

# Računalniško podprta simulacija plana valjanja trakov na valjalnem stroju Steckel

## Computer Aided Simulation of the Pass Schedule of Strip Rolling on the Steckel Rolling Mill

P. Fajfar<sup>1</sup>, R. Turk, V. Nardin, OMM, NTF, Univerza v Ljubljani  
R. Robič, Acroni, d.o.o., Jesenice

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-01-17

*Izdelana je programska oprema 'OPVALST' za simulacijo in optimiranje procesa toplega valjanja širokih trakov na valjalnem stroju Steckel. Omogoča izračun dinamičnega plana valjanja, ki upošteva kontinuirne spremembe pogojev valjanja med enim prevlekom, tako z vidika termomehanskih sprememb valjanega materiala kot tudi geometrijskih sprememb aktivne valjčne reže. Termomehanski in energetske-obremenitveni parametri valjanja se izračunavajo kontinuirno za poljubni časovni korak po celotni dolžini traka. Programska oprema je bila verificirana na valjalnem stroju Steckel v ŽJ - Acroni, d.o.o.*

*Ključne besede: postopki valjanja in valjarne, trakovi, matematično modeliranje, računalniško programiranje*

*The OPVALST software for simulation and for optimisation of the width strip rolling technology on the reversing Steckel rolling mill was made. The topic of the program was the dynamic pass schedule as a function of continuous changes of the rolling conditions during a single pass for the whole length of the workpiece from the viewpoint of thermomechanical changes in the workpiece, as well as the geometrical changes in the active roll gap. For each time interval  $\Delta t$ , all thermomechanical rolling parameters were known. It was verified by industrial measurements in the Slovenian Steel Company Acroni d.o.o.*

*Key words: rolling processes and rolling mills, sheets, mathematical modeling, computer programming*

### 1 Uvod

Izdelana je bila programska oprema OPVALST<sup>1,2</sup> za simulacijo in optimiranje procesa toplega valjanja širokih trakov na valjalnem stroju Steckel v Železarni Jesenice, Acroni, d.o.o. Valjalni stroj Steckel je reverzni štirivaljčni stroj, namenjen toplemu valjanju širokih trakov. Vložek je predtrak debeline od 0,016 do 0,02 m, ki je bil predhodno izvaljan na valjalnem stroju slabing. Najmanjša končna debelina traka je približno 0,0024 m. Pri valjanju se trak navija na vroča navijalnika, ki sta postavljena na vhodni in izhodni strani stroja. Navijalnika se nahajata v pečeh, da preprečujeta prevelike toplotne izgube traka. Po zadnjem prevleku se trak transportira preko hladilne linije in se končno navije na hladnem navijalniku.

Cilj optimiranja je doseganje optimalne geometrije tople valjanih trakov na valjalnem stroju Steckel glede na spremembe pogojev valjanja. Omogoča izračun dinamičnega plana valjanja, ki upošteva kontinuirne spremembe pogojev valjanja med posameznim prevlekom, tako z vidika termomehanskih sprememb valjanega materiala kot tudi geometrijskih sprememb aktivne valjčne reže, kar je značilnost tehnologije reverzirnega valjanja trakov. Termomehanski in energetske-obremenitveni parametri valjanja se izračunavajo kontinuirno za poljubni časovni korak po celotni dolžini traka. Program je razvit za potrebe kontrole tehnoloških parametrov valja-

nja pri toplem valjanju trakov v valjarni Acroni, d. o. o. - Železarna Jesenice.

### 2 Programska oprema OPVALST

Programska oprema je uporabniku prijazna, saj lahko z uporabo menujev določi geometrijo predtraka, število prevlekov, končno debelino traka, njegove debeline in obrate valjev za posamezne prevleke, kvaliteto valjanega materiala, premer in mehansko bombiranost valjev, začetno temperaturno polje valjev in temperaturo okolice. Dostop do baz vhodnih in izhodnih podatkov, zapisanih v obliki AISCII, je prost.

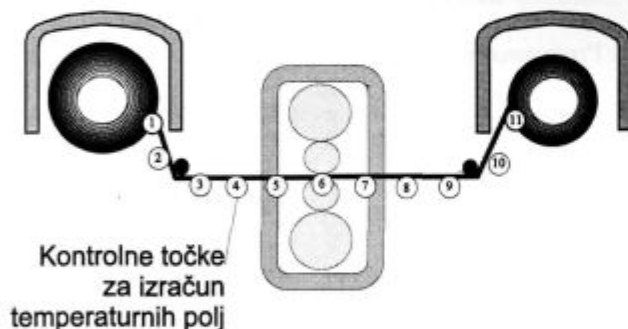
Programska oprema OPVALST ima vgrajene naslednje modele:

