

MERITVE IN KONTROLA TEHNOLOŠKIH PARAMETROV VALJANJA

MEASUREMENTS AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL ROLLING PARAMETERS

Peter Fajfar, Rado Turk

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za materiale in metalurgijo, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1999-06-04; sprejem za objavo - accepted for publications: 1999-06-15

Predstavljen je pomen kontrole industrijske aplikacije toplega valjanja trakov na valjalnem stroju Steckel, podprte neposredno z merjenjem operativnih tehnoloških pokazateljev valjanja, posredno pa z modelnimi raziskavami. S tehnološkimi meritvami posnamemo stanje, pri katerem proces poteka. Meritve v redni proizvodnji so nujne za sprotno zajemanje tehnoloških veličin za kontrolo izvajanja tehnologije, na višjih nivojih krmiljenja pa za vodenje procesa, kot npr. za procesno vodenje. Baza podatkov, ki se pri tem oblikuje, je osnova za določitev robnih pogojev za modelne raziskave, s katerimi optimiramo tehnologijo s ciljem doseganja ustreznosti kakovosti toplovaljanih trakov ter njihovega visokega in stabilnega izkoristka. Za zagotavljanje stabilne proizvodnje in njen razvoj opravljamo tudi vrsto posebnih in občasnih meritev.

Ključne besede: toplo preoblikovanje, tehnologija valjanja, tehnološke meritve, baza podatkov, matematična simulacija valjanja

Significance of the control of industrial application of hot rolling the strips on the Steckel rolling mill, being aided directly with measurements of operational technological rolling parameters, and indirectly with model investigations, is presented. Technological parameters enable to define the conditions in which the process takes course. The measurements during regular operation are essential to follow simultaneously the technological parameters in order to inspect the used technology, and on higher levels of control the process itself e.g., for a process control. Database, which is created, is the basis for determining boundary conditions for model investigations, which are used in optimising, the technology in order to obtain suitable qualities of hot rolled strips and a high and stable yield. In order to ensure stable production, and a development, also numerous special and periodic measurements are done.

Key words: hot working, rolling technology, technological measurements, data base, mathematical simulation of rolling

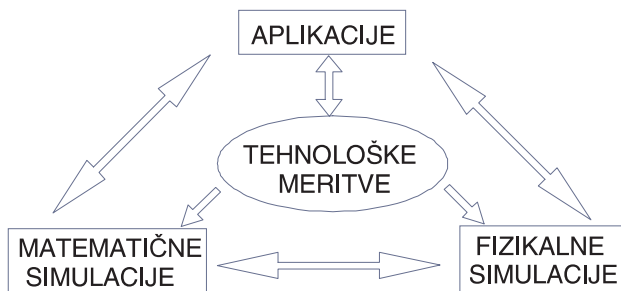
1 UVOD

Procesi in tehnologije preoblikovanja kovinskih materialov, še posebno pri povišanih temperaturah oz. topli predelavi, so termomehansko zelo občutljivi, kar ima posredno in neposredno vpliv na zagotavljanje uporabnih in oblikovnih lastnosti izdelkov. Meritve industrijske aplikacije so zato nepogrešljiv element kontrole in rajvoja teh tehnologij.

Zagotavljanje homogenih lastnosti toplo preoblikovanih izdelkov v njihovem celotnem volumnu je tisti cilj, ki usmerja razvoj tehnologije tega področja. Ta razvoj ni omejen le na opremo, pač pa tudi na način vodenja

preoblikovanja, saj je treba slediti njegovim stanjem med predelavo, kar pomeni, imeti kontrolo nad njegovimi dimenzijskimi, tolerančnimi, oblikovnimi in mikrostrukturnimi spremembami, ki se v tem času dogajajo. Torej, sodobna oprema je tista, ki ima ves čas preoblikovanja zmožnost zagotavljati razmere, ki jih zahteva termomehansko stanje valjanca oz. kontrolirano spreminjanje njegove geometrije.

