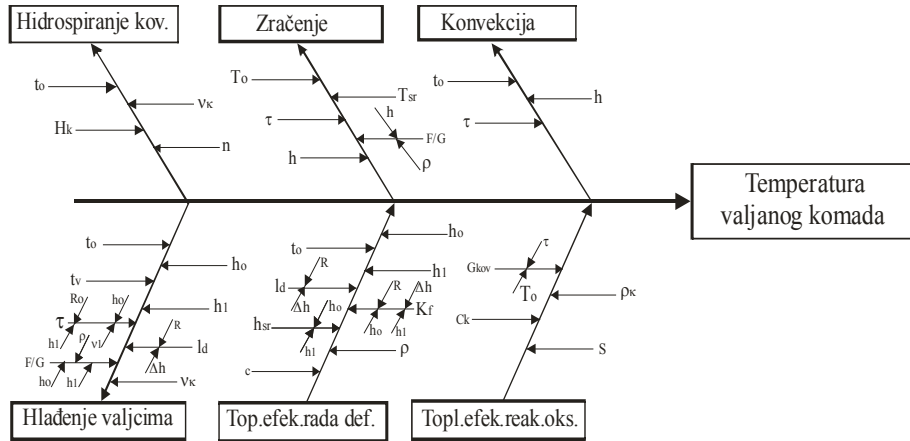
Proces stvaranja oksidne kovarine prilikom hlađenja komada na različitim djelovima stana praćen je egzotermnim reakcijama, koje povećavaju temperaturu površine metala koji se valja.

Promjena temperature površinskog sloja na račun egzotermnih reakcija oksidacije se može predstaviti kao:

Jednačina	Veličine	Liter. izvor	Broj
$\Delta t = 3.76 \times 10^3 G_{kov}/c_k S \rho_k$	G_{kov} - kovarina na pov. komada, g/cm ² c_k - topl. kapacitet valj. komada, J/kgK ρ_k - gustina valjanog komada, kg/cm ³	[3]	13
$G_{kov} = (12 - 17)\sqrt{\tau} \exp(-8800/T_0)$	S - dubina prodir. topl. egz. reakcija, cm τ - dužina oksidacije, min T_0 - temp. površine metala, K		14

Smatra se da se toplota egzotermnih reakcija lokalizuje u površinskom sloju i dubina njenog prodiranja u tijelo komada ne prelazi $S = (0.2-0.35)h$. Povećanje temperature pri obrazovanju kovarine prosječno iznosi 10-12°C, što je približno jednako sniženju temperature komada vodom za hlađenja, koja se sliva sa radnih i potpornih valjaka.

Navedene stavke bilansa i faktori koji se uzimaju u obzir za proračun temperaturnih promjena su prikazani na šemi 1.



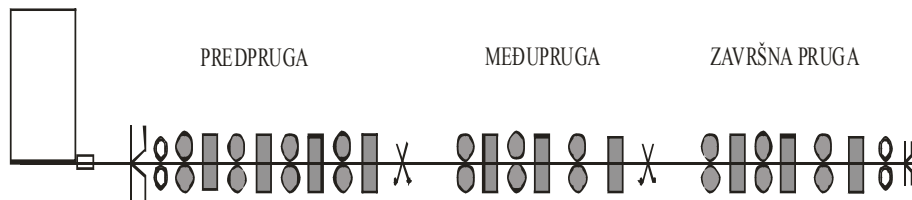
Slika 1 - Šema uticajnih veličina na temperaturu valjanog komada
 Figure 1 - Scheme of influential sizes at the temperature of rolled bar

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Valjaonička pruga i plan provlaka

Valjaonička pruga. Temperaturni parametri procesa toplog valjanja praćeni su na kombinovanoj valjaonici Željezare - Nikšić. Proces valjanja na ovoj valjaonici je kontinuiran. Gredice kvadratnog poprečnog presjeka se zagrijavaju u koračnoj peći, poslije čega slijedi skidanje kovarine mlazom vode pod pritiskom. Zatim se vrši valjanje na pruzi, koja se sastoji od dvadeset valjaoničkih stanova naizmjenično raspoređenih kao horizontalni i vertikalni i podijeljeni u tri grupe: predpruga sa 8 valjačkih stanova, međupruga i završna pruga sa po 6 valjačkih stanova. Dispoziciona šema pruge je prikazana na slici 2, a karakteristike stanova u tabeli 1.

ZAGREVNNA PEĆ



Slika 2 - Dispoziciona šema valjaoničke pruge
 Figure 2 - Disposition scheme of rolling train

Tabela 1- Osnovne karakteristike stanova valjaoničke pruge

Table 1- Basic characteristics of rolling train mills

Broj i oznaka stana	Prečnik valjka (mm)			Radna duž. valjka (mm)	Prenosni odnos	Snaga motora (KW)	Max. dozv. obr. moment (10^4 Nm)
	max.	nazivni	min.				
1H	580	530	490	800	28	550	17.5
2V	480	450	405	800	18	550	10.5
3H	480	450	405	800	16	550	10.5
4V	480	450	405	800	12.5	550	10.5
5H	480	450	405	800	10	550	10.5
6V	480	450	405	800	8	550	10.5
7H	480	450	405	800	10	550	10.5
8V	480	450	405	800	8	550	10.5
9H	410	380	340	630	5	550	6.4
10V	410	380	340	630	4	550	6.4
11H	410	380	340	630	3.15	550	6.4
12V	410	380	340	630	2.5	550	6.4
13H	410	380	340	630	3.15	550	6.4
14V	410	380	340	630	2.5	550	6.4
15H	340	320	290	500	1.6	550	2.0
16V	340	320	290	500	1.4	550	2.0
17H	340	320	290	500	1	550	2.0
18V	340	320	290	500	1/1.25	550	2.0
19H	340	320	290	500	1/1.4	550	2.0
20V	340	320	290	500	1/1.6	550	2.0

Kombinovana valjaonica proizvodi okrugle i rebraste profile, i to u koturovima i šipkama. Okrugli profili se proizvode u dimenzijama $\phi 8$ do $\phi 50$ mm, a rebrasti profili u dimenzijama: RA10; R12; R14; R16; R19; R22; R25; R28; R32 i R36 mm.