1. hitrost valjanja
2. 2D temperaturni profil traka (**Slika 2**)
3. 2D temperaturni profil valja
4. sila valjanja (**Slika 3**)
5. moment valjanja
6. upogib valjev
7. termična bombiranost valjev (**Slika 4**)
8. ravnost traka
9. obremenitev glavnega pogonskega motorja (I, U, n)
10. obremenitev pogonskih motorjev obeh navijalnikov (I, U, n)
11. aktivna valjčna reža
12. geometrija traka

Razdalja med sredino enega navijalnika in sredino valjalnega stroja je razdeljena na pet enakomernih razdelkov, ki so kontrolne točke za izračun tempera-

<sup>1</sup> Dr. Peter FAJFAR, dipl. ing. met.  
Univerza v Ljubljani  
NTF - Odd. za materiale in metalurgijo  
Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

turnih polj. Numeriranje točk poteka od levega navijalnika, ki ima vrednost ena do desnega, ki ima vrednost enajst (Slika 1). Tekoče število šest pomeni deformacijsko cono. Na strani odvijanja se temperature izračunavajo za vse kontrolne točke, na strani navijanja pa je razdelitev razdalje med valjalnim strojem in navijalnikom, zaradi zakona o konstantnosti volumna odvisna od hitrosti navijanja. Ko trak prispe do navijalnika, se izračuna povprečna temperatura traka (v točki ena ali enajst) in ta predstavlja temperaturo novega navoja. Ko trak zapusti navijalnik, se generira homogena temperaturno polje traka (v točki ena ali enajst), ki je enako temperaturi navoja, ki se je odvil. Temperaturno polje traka, ki zapusti navijalnik, kontinuirno spremljamo do navitja, kjer se pretvori v točkovno temperaturo enega navoja. V deformacijski coni se izračunavajo (točka šest) temperaturno polje traka in delovnega valja, sila in moment valjanja, oblika aktivne valjčne reža (upogib, skok in termična bombiranost valjev), ravnost traka ter obremenitev glavnega pogonskega motorja (tok, napetost, obrati, moč). Prav tako se za vsak časovni korak  $\Delta t$  izračunavajo obremenitve motorjev navijalnikov, število navojev in napetosti, ki nastopajo v traku zaradi vleka oz. protivleka, ter dolžini traka, ki se odvijaja, in traka, ki se navija.



Slika 1: Valjalni stroj Steckel  
Figure 1: Steckel rolling mill

### 3 Eksperimentalni del

Z modelnimi raziskavami smo celoten proces valjanja razdelili na podprocese. Opisani so z algoritmi, ki temeljijo na fizikalni razlagi procesa valjanja. Osnova za verifikacijo modelnih raziskav so tehnološke in laboratorijske raziskave.

Za izvedbo tehnoloških raziskav je bila ustanovljena skupina treh partnerjev: NTF - Oddelek za materiale in metalurgijo, SŽ - ŽJ Acroni, d.o.o. in Danieli - United (Italija). Tehnološke raziskave so dale bistvene podatke o že izvajani tehnologiji in o specifičnosti te valjalne proge, katere glavni problem je zagotavljanje geometrijsko neoporečnega traka, tako glede ravnosti kot tudi bombiranosti po vsej njegovi dolžini.

Z laboratorijskimi raziskavami na simulatorju termomehanskih stanj Gleeble 1500 smo z variranjem termomehanskih parametrov v celotnem območju valjanja dobili podatke o vedenju valjanega materiala v plastičnem stanju. Koeficiente za simulacijo napetosti tečenja po Hajduku smo dobili z večstopenjsko linearno regresijo.

### 4 Rezultati in razprava

Programsko opremo OPVALST smo preverili s simulacijo valjanja dveh trakov kvalitete AISI 304 in ELMAG, ki sta se med seboj razlikovala po naslednjih tehnoloških parametrih (Tabela 1):

Tabela 1: Primerjava tehnoloških parametrov valjanja

	AISI 304 07.12.1995 Št.: 17	ELMAG 09.02.1996 Št.: 116
masa (kg)	6630	8080
širina (mm)	1040	1060
končna debelina (mm)	3,0	2,4
začetna temp.valjanja (°C)*	1068	1011
končna temp.valjanja (°C)**	960	900
obrati motorja (vrt./min)	105,112,113, 114,105	97,97,152, 172,180
čas valjanja (s)	250	285
fazna premena	NE	DA
bombiranost valjev (µm)	0	-80

Legenda:

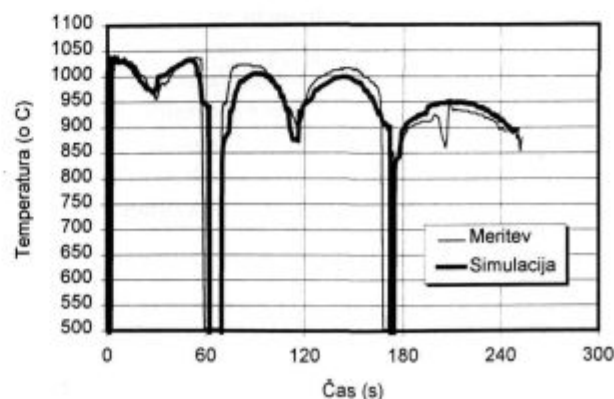
\* - temperatura glave traka pred prvim prevlekom

\*\* - temperatura sredine traka pred zadnjim prevlekom

Simulaciji valjanja obeh trakov smo statistično obdelali. V Tabeli 2 so podane povprečne vrednosti absolutnih napak  $\Delta Y$  in relativnih napak  $r$  posameznih veličin glede na čas valjanja za celotno valjanje, korelacijski koeficient  $R$  ter povprečna relativna napaka za celotno simulacijo  $r'$ .

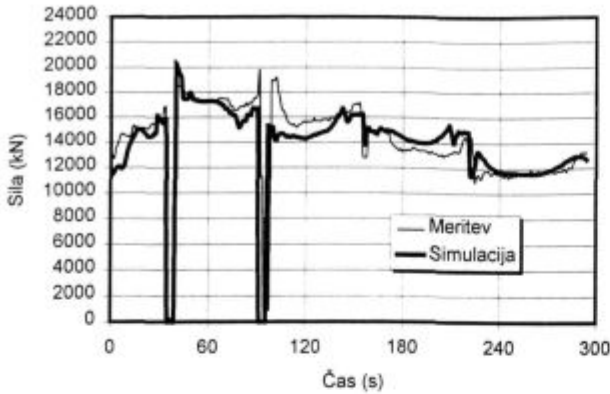
Povprečna napaka celotne simulacije za kvaliteto AISI 304 je bila 6%, za Elmag pa 5%. Pri kvaliteti AISI

AISI 304, 07.12.1995, Št.:17



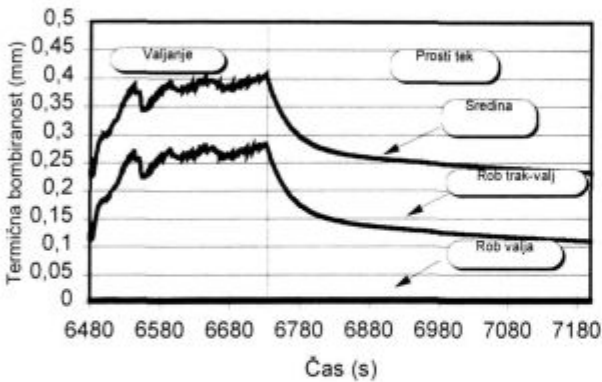
Slika 2: Temperatura traka  
Figure 2: Strip temperature

Elmag, 09.02.1996, Št.:116



Slika 3: Sila valjanja  
Figure 3: Rolling force

AISI 304, 07.12.1995, Št.17



Slika 4: Razvoj celotne termične bombiranosti delovnega valja za deseti trak

Figure 4: Evolution of the total thermal crown of the work roll for the 10<sup>th</sup> pass

Tabela 2: Statistična ocena matematičnih modelov

Veličina	AISI 304			Elmag		
	$\Delta Y$	r(%)	R	$\Delta Y$	r(%)	R
Sila (kN)	1334	9,3	0,9051	752	5,2	0,9441
Moment (kNm)	42	16,9	0,9706			
Vhodna temperatura (°C)				18	2,0	0,9646
Izhodna temperatura (°C)	18	1,87	0,9812			
Debelina traka (mm)	0,09	1,8	0,9975	0,16	4,6	0,9990
Obrati motorja(vrt./min)	3	3,8	0,9625	4	4,2	0,9849
Tok motorja (kA)	0,88	18,6	0,9174	0,77	13,2	0,9136
Napetost motorja (V)	21	4,0	0,9801	18	3,5	0,9835
Obrati levega navijalnika (vrt./min)	1	2,8	0,9966	1	3,6	0,9945
Obrati des. navijalnika (vrt./min)	4	3,9	0,9890	3	5,4	0,9870
Napetost lev.navijalnika(V)	3,6	3,3	0,9796	4	4,0	0,9871
Napetost des.navijalnika(V)	3,5	3,3	0,9943	6	4,3	0,9935
r' (%)		6,0		5,0		

Opombe:

- Moment ni bil merjen.
- Meritev vhodne temperature traka je bila motena. Signal ni primeren za obdelavo.
- Izhodna temperatura traka ni bila merjena.