Pri reverzibilnih tehnologijah toplega valjanja trakov (TVT), kot je tudi primer tu obravnavane tehnologije Steckel, so navadno nehomogenosti termičnega in geometrijskega stanja valjanca po dolžini in širini traku še posebno izrazite. Zato pomeni optimiranje tehnologije določitev takih planov valjanja in dinamike njihovega izvajanja, ki te razlike, v smeri k zadnjem prehodu, zmanjšujejo. Za doseg tega je nujna predhodna množica laboratorijskih eksperimentov in tehnoloških meritev. Cilj meritev tehnoloških parametrov valjanja je pridobiti podatke o izvajni tehnologiji toplega valjanja trakov. Z laboratorijskimi raziskavami pa z variranjem termomehanskih parametrov v celotnem območju valjanja dobimo podatke o vedenju materiala v plastičnem stanju. Problematiko lahko dodatno kvantitativno in zato tudi kvalitetneje obvladujemo s podporo zanesljivega fizikalnega in matematičnega simuliranja procesa valjanja. Vlogo meritev v tem kontekstu prikazuje **slika 1**.



Slika 1: Vloga industrijskih meritev v konceptu razvoja in optimiranja tehnologij

Figure 1: Role of industrial measurements in the concept of development and optimisation of technologies

2 NAMEN INDUSTRIJSKIH MERITEV

Glede na časovno pogostost delimo industrijske meritve v kontinuirne in občasne meritve tehnoloških parametrov preoblikovanja. Kontinuirne so integrirane v zagotavljane ciljev utečene tehnologije in so torej sestavni del redne proizvodnje. Na najvišji stopnji so del procesnega vodenja tehnologije. Občasne meritve pa so namenjene optimiranju in razvoju tehnologij.

Industrijske meritve za razvoj tehnologij imajo lahko različne namene:

- iz meritev med utečeno proizvodnjo lahko sklepamo na energetske-obremenitveno izkoriščenost opreme in pogona valjarne^{1,2,3,4,5}
- rezultate meritev lahko uporabimo za rekonstrukcijo opreme (povečanje moči pogonskih agregatov...), za zagotavljanje optimalnega toka materiala glede na pravilno lego in obliko orodja, za oceno geometrijske stabilnosti orodja pod obremenitvijo (elastična konstanta stroja, vse vrste zračnosti, prostorska stabilnost - npr. ležajnih vstavkov...), za spremljanje obrabe orodij, za enakomernejšo porazdelitev mehanskih obremenitev med posameznimi preoblikovalnimi koraki (npr. prevleki)^{6,7,8,9} itd.
- z meritvami pridobimo izkušnje za načrtovanje novih agregatov oz. tehnologij na drugih preoblikovalnih strojih ali progah^{10,11}
- meritve so izhodišče za prenos industrijskih raziskav na raziskave s fizikalnim in matematičnim simuliranjem procesov preoblikovanja v okviru teorije podobnosti, t.i. za vse vrste energetskega, metalurškega ali cenovnega aspekta optimiranja^{12,13,14,15}
- omogočajo modifikacijo oz. adaptiranje modelnih algoritmov na industrijske razmere obratovanja^{16,17} (indirektna določitev preoblikovalnega odpora...)
- ter za specialne namene.

Kot raziskovalno orodje so meritve namenjene za študij mehanike preoblikovanja, metalurgije preoblikovanja ali pa sintezo obeh, kar je pri toplih tehnologijah najpogostejša zahteva.

V nadaljevanju bo podanih nekaj primerov kontinuirnih (**tabela 1**) in obasnih meritev (**tabela 2**) tehnoloških parametrov valjanja ki so bile v zadnjih letih opravljene v TVT Acroni pri tehnologiji Steckel.