Plan valjanja. Plan provlaka i ostali parametri procesa valjanja za valjanje šipki prečnika $\phi 10$ i $\phi 20$ mm dati su u tabeli 2.

Valjanje polaznih kvadratnih gredica stranice 120mm se vrši u kutijastim kalibrima na prvih pet stanova (s tim što je na petom stanu prelazni kalibar). U nastavku su krug-oval-krug kalibri. Šipke prečnika $\phi 10$ mm se valjaju na svih 20 stanova, a šipke prečnika 20mm na 16 stanova, pri čemu su isključeni 11 i 12 stan na međupruzi, a 17 i 18 stan na završnoj pruzi. Plan valjanja za šipke $\phi 10$ i $\phi 20$ mm na predpruzi se neznatno razlikuje. Proračunate vrijednosti površina, deformacija i brzina za šipke $\phi 20$ mm su date u tabeli 2.

3.2. Mjerenje temperature

Eksperiment je obuhvatio mjerenje temperature duž linije valjanja za šipke $\phi 10$ i $\phi 20$ mm. Zagrijane gredice nakon vađenja iz peći su praćene duž čitave

pruge, sa mjerenjem temperature površine prije i poslije svakog stana. Mjerenje je vršeno sa optičkim pirometrom Irtec P1600 čiji je mjerni opseg 600-1600°C. Sva mjerenja su vršena sa faktorom emisivnosti $\epsilon=0.8$.

Program mjerenja je obuhvatio 5 kvaliteta čelika i to:

- Ž22U- čelik za proizvodnju valjane žice (praćeno je devet šarži)
- QSt 36-3 i 35B2 čelici za vijačnu robu (mjerenja su vršena na po jednoj šarži)
- Č4321- čelik za cementaciju (mjerenja su vršena na jednoj šarži)
- Č0551- betonski čelik (mjerenja su vršena na dvije šarže)

Polazna ispitivanja su obuhvatila ograničen broj šarži od ove dvije dimenzije, ali je program za $\phi 10$ u nastavku proširen na ~30 mjerenja od svih navedenih kvaliteta. Cilj dopunskog ispitivanja je bio da se precizno sagledaju stvarni intervali promjene temperature kao i odredi eventualni uticaj kvaliteta čelika na temperaturni profil.

Tabela 2- Plan valjanja za šipke prečnika $\phi 10$ i $\phi 20$ mm, i ostali parametri valjanja $\phi 20$ mm

Table 2- Plan of bar rolling with diameter 10 mm and 20 mm and another rolling parameters

STAN	KALIBAR		DIMENZIJE		POVRŠINA F (mm)	OTVOR VALJAKA S (mm)	DEFORMACIJA		BRZINA V (m/s)	RADNI PREČ. D _{sr} (mm)
	Broj	Oblik	HxB (mm)				REDUK.PRESJ. (F ₀ -F ₁ /F ₀)*100. %	KOE.F.IZD. μ		
			Ø10	Ø20						
			120x120	120x120						
1H	BK-I	□	96x132	96x130	11400	10.0	20.83	1.26	0.23	457.31
2V	BK-II	□	98x102	98x102	9540	10.0	16.32	1.19	0.27	358.97
3H	BK-III	□	74x109	74x109	7418	8.0	22.24	1.29	0.35	382.44
4V	BK-IV	□	75x82	75x82	5825	8.0	21.47	1.27	0.44	379.46
5H	BK-V	○	54x82	56x80	4180	8.0	28.24	1.39	0.61	398.25
6V	BK-VI	○	66x60	69x59	3200	8.0	23.44	1.31	0.80	396.26
7H	BK-VII	○	35x82	35x80	2330	6.0	27.19	1.37	1.10	419.37
8V	BK-VIII	○	52x44	51x44	1820	5.0	21.89	1.28	1.41	406.14
9H	BK-IX	○	23x62	30.5x60	1648	9.5	9.45	1.10	1.56	357.03
10V	BK-X	○	37x31	42.5x34	1080	10.5	34.47	1.53	2.38	353.74
11H		○	16x46							
12V		○	28x23							
13H	BK-XI	○	14x37	23x48	926	8.0	14.26	1.17	2.77	363.71
14V	K5/09	○	21x18	32.5x27	735	5.5	20.63	1.26	3.49	353.28
15H	K3/18	○	10.5x27	19x36.5	520	4.0	29.25	1.41	4.93	304.75
16V	K9/35	○	15x14	25x25	503.5	3.0	3.17	1.03	5.09	297.86
17H		○	8x20							
18V		○	12x11							
19H	K3/13	○	7x16	17.5x30	375	3.3	25.52	1.34	6.83	305.80
20V	K9/25	○	10.1x10.1	20x20	320	3.0	14.67	1.17	8.00	302.00