304 so večja odstopanja pri sili in momentu valjanja ter pri toku glavnega pogonskega motorja. Približno 9% napaka pri simulaciji sile je nastala v največji meri zaradi literaturnih podatkov za napetost tečenja. Dokaj velika je bila relativna napaka pri simulaciji momenta valjanja, saj je znašala 16,9%. Vzrok za to je odvisnost momenta od sile valjanja ter pri določitvi ročice sile valjanja z regresijo: Tok glavnega pogonskega motorja je funkcija vseh energetsko-obremenitvenih parametrov. Zaradi tega je bila povprečna napaka pri simulaciji toka motorja tudi največja. Podobna odstopanja so bila tudi pri valjanju kvalitete Elmag, pri čemer je bila simulacija sile uspešnejša. To si razlagamo s korektno izvedenimi laboratorijskimi preizkusi za določitev napetosti tečenja. Sorazmerno z manjšo napako pri sili valjanja je tudi manjša napaka pri simulaciji toka glavnega pogonskega motorja. Žal pa v tem primeru moment valjanja ni bil registriran.

## 5 Sklepi

Izdelana je bila programska oprema OPVALST za simulacijo in optimiranje procesa toplega valjanja trakov na valjalnem stroju Steckel. V ta namen so bile opravljene obsežne in zahtevne meritve v Topli valjarni trakov, Acroni, d.o.o. Ustreznost programske opreme je bila preverjena s simulacijo valjanja trakov dveh kvalit: AISI 304 in Elmag, ki se med seboj bistveno razlikujeta (Tabela 1) po tehnoloških parametrih valjanja, izhodni in končni geometriji valjanca ter razvoju mikrostrukture. Uspešnost simulacije je bila potrjena s statistično analizo merjenih in izračunanih parametrov valjanja. Uspešna simulacija valjanja trakov je med drugim tudi rezultat dobre analize tehnologije, ki se izvaja na valjalnem stroju Steckel.

Programska oprema OPVALST je v fazi, ko uporabnik z variiranjem krmilnih faktorjev (število prevlekov, redukcije debeline traka, hitrosti valjanja, začetna temperatura traka in mehanska bombiranost valjev) skuša doseči optimalen plan valjanja glede na elektromehanske obremenitve valjalnega stroja in geometrijo traka. V naslednji fazi bo programska oprema zmožna z vgrajenimi algoritmi sama določiti optimalen plan prevlekov za določeno kvaliteto in vhodno geometrijo traka.

Program OPVALST pomeni inovativen način reševanja problematike večjega izplena celotne mase traka. Modeliranje dinamičnega plana valjanja, ki kontinuirno preračunava tehnološke parametre valjanja po vsej dolžini traka, je bilo kontrolirano z merjenjem tehnoloških parametrov valjanja trakov med redno proizvodnjo. Meritve so potrdile, da model sledi oziroma napoveduje realno stanje tistih tehnoloških parametrov, ki so odločajoči za kvaliteto toplovaljanih trakov. S tem načinom je za vsak časovni korak določena sila valjanja, ki je glavna krmilna veličina pri oblikovanju aktivne valjčne reže. Pravilno zaporedje aktivnih valjčnih rež zagotavlja raven in v mejah dovoljenih toleranc bombiran trak. S tem se bistveno razlikuje od sedaj vpeljanega načina valjanja, ki določa plan prevlekov le za povprečne vrednosti termomehanskih parametrov za celotno dolži-

no traka. S tem je tehnologom dano orodje za analizo predpostavljenih planov valjanja (ki veljajo le kot ena informacija za celotno dolžino traku) glede na učinke, ki jih ima ta na oblikovne, dimenzijske, temperaturne in strukturne nehomogenosti trakov celo pri posameznih prevlekih. Na osnovi predpostavljenih planov valjanja predvideva učinke strategije valjanja na zgoraj omenjene nehomogenosti in s tem na kvaliteto proizvodnje. V tej fazi program še ni sposoben za direktno uporabo krmiljenja proizvodnje, saj je glede na nove investicije v modernizacijo valjarne potrebno te specifičnosti definirati tako, da bodo vsebovane v strukturi programa. Naša nadaljnja želja je voditi proces ob podpori avtomatizacije in procesne tehnike tako, da bi nehomogenosti, ki so posledica reverzne tehnologije eliminerali v mejah vedno strožjih meril tržišča.

## 6 Literatura

- <sup>1</sup> P. Fajfar, R. Turk: Mathematical Modeling of Strip Rolling on the Steckel Rolling Mill, *5th International Conference Steel Strip '96, Conference Proceedings*, Opava, CZ, Opava, 1996
- <sup>2</sup> R. Robič, A. Lagoja, P. Fajfar, R. Turk, V. Nardin: Modernization of the Steckel Rolling Mill, *5th International Conference Steel Strip '96, Conference Proceedings*, Opava, CZ, Opava, 1996