3 KONTINUIRNE MERITVE TVT NA VALJALNEM STROJU STECKEL KOT OSNOVA ZA SIMULACIJSKE RAZISKAVE

Za lažje razumevanje pomembnosti meritev na kratko navajamo zahtevnost reverzirne tehnologije toplega valjanja vrste Steckel, ki uporablja za končno valjanje (5 do 7 prevlekov) en par delovnih valjev. Zaradi reverziranja nastajajo temperaturne razlike po dolžini valjanca, t.j. med glavo (nogo) in sredino valjanca. Te temperaturne razlike vplivajo na spremembo preoblikovalnih trdnosti in s tem na silo valjanja,

ta pa na spremembo upogiba valjev. To zahteva stalno prilagajanje aktivne valjčne reže trenutnemu temperaturnemu stanju valjanca, saj želimo ohraniti zahtevani profil traku. Slednje dosežemo s fleksibilno napravo za predupogib delovnih valjev ter z učinkovitim hladilnim sistemom za vzdrževanje delovne temperature delovnih valjev in seveda z zanesljivo merilno opremo, tako za temperaturo in geometrijo valjanca, kot tudi za silo valjanja. Uporaba enega para delovnih valjev za večje število prevlekov zato že dokaj uspešno konkurira konti-tehnologiji, kjer je vsaka redukcija valjanca izvedena na svojem paru valjev.

Omenjene temperaturne razlike učinkujejo tudi na fizikalne in metalurške nehomogenosti valjanca po njegovi celotni dolžini. Temu se izognemo z optimiranjem planov valjanja tako, da njihovi učinki na razvoj mikrostrukture, kljub spreminjajočim se temperaturnim pogojem, v okviru dopustnih toleranc mikrostrukturno odvisnih lastnosti, težijo k čimbolj homogenemu stanju celotnega valjanca.

Kontinuirne meritve so integralni del izvajane tehnologije na proizvodno kontrolnem in procesno kontrolnem nivoju ter omogočajo, da tako operater, kot tudi tehnolog, vizualno spremljata oba nivoja, podprta z analizo trenutnega stanja, direktno na ekranu. S tem so vpostavljeni optimalni pogoji tako za stalen nadzor nad želenimi, t.j. prednastavljenimi, in doseženimi, t.j. trenutnimi vrednostmi pokazateljev izvajane tehnologije, kot tudi za morebitna nujna trenutna ukrepanja. Ekranizirana kontrola pokazateljev valjanja, nadgrajena z njihovo analizo, je hkrati tudi izvir za porajanje novih razvojnih in inovativnih idej. Arhiviranje aktualnih meritev prevzema sistem za zajemanje podatkov. Pri tem nastalo podatkovno bazo uporablja vgrajeni ekspertni sistem za korekcijo procesnih algoritmov, ki nato z vgrajeno avtomatizacijo skrbe za optimalno izvajanje tehnologije.

Ista podatkovna baza je tudi izhodišče za nadaljnji razvoj tehnologije predvsem takrat, kadar gre za nove izdelke iz novih materialov ali pa za zaostrene kvalitetne zahteve trga. Tedaj se razvoj prenese na simulacijske raziskave. Simulacija pomeni imitacijo realnega ali planiranega procesa z uporabo fizikalnih ali teoretičnih modelov za študij njegovih lastnosti pri definiranih robnih pogojih. Realizacija simulacije zahteva dobro razumevanje tega procesa, zato, da je njegov opis z analitičnimi izrazi v obliki matematičnih enačb dovolj natančen. S temi matematičnimi izrazi z lahkoto variramo komponente raziskovanih stanj in dobimo informacije o vedenju danega sistema oz. o njihovem vplivu. Simulacije velikokrat vodijo do spoznanj, do katerih bi samo z opazovanjem realnih sistemov le težko ali pa sploh ne bi prišli. Zato imajo simulacije izredno praktično vrednost za verifikacijo in optimizacijo sistemov, ki so kompleksni in zelo zahtevni.