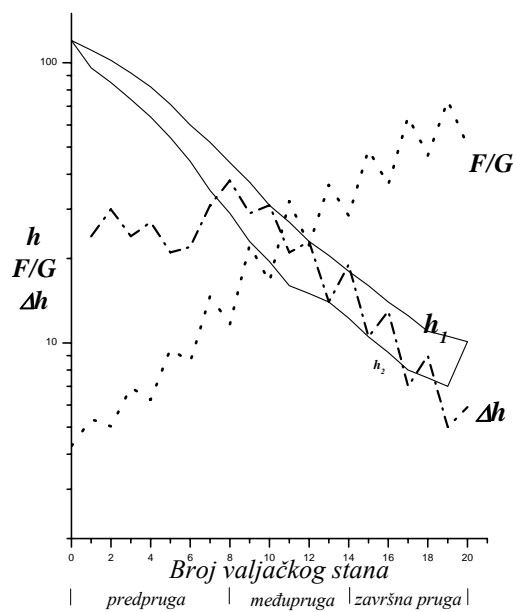
4. REZULTATI

4.1. Promjena dimenzija valjanih šipki

Dijagrami na slici 3 pokazuju redukciju visine komada ($\Delta h = h_0 - h_1$) i promjenu visine (h_1) i širine (h_2) nastale nakon redukcije do konačnih dimenzija za šipke prečnika $\phi 10\text{mm}$. Redukcija se prvo vrši na horizontalnom stanu zbog čega su formirane dvije linije (h_1 i h_2) za kompletan plan valjanja. U zadnjem provlaku se širenjem postiže završna dimenzija.

Vrijednosti redukcije visine (Δh) na predpruzi su u intervalu (21-38)mm. Prelazak na ovalni kalibar je praćen najmanjim redukcijama na predpruzi, neophodnim za formiranje prvog kružnog presjeka. U posljednja dva stana na predpruzi se redukcija visine povećava i na osmom stanju dostiže najveću vrijednost. Nastavak valjanja na među- i završnoj pruzi je sa opadanjem redukcije (redukcija širine i visine na slici nije posebno prikazana zbog čega dijagram ima oscilatorni oblik).

Odnos F/G (površina/masa) se kontinuirano povećava od 5.4 u prvom do 51 u završnom stanju saglasno promjenama izazvanim redukcijom visine odnosno izduženjem komada.



Slika 3 - Promjena dimenzija, redukcije i odnosa F/G pri valjanju šipki prečnika $\phi 10\text{mm}$

Figure 3 - Dimension changes, reductions and relations F/G during the bar rolling with diameter 10 mm

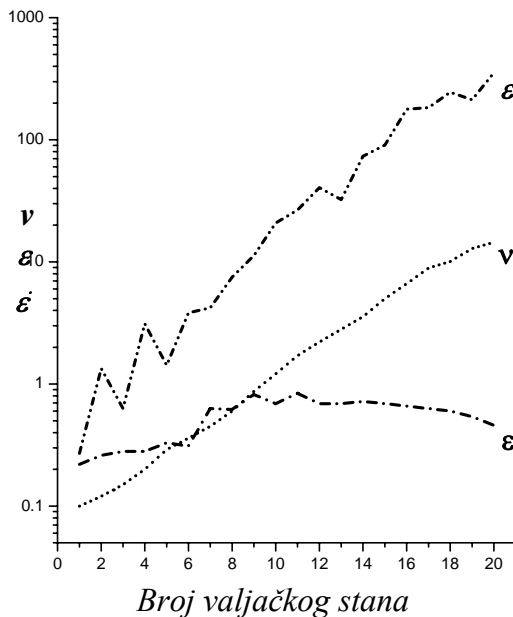
4.2. Stepeni i brzine valjanja

Dijagrami na slici 4 pokazuju promjenu stepena deformacije (ϵ), brzine valjanja (v) i brzine deformacije ($\dot{\epsilon}$) za valjanje šipke prečnika $\phi 10\text{mm}$.

Brzina valjanja (v) se konstantno povećava od 0.1m/s na prvom stanu do 14.5m/s na završnom stanu. Brzina na prvom stanu odgovara minimalnoj ulaznoj brzini koja obezbjeđuje da se komad ne podhladi ispod dozvoljenog intervala. Maksimalno predviđena brzina na završnom stanu je 18m/s . Niže brzine u odnosu na maksimalnu primjenjuju se zbog teškoća koje nastaju usled zatezanja ili stvaranja petlje.

Stepeni deformacije (ϵ) za navedeni plan redukcije visine su različiti za pojedine djelove pruge. Tako su najmanji za predprugu (od 0.22 do 0.63), najveći za međuprugu (od 0.69 do 0.84), a na završnoj pruzi su između vrijednosti na ova dva dijela (od 0.46 do 0.69). Unutar samih djelova pruge se uočava da stepeni deformacije neznatno variraju.

Dijagram brzina deformacije ima tok koji odgovara brzinama valjanja. Sama promjena je u intervalu od 0.27 do 354.44 s^{-1} .