Poglejmo simulacijo toplega valjanja, podprto s fizikalnim ali matematičnim modeliranjem. Podatkovna baza iz meritev aplikacije omogoči definirati robne

pogoje, ki simulacijo ohranjajo primerljivo danim tehnološkim zmožnostim valjarne in preoblikovalnih lastnosti materiala.

Na osnovi omenjene podatkovne baze določimo:

- termomehansko območje preskušanja preoblikovalnih lastnosti valjanca, ki je hkrati odločujoče tudi za študij razvoja mikrostrukture med plastično deformacijo in po njej oz. v času med posameznimi deformacijskimi koraki
- preverimo upravičenost izbranih matematičnih algoritmov za napovedovanje toplotnih, energetsko-obremenitvenih in geometrijskih pokazateljev valjanja
- adaptiramo, po potrebi pa tudi modificiramo, omenjene algoritme za čim popolnejše simuliranje obravnavane industrijske tehnologije.

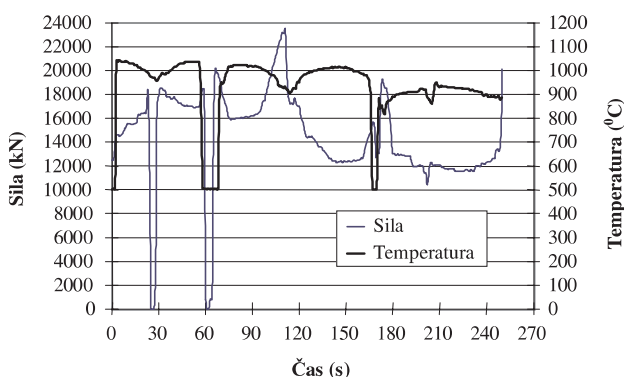
Rezultat simulacijske raziskave je določitev plana valjanja s prednastavljenimi parametri za procesno vodenje te tehnologije. Tehnološke in laboratorijske raziskave so torej osnova za verifikacijo modelnih raziskav. V fazi raziskave razdelimo celoten proces valjanja na podprocese, ki so opisani z algoritmi, katerih osnova je fizikalna razlaga procesa valjanja. Smiselna povezava teh algoritmov v celoto daje programsko opremo za računalniško simulacijo valjanja.

3.1 Nekaj primerov industrijskih meritev za toplo valjanje trakov

Temperaturo površine traku merimo na vstopni in izstopni strani valjalnega stroja z optičnimi pirometri. Temperatura je ena najpomembnejših veličin, ki vplivajo na preoblikovalnost materialov. Pri reverzorni tehnologiji Steckel je značilna porazdelitev temperature valjanca po dolžini prikazana na **sliki 2**, kjer so razlike med koncema in sredino traka tudi do 150°C.

Sila valjanja je merjena na operativni in pogonski strani. Pomembna je tako skupna sila valjanja, kot tudi razlika sil med obema stranema. Medsebojni vpliv sile in temperature valjanja je nazorno prikazan na **sliki 2**.

Meritve toka, napetosti in obratov glavnega pogonskega motorja so nujne za določitev dolgotrajnih



Slika 2: Izmerjeni sila in temperatura za AISI 304
Figure 2: Measured force and temperature for AISI 304

ter kratkotrajnih obremenitev elektromotorja in porabljene moči. Obrati elektromotorja so premosorazmerni s hitrostjo valjanja, ki je v neposredni zvezi s hitrostjo deformacije in ohlajanja valjanca, kar se v končni fazi izraža v sili valjanja.