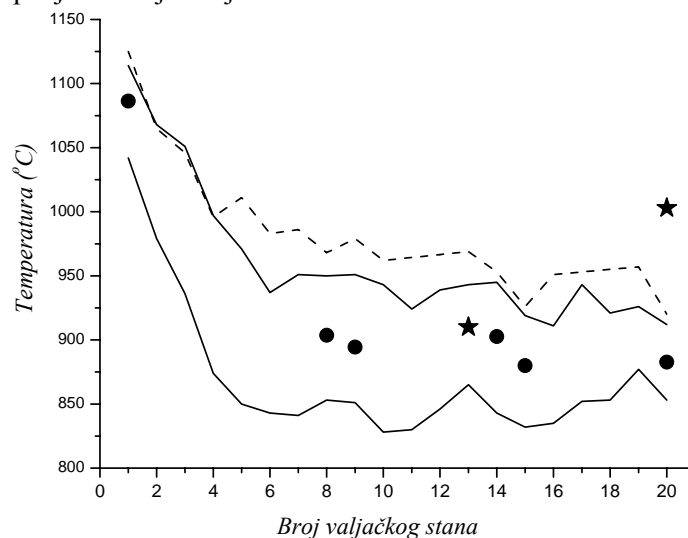


Slika 4 - Promjena stepena deformacije, brzine valjanja i brzine deformacije kod valjanja šipke prečnika $\phi 10\text{mm}$

Figure 4 - Change of deformation degree, rolling velocity and deformation velocity by rolling bar with diameter $\phi 10\text{mm}$

Temperaturni profil za šipke prečnika $\phi 10\text{mm}$ je prikazan na slici 5. Oblast rasipanja izmjerenih vrijednosti temperatura za ovaj prečnik je prikazana punim linijama. Odgovarajuće srednje vrijednosti za oblast su označene tačkama. Srednje vrijednosti temperature za šipke prečnika $\phi 20\text{mm}$ su prikazane isprekidanom linijom, a izmjerene temperature za šipke tretirane na liniji za vodeno hlađenje zvjezdicama.

Oblast temperatura površine koja je ograničena dijagramima najveće i najmanje izmjerene vrijednosti ima karakterističan tok sa veoma intenzivnim smanjenjem temperature u prvom dijelu pruge, da bi u ostalom dijelu pruge taj pad bio potpuno zaustavljen. Donja granica intervala već poslije četvrtog stana osciluje oko praktično konstantne vrijednosti (bliske 850°C) naizmjenično dostižući minime (posebno izraženi na 10-om i 15-om stanu) i maksimume (posebno izraženi na 13-om i 19-om stanu). Gornja granica intervala ima veoma sličan tok sa donjom, i srednju temperaturu blisku 950°C . Tako je najveća širina oblasti $\sim 100^{\circ}\text{C}$. U posljednja tri stana je ova oblast znatnije smanjena i iznosi $\sim 60^{\circ}\text{C}$. Prosječna širina oblasti za kompletnu prugu iznosi $\sim 85^{\circ}\text{C}$. Ako se navedena oblast posmatra u odnosu na srednju temperaturu (tačke na dijagramu) tada je rasipanje na kraju linije $\pm 30^{\circ}\text{C}$.



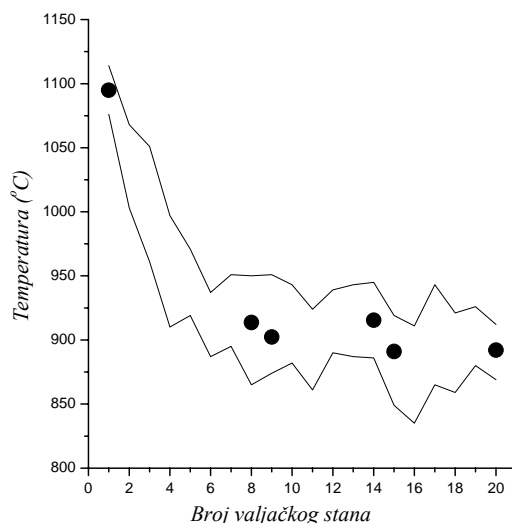
Slika 5 - Oblast izmjerenih temperatura površine valjanih šipki prečnika $\phi 10\text{mm}$ (pune linije) i proračunate srednje vrijednosti (tačke) duž pruge, srednje vrijednosti temperature površine za šipke prečnika $\phi 20\text{mm}$ (isprekidane linije) i temperature površine šipke tretirane vodenim hlađenjem (zvjezdice)

Figure 5 - Area of surface measured temperatures by rolled bars with diameter 10 mm (full line) and calculated average values (full stop) along the train, average values of surface temperatures of bars with diameter 20 mm (interrupted lines) and surface temperature of bars treated by water cooling (stars)

Rezultati dobijeni samo za čelik Ž22U se ne razlikuju od oblika za sve kvalitete čelika, što se vidi sa dijagrama na slici 6. Tok i oblik dijagrama se jedino razlikuju po širini intervala. Prosječna širina intervala je 63°C , a najmanja je na završnom stanju i iznosi 43°C . Najmanje rasipanje vrijednosti temperature u odnosu na srednju vrijednost je na završnom stanju i iznosi $\pm 22^{\circ}\text{C}$.

Kako je ispitivanje obuhvatilo mjerenje velikog broja valjanih šipki, zaključak o intervalu temperatura je dovoljno pouzdan.

Mjerenje temperatura površine kod pokretnih šipki sa navedenim brzinama uvijek rezultira znatnim rasipanjem rezultata. Glavni razlozi za rasipanje su stanje površine kod mjerenja optičkim pirometrom, odnosno trenutno podhlađenje na stanovima izazvano vodom za hlađenje valjaka. Zbog toga je u analizi rezultata neophodno posmatrati interval temperatura.



Slika 6 - Interval izmjerenih temperatura duž valjaoničke pruge za $\phi 10\text{mm}$, čelik Ž22U

Figure 6 - Interval of measured temperatures along rolling train ($\phi 10\text{ mm}$, steel Ž22U)

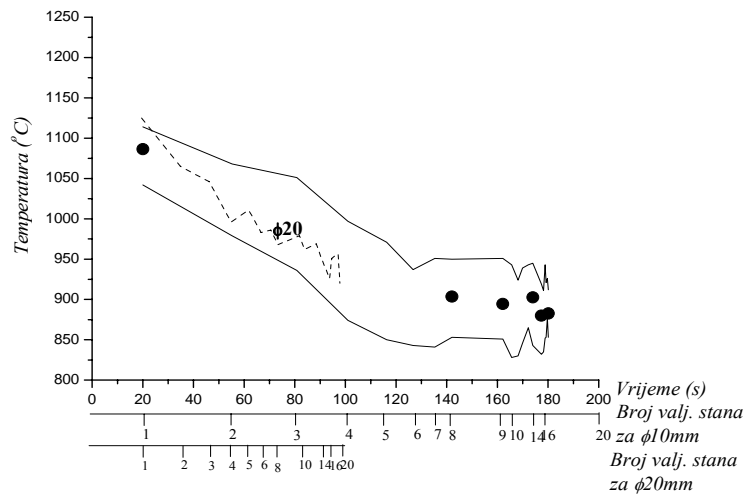
U cilju analize karakterističnog toka promjene temperatura duž pruge, na slici 7 prikazani su rezultati sa vremenskom osom. Interval temperaturnih promjena za $\phi 10\text{mm}$ predstavljen je punom linijom, a srednje temperature tačkama.

Ukupno vrijeme valjanja za $\phi 10\text{mm}$ iznosi 180s, od čega se na predprugu utroši 142s ili $\sim 79\%$, na međuprugu 32s ili 18%, a na završnu prugu 6s ili 3% od ukupnog vremena valjanja. Ako se analizira smanjenje srednje temperature duž pruge onda je ono na predpruzi 90%, a preostalih 10% se ostvaruje na zadnjim stanovima.

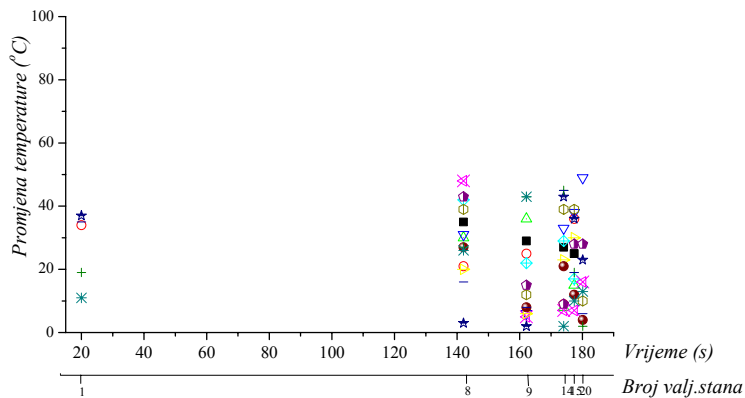
Vremenske ose za $\phi 10$ i $\phi 20$ mm se ne poklapaju sa brojem stanova zbog različitih brzina valjanja. Srednja temperatura za $\phi 20$ mm je na slici 7 prikazana isprekidanom linijom. Očigledna razlika završnih temperatura od 37°C je posledica navedenih razlika vremena. Kraće ukupno vrijeme valjanja za $\phi 20$ mm uslovljava i veću završnu temperaturu.

Promjena temperature (Δt) po stanu kod valjanja šipki $\phi 10$ mm na mjestima ulaza i izlaza iz predpruge, međupruge i završne pruge je prikazana na slici 8. Interval od $11-37^{\circ}\text{C}$ izmjeren na ulazu u prugu se neznatno proširi na $2-50^{\circ}\text{C}$ u ostalim djelovima pruge, što znači da je promjena na ovim položajima praktično ravnomjerna. Naročito je to uočljivo na kompletnoj među- i završnoj pruzi.

Uticaj kvaliteta čelika u svim rezultatima se nije mogao pouzdano izdvojiti.



Slika 7 - Rezultati promjene temperature u toku vremena valjanja na pruzi
Figure 7 - Change of surface temperature during the rolling at the train



Slika 8 - Smanjenje temperature Δt u toku vremena valjanja za $\phi 10$ mm
Figure 8 - Decrease of surface temperature Δt during the rolling for diameter 10mm