Tabela 1: Kontinuirno merjenje tehnoloških parametrov valjanja
Table 1: Continuous measurements of technological rolling parameters

Valjalni stroj Steckel
1. Tok motorja
2. Napetost motorja
3. Obrati motorja
4. Vhodna temperatura valjanja
5. Izhodna temperatura valjanja
6. Skupna sila valjanja
7. Nastavitev valjčne reže na pogonski strani
8. Nastavitev valjčne reže na operativni strani
9. Tok vhodnega navijalnika
10. Napetost vhodnega navijalnika
11. Obrati vhodnega navijalnika
12. Tok izhodnega navijalnika
13. Napetost izhodnega navijalnika
14. Obrati izhodnega navijalnika
15. Merjenje debeline traka z x-žarki
16. Temperatura hladnega navijalnika
17. Sila valjanja na pogonski strani
18. Sila valjanja na operativni strani
19. Sila upogiba

Višina valjčne reže se meri na operativni in pogonski strani z namenom preprečiti nastanek klinavosti traka.

Debelina traka se meri po celotni dolžini rentgensko. Iz te meritve, če ni bil vključen sistem za predupogib valjev, dobimo parametre za določitev skoka valjev.

Prečni profil traka je po njegovi celotni dolžini izmerjen s profilometrom.

4 OBČASNE MERITVE

Z občasnimi meritvami pridobivamo podatke, ki so prav tako pomembni za optimalno uporabo nekaterih sklopov opreme in avtomatike. Ta merilna oprema ni primerna ali ni v sklopu kontinuirnega spremljanja tehnoloških parametrov med valjanjem.

Moment valjanja (**slika 3**) merimo le občasno z nekontaktno metodo. Bistvo te meritve je, poleg preveritve varnosti pogona pred lomi, v določitvi medsebojne zveze med silo valjanja in obremenitvijo glavnega pogona, ki jo potrebujemo pri optimiranju plana prevlekov z ozirom na največje dovoljene obremenitve. Neposredna zveza med tokom elektromotorja in momentom valjanja je podana na **sliki 3**.

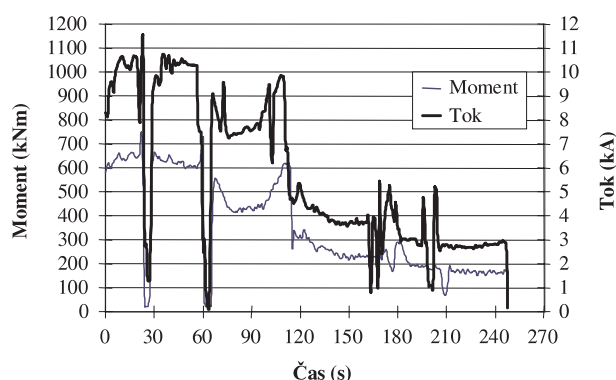
Kontrola stabilnosti valjev je pomembna za analizo oblikovanja aktivne valjčne reže kot funkcije nekontroliranega pomika valjev in vstavkov valjev, ki so nameščeni v oknu valjalnega stroja. Meritve so izvedene

z induktivnimi merilniki pomikov. Na **sliki 4** so prikazna merilna mesta (1.14) ter smeri merjenja pomikov valjev in vstavkov valjev za analizo stabilnosti valjev med obratovanjem.

Tabela 2: Obačasno merjenje tehnoloških parametrov valjanja
Table 2: Periodic measurements of technological rolling parameters

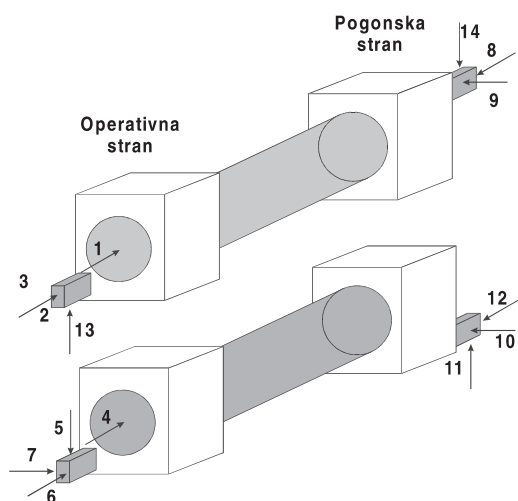
Valjalni stroj Steckel
1. Temperaturni profil valjev
2. Termična bombiranost valjev
3. Obrabni profil valjev
4. Pretok vode za hlajenje valjev
5. Pretok vode za odškajanje
6. Temperatura vročih navijalnikov
7. Moment valjanja
8. Pomiki valjev v vseh straneh glede na vstavke
9. Pomiki vstavkov valjev glede na ogrodje valjalnega stroja
10. Elastična konstanta valjalnega stroja
11. Skok valjev

Temperaturni profil površine valjev in termično bombiranost valjev izmerimo po izgraditvi iz valjalnega stroja. Temperaturo merimo s kontaktnimi termometri,



Slika 3: Izmerjena moment in tok za AISI 304

Figure 3: Measured torque and current for AISI 304



Slika 4: Meritve stabilnosti valjev

Figure 4: Measurements of the stability of rolls

medtem ko merimo termično bombiranost po delovni dolžini valja z letvijo, ki ima vgrajen tudi induktivni merilnik pomikov. Z isto merilno napravo merimo tudi obrabni profil valjev, ko se le-ti ohladijo. Razlika med hladnima profiloma pred vgraditvijo in po njej je obraba valjev, razlika med profiloma hladnih in toplih valjev pa je termična bombiranost valjev.

5 SKLEPI

Preoblikovalne tehnike zahtevajo sistemski pristop, zato so v kompleksu meritev vsebovane energetsko-obremenitvene potrebe preoblikovnja, geometrija orodja in preoblikovanca, termomehansko stanje preoblikovanca ter tisti parametri, ki vplivajo na končne fizikalne lastnosti izdelka.

Z direktnimi meritvami ne moremo dobiti vseh informacij, ki so potrebne za optimalno izvajanje tehnologij za stabilno in ekonomično proizvodnjo. Zato je treba paralelno z njimi opraviti še dodatne raziskave s fizikalnim oz. z matematičnim simuliranjem tehnologije.

Učinkovita uporaba avtomatike oz. procesnega vodenja tehnologij preoblikovanja zahteva izvajanje tehnologije v tolerančno ozkih področjih, zato se ob stalnih meritvah tehnologije po potrebi izvajajo tudi take, ki so usmerjene le na rešitev ožjega problema, kot npr. prostorska stabilnost lege preoblikovalnega orodja ali njegovih elementov med obremenitvijo.

Da s posebnimi meritvami ne bi obremenjevali ritma proizvodnje, so potrebne skrbne predpriprave, organizirane do te meje, da je izvedba meritev hkrati tudi že protokol dejanskih merjenih vrednosti. Tako se ob meritvah hkrati lahko preizkusijo tudi predvidene tehnološke variante.

Prikazani primeri so rezultat večletnega sodelovanja s tehnologi valjarne Steckel.