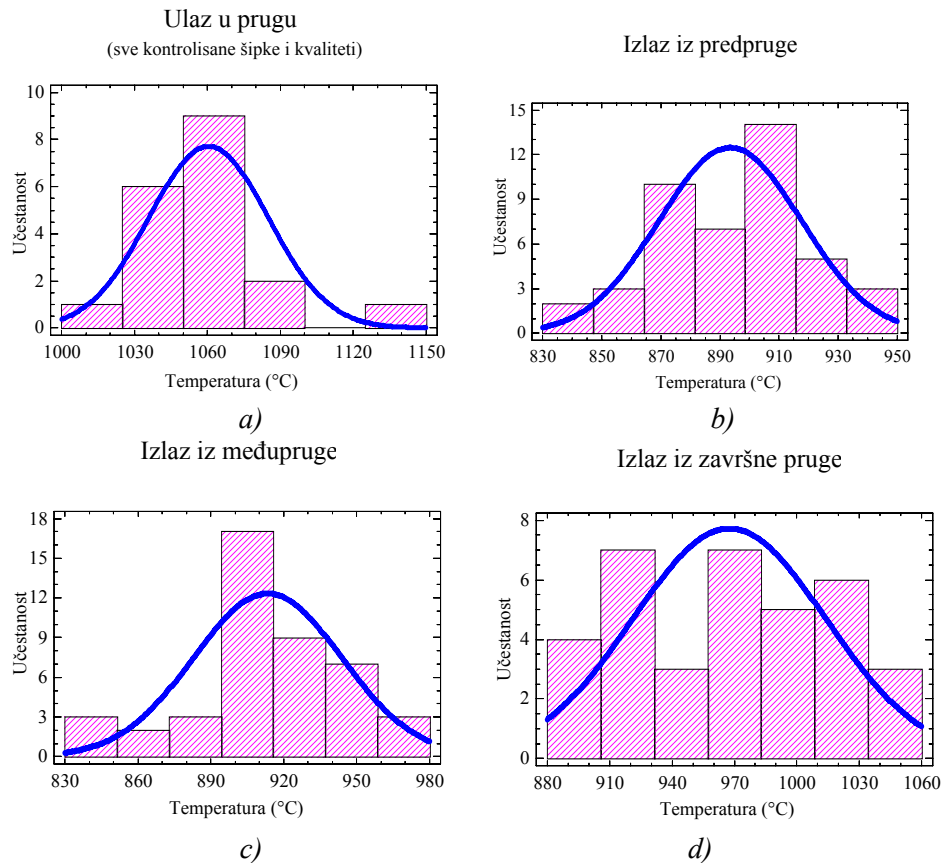
4.4. Statistička obrada rezultata

Izmjerene temperature za $\phi 10\text{mm}$ na položajima prikazanim na slici 8 su statistički obrađene na programu Statgraphics Plus u cilju formiranja krive raspodjele temperatura i određivanja statističkih parametara.

Rezultati takve obrade su prikazani na slici 9. Histogrami su konstruisani sa podjelom od 10°C i intervalima od 24°C što odgovara standardnoj devijaciji, kao i tačnosti očitavanja optičkog pirometra u mjernom opsegu. Dobijeni rezultati i krive distribucije su različiti za izdvojene položaje na pruzi.

Temperaturne promjene se ponašaju približno po krivoj normalne raspodjele na ulazu u prugu (slika 9a). Učestanost je u intervalu $1030\text{-}1090^\circ\text{C}$, znači sa intervalom od 60°C . Srednja temperatura je $\sim 1060^\circ\text{C}$, odnosno srednji pad temperature $\sim 60^\circ\text{C}$.

Izlaz iz predpruge je karakterističan po istoj širini intervala dominantne učestanosti od $\sim 60^\circ\text{C}$ ($870\text{-}930^\circ\text{C}$), slika 9b.



Slika 9 - Statističke krive raspodjele temperatura na karakterističnim mjestima valjaoničke pruge

Figure 9 - Statistical curves of temperature distribution at characteristic places of rolling train

Raspodjela izmjerenih temperatura na izlazu iz međupruge i dalje pokazuje sličnost sa normalnom raspodjelom, čak se i interval dominantne učestanosti bitno ne mijenja u odnosu na predhodni mjerni položaj, ali se uočljivo oblast učestanosti nalazi na većim temperaturama od izlaza iz predpruge, slika 9c.

Završetak valjanja (izlaz iz završne pruge) je karakterističan po širokom intervalu rasipanja i to od 890 do 1050°C. Učestanost se naizmjenično povećava i smanjuje pa se interval ne može dopunski smanjiti. Kao i u predhodnom slučaju i ovdje je uočljiv trend povećanja donje i gornje granice temperatura u odnosu na međuprugu.

Na taj način je dopunski potvrđeno da je dominantno smanjenje temperature valjanog komada u dijelu od peći do izlaza iz predpruge. Promjene na ostalim segmentima pruge su ograničene i više specifične po širenju temperaturnog intervala nego po stvarnom smanjenju temperature.

4.5. Proračun temperature

Proračun temperature duž linije valjanja urađen je za $\phi 20$ mm, čelik Ž22U. Iz elemenata bilansa toplote su izdvojeni: zračenje, konvekcija, hlađenje valjcima i toplotni efekat rada deformacije. Pruga je podijeljena po zonama slobodnog zračenja i konvekcije, na djelovima između valjačkih stanova, i hlađenja valjcima i zagrijavanja usljed rada deformacije na samim stanovima.

Primjer proračuna za dvije zone: peć-stan1 i valjanje na stanu 1H je dat u tabeli 3.

Tabela 3 - Proračunate promjene temperature u zonama I i II

Tabela 3 - Calculated values of temperature change in zones I and II

ZONA I: Peć-stan 1 BILANSNE STAVKE ZRAČENJE KONVEKCIJA				ZONA II: Valjanje na stanu 1H BILANSNE STAVKE VALJCI DEFORMACIJA			
PODACI:				PODACI:			
$\tau=19.05s$				$h_0=120mm$		$h_1=96mm$	
$t_0=1150^\circ C$				$t_0=1138.39^\circ C$		$t_v=70^\circ C$	
$h=120mm$				$v=0.23m/s$		$l_d=85.95mm$	
JEDNAČINA	REZULTAT	JEDNAČINA	REZULTAT	JEDNAČINA	REZULTAT	JEDNAČINA	REZULTAT
(4)	10.85°C	(6)	0.76°C	(8)	15.52°C	(9)	2.02°C

Analogno predhodnim primjerima vrši se proračun promjene temperature duž cijele valjaoničke pruge i dobijaju se rezultati koji su prikazani u zbirnoj tabeli 4.

Toplotni bilans na ovim stanovima pokazuje da je povećanje temperatura usljed toplotnog efekta rada deformacije veće od smanjenja temperature valjcima. Tako se ukupno, temperatura poveća za izračunatu vrijednost koja je prikazana u zgradama.