5 LITERATURA

- R. Turk, P. Fajfar, E. Slaček: Analiza energetsko-obremenitvenih parametrov duo valjalnega stroja ϕ 838 mm, Univerza v Ljubljani, FNT, Ljubljana, **1986**
- V. Čizman, R. Turk, P. Fajfar, V. Gričar, M. Kunšič, J. Zidar: Ocena preoblikovalno-tehnoloških zmožnosti valjanja debele pločevine v Železarni Jesenice, Univerza v Ljubljani, FNT, Ljubljana, **1988**
- R. Turk, M. Terčelj, P. Fajfar, I. Bizjak, V. Ameršek, I. Čretnik, I. Končan, F. Kaučič, M. Drofenik: Zaslodovanje energetskih veličin pri valjanju ϕ 10 v valjarni II, Železarne Štore, Univerza v Ljubljani, FNT, Ljubljana, **1988**
- R. Turk, M. Terčelj, P. Fajfar, I. Bizjak, V. Ameršek, B. Breskvar, B. Marolt, F. Gutenbergger, E. Dokler, J. Naraks: Zaslodovanje energetskih veličin pri valjanju ZnCuTi bloka na duo valjalnem stroju Cinkarne Celje, Univerza v Ljubljani, FNT, Ljubljana, **1989**
- R. Turk, P. Fajfar, V. Ameršek, V. Nardin, A. Buhvald, F. Grešovnik, F. Hartman, V. Ramšak, Š. Skitek: Vpliv preoblikovalnih trdnosti valjancev na preobremenitve valjalnega stroja, Univerza v Ljubljani, NTF, Ljubljana, **1996**
- R. Turk, P. Fajfar, I. Bizjak, B. Omejc, Z. Jamar: Meritve stabilnosti valjev med toplim valjanjem v valjarni TVT - Železarne Jesenice, Univerza v Ljubljani, FNT, Ljubljana, **1990**

- ⁷ P. Fajfar, R. Turk, I. Bizjak, J. Bek, A. Kegl: Optimiranje tehnologije toplega valjanja trakov Al-zlitin na valjalni progi ϕ 838 mm, Univerza v Ljubljana, FNT, Ljubljana, **1992**
- ⁸ R. Turk, P. Fajfar, V. Ameršek, M. Knap, A. Buhvald, F. Grešovnik, F. Hartman, Š. Skitek: Racionalizacija vročega valjanja na valjalnem stroju Blooming, Univerza v Ljubljani, NTF, Oddelek za materiale in metalurgijo, Ljubljana, **1996**
- ⁹ R. Turk, P. Fajfar, M. Knap, H.- J. Mauch, R. Robič, M. Erman, Z. Smolej, N. Karba: Meritve pomikov delovnih valjev med valjanjem v vroči valjarni - Acroni. Univerza v Ljubljani, NTF, Oddelek za materiale in metalurgijo, Ljubljana, **1998**
- ¹⁰ R. Turk, P. Fajfar, V. Nardin, R. Robič, A. Lagoja, F. Marinšek: Nova tehnologija toplega valjanja trakov za popolno izkoriščenost celotne teže slaba, Univerza v Ljubljani, NTF, Oddelek za materiale in metalurgijo, SŽ, Acroni, MZT, Ljubljana, **1995**
- ¹¹ R. Turk, M. Grašič, V. Čižman, B. Omejc: Optimalna dinamika koriščenja potisne in globinske peči z ozirom na ritem valjanja, Univerza v Ljubljani, FNT, ŽJ, Ljubljana, **1981**
- ¹² R. Robič, R. Turk: Vpliv silicija in analiznih odstopanj na tehnologijo valjanja dinamo trakov, *Kovine Zlitine Tehnologije*, 30 (**1996**) 399-401
- ¹³ P. Fajfar, R. Turk, V. Nardin, R. Robič: Računalniško podprta simulacija plana valjanja trakov na valjalnem stroju, *Kovine Zlitine Tehnologije*, 31 (**1997**) 193-196
- ¹⁴ V. Nardin, M. Terčelj, R. Turk, T. Rodič: Nova eksperimentalna metoda za določevanje obrabe orodij v laboratoriju, *Kovine Zlitine Tehnologije*, 31 (**1997**) 397-402
- ¹⁵ P. Fajfar, R. Turk: Mathematical modelling of strip rolling, *Metalurgija*, 37 (**1998**) 3-9
- ¹⁶ R. Turk: Modifikacija Simsove analitične metode za računalniško obdelavo - 2. del, RSS, Ljubljana, **1978**
- ¹⁷ R. Turk: Vrednotenje specifičnega preoblikovalnega odpora med toplim valjanjem jeklenih trakov na valjalnem stroju Steckel, mag. delo, Univerza v Ljubljani, FNT, Ljubljana **1976**