Vrijednosti promjene temperature kod primjene ostalih jednačina iz teorijskog dijela, za pojedine bilansne stavke, su skoro identične navedenim u tabeli 4, izuzev rezultata za pad temperature komada na račun toplotne razmjene sa valjcima po jednačini (7), koji je nerealno visok.

Kumulativna promjena temperature po stavkama bilansa iz tabele 4 je prikazana na slici 10.

Tabela 4 - Proračunate vrijednosti promjene temperature valjanog komada $\phi 20\text{mm}$ izazvane zračenjem, konvekcijom, kontaktom komada sa radnim valjcima i energijom deformacije

Table 4 - Calculated values of temperature change of rolled piece with diameter 20mm caused by radiation, convection, piece contact with worked rollers and deformation energy

Položaj	Temperatura T (°C)	Pad temp. usled zrač. (°C)..... (4)	Pad temp. usled konv. (°C)..... (6)	Pad temp. radni valjci (°C)..... (8)	Prir.temp. usl.en.def. (°C)..... (9)	Ukupan pad temp. (°C)
	1150.00					
peć-stan1	1138.39	10.85	0.76			11.61
stan 1	1124.89			15.52	2.02	13.50
stan1-stan2	1114.06	10.08	0.74			10.83
stan 2	1107.05			9.03	2.02	7.01
stan2-stan3	1099.68	6.85	0.52			7.37
stan 3	1088.87			13.90	3.09	10.81
stan3-stan4	1081.71	6.64	0.53			7.17
stan 4	1076.75			7.66	2.70	4.96
stan4-stan5	1071.32	5.02	0.41			5.42
stan 5	1062.48			12.61	3.77	8.84
stan5-stan6	1057.44	4.65	0.39			5.04
stan 6	1054.93			5.74	3.23	2.51
stan6-stan7	1051.88	2.82	0.24			3.06
stan 7	1049.19			13.60	10.91	2.69
stan7-stan8	1044.89	3.96	0.34			4.30
stan 8	1043.67			9.36	8.14	1.22
Σpredpruga		50.87	3.93	87.42	35.88	106.33
stan8-stan9	1034.58	8.36	0.73			9.08
stan 9	1031.40			11.52	8.34	3.18
stan9-stan10	1028.09	3.04	0.27			3.31
stan 10	1029.37			6.29	7.56	(1.27)*
stan10-stan13	1023.69	5.21	0.47			5.68
stan 13	1024.18			10.59	11.08	(0.49)*
stan13-stan14	1020.15	3.69	0.33			4.03
stan 14	1021.41			7.86	9.12	(1.26)*
Σmeđupruga		20.30	1.80	36.26	36.10	22.26
stan14-stan15	1016.02	4.94	0.45			5.39
stan 15	1017.19			9.54	10.72	(1.17)*
stan15-stan16	1014.99	2.02	0.19			2.20
stan 16	1013.60			7.41	6.03	1.39
stan16-stan19	1008.59	4.59	0.42			5.01
stan 19	1007.40			8.25	7.06	1.19
stan19-stan20	1005.38	1.84	0.17			2.02
stan 20	1005.65			6.29	6.56	(0.27)*
Σzavršna pruga		13.39	1.23	31.49	30.37	15.76
Σpruga		84.54	6.95	155.19	102.34	144.34

Dijagrami pokazuju znatnu razliku temperaturnih promjena izazvanih pojedinim stavkama bilansa toplote. Očigledno su primjenljivi i poznati stavovi da je:

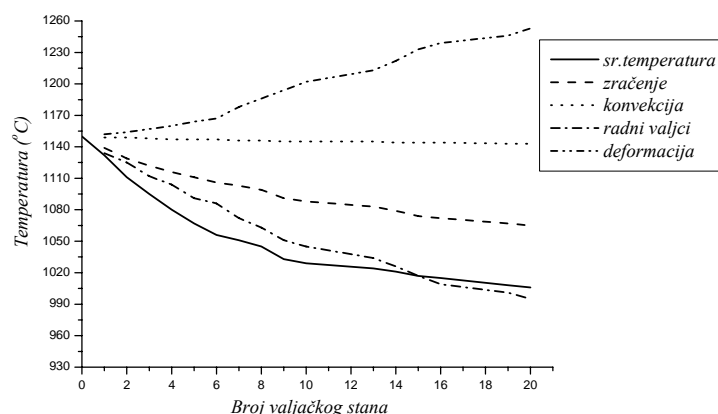
- zanemarljiv uticaj konvekcije,
- povećan uticaj zračenja,
- dominantan uticaj hlađenja valjcima,

kod procesa odvođenja toplote, kao i

- izrazito povećanje temperature usljed toplotnog efekta rada deformacije.

Karakteristični su, međutim, dobijeni odnosi pojedinih stavki na djelovima pruge:

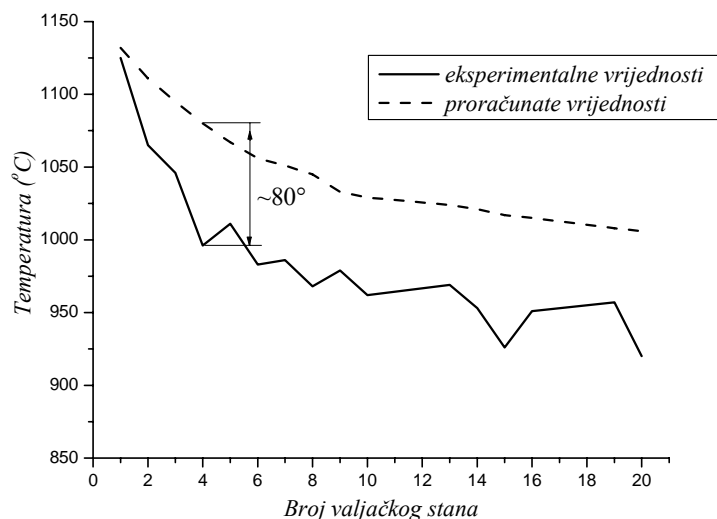
- Smanjenje temperature zračenjem, konvekcijom i valjcima je 56-60% na predpruzi, 24-26% na međupruzi i 16-20% na završnoj pruzi (od ukupnog smanjenja za svaku od ovih stavki);
- Povećanje temperature usljed toplotnog efekta rada deformacije je raspoređeno sa 35% na predpruzi i međupruzi, a 30% na završnoj pruzi. Ova povećanja kompenzuju smanjenje temperatura usljed hlađenja za 25%, 62% i 66% na djelovima pruge, respektivno;
- Ukupno smanjenje polazne temperature je $\sim 144^{\circ}\text{C}$ ($\sim 12.5\%$ od polazne temperature) i ostvaruje je sa $\sim 106^{\circ}\text{C}$ ($\sim 74\%$ od ukupnog pada temperature) na predpruzi, $\sim 22^{\circ}\text{C}$ ($\sim 15\%$) na međupruzi i $\sim 16^{\circ}\text{C}$ ($\sim 11\%$) na završnoj pruzi;
- Dijagram ukupnog smanjenja temperature je veoma blizak dijagramu smanjenja temperature izazvanog hlađenjem valjcima.



Slika 10 - Promjena temperature proračunate po jednačinama za izdvojene bilansne stavke

Figure 10 - Temperature changes calculated on equations for separated balance items

Uporedni dijagrami za proračunatu i izmjerenu temperaturu za šipke prečnika $\phi 20\text{mm}$ su prikazani na slici 11. Očigledna razlika između ova dva dijagrama je već na prvom stanju pruge i ona se povećava do četvrtog stana na kome dostiže $\sim 80^\circ\text{C}$. U nastavku pruge se ova razlika zadržava približno konstantnom. Ovakva razlika upućuje na zaključak da korišćene jednačine nijesu dovoljno pouzdane za proračun završnih temperatura valjanja. Korišćenje proračunate temperature umanjene za identifikovanu razliku zahtijeva dopunsku provjeru. Time se egzaktna kontrola temperaturnog režima pruge može vršiti prvenstveno mjerenjem temperature. Iz navedene analize eksperimentalnog dijela proizilazi da je koncepciju (mjerne položaje) potrebno prilagoditi dimenzijama valjane šipke. Svakako je prvu informaciju o temperaturi potrebno dobiti na predpruzi i to ne prije 6-og stana. U nastavku se temperatura može kontrolisati na još dva mjerna položaja koja mogu biti izlazi iz među- i završne pruge.



Slika 11 - Upoređenje eksperimentalnih i proračunatih vrijednosti promjene temperature pri valjanju šipki prečnika $\phi 20\text{mm}$

Figure 11 - Comparison of experimental and calculated values of temperature change during the bar rolling with diameter 20 mm

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je proučavan temperaturni režim za proces kontinuiranog valjanja čeličnih šipki na kombinovanoj valjaonici i vršena provjera mogućnosti primjene postojećih jednačina za proračun temperaturnih promjena.

- Dobijeni eksperimentalni rezultati za valjane šipke prečnika $\phi 10\text{mm}$ su pokazali da se promjena temperatura dominantno realizuje na dijelu predpruge $\sim 90\%$, a na ostalim djelovima pruge preostalih $\sim 10\%$. Ovakva promjena je direktno uslovljena dužinom vremena trajanja valjanja koje otpada na predprugu ($\sim 80\%$).

- Kod šipke prečnika $\phi 20\text{mm}$ su nešto drugačiji odnosi i oni su u potpunosti povezani sa vremenom valjanja koje je kraće zbog većih brzina valjanja. Tako se proces valjanja ovih šipki završi za $\sim 100\text{s}$ što odgovara valjanju na 4-om stanu kod šipke prečnika 10mm .

- Interval završnih temperatura je $\sim 60^\circ\text{C}$ ($850\text{-}910^\circ$).

- Proračun daje ograničenu tačnost u odnosu na eksperiment, tako da se kod šipke prečnika 20mm razlike temperature uvećavaju do 4-og stana dostižući $\sim 80^\circ$. U nastavku se ova razlika zadržava konstantnom do kraja valjanja.

- Pouzdano poznavanje temperatura zahtijeva njihovo mjerenje i to najmanje na tri položaja.

LITERATURA

- [1] Morales R. D., Toledo M., Steel Research, 1991, No.10, 433-440.
- [2] Kaspar R., Fluss P., Steel Research, 1991, No.11, 501-506.
- [3] Konavalov Yu. V. "Račun parametara listavoj prokatki", Sprovočnik, Metallurgija, Moskva, 1996, str.113-185.
- [4] Radović S. Magistarski rad, Metalurško-tehn. fakultet, Podgorica, 2004, u pripremi.
- [5] Serdinski F., Journal of Iron and Steel Institute, 1973, N°3, p 197-203.
- [6] Meerović I. M. Stal, 1977, No 2., s 151-154.
- [7] Astahov I. G. Novie tehnologičeskie processy obrabotki metallov, Naučnie trudi MISiS. Metallurgija, Moskva, 1977, N°12, s 31-36.
- [8] Zjuzin V. I. Bjuulletnet instituta "Černometinformacija, 1979. N°8, s 41-42.