

# **Sistem za podporo pri nastavljanju začetne sile hladnega valjanja**

**Dejan Gradišar<sup>1</sup>, Miha Glavan<sup>1</sup>, Mojca Lončnar<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Institut Jožef Stefan**

**<sup>2</sup>SIJ Acroni**

**dejan.gradisar@ijs.si**

## ***System for supporting initial force setting in Cold Rolling.***

This paper presents a system for supporting setting of the initial force in cold rolling mills, which was developed as part of the international project INEVITABLE. To achieve optimal performance and to obtain a quality product with as little waste as possible, the initial settings are also important and must be set by the operator before starting the rolling process. An information system already implemented ensures the selection of values that meet the requirements of the work order. The analysis has shown that the reference value of the initial force proposed by the current system does not correspond to the value that would actually be required before the start of rolling. This is attributed to the fact that the rolls have to adapt to the working conditions during the rolling start phase, and therefore the rolling force requirements change. This paper presents a system that, based on the analysis of past work cycles, identifies the dynamics of this transition in the form of a neural model and uses it to suggest to the operator a suitable initial value for the rolling force. The system has been implemented and validated in the SIJ Acroni cold rolling mill, where positive effects are observed in terms of reduced scrap, as the time required to reach an adequate rolling force has been reduced.

## ***Kratek pregled prispevka***

V prispevku je predstavljen sistem za podporo pri nastavljanju začetne sile hladnega valjanja, ki je bil razvit v okviru mednarodnega projekta INEVITABLE. Za doseganje optimalnega delovanja in pridobivanje kvalitetnega izdelka s čim manjšim izmetom, so med drugim pomembne tudi začetne nastavitve, ki jih mora nastaviti operater, preden se začne proces valjanja. Za izbor delovnemu nalogu primernih vrednosti skrbi že implementiran informacijski sistem. Analiza je pokazala, da referenčna vrednosti začetne sile, ki jo predlaga trenutni sistem, ne ustreza vrednosti, ki bi bila dejansko potrebna pred začetkom valjanja, saj se v začetnem prehodnem obdobju ob začetku valjanja pojavlja dinamika potrebne sile valjanja, ki jo pripišemo dejstvu, da se morajo valji v začetnem obdobju prilagoditi na delovne pogoje. V prispevku je predstavljen sistem, ki na osnovi analize preteklih delovnih ciklov identificira dinamiko tega prehoda v obliki nevronskega modela in z njegovo pomočjo operaterju predlaga primerno začetno vrednost sile valjanja. Sistem je bil implementiran in validiran v obratu hladne valjarne v podjetju SIJ Acroni, kjer ugotavljajo pozitivne učinke z vidika zmanjšane izmeta na podlagi skrajšanja časa do ustrezne sile valjanja.

## 1 Uvod

V prispevku predstavljamo rešitev, ki je bilo v okviru mednarodnega projekta INEVITVABLE razvito za podjetje SIJ Acroni. Rešitev predstavlja del obsežnejšega sistema za spremljanja stanja, diagnostiko in optimizacijo delovanja stroja za valjanje.

Stroj za hladno valjanje se uporablja v procesu izdelave jekla za zmanjšanje debeline in povečanje trdote jeklenih kolobarjev. Proces poteka tako, da se jeklo spusti skozi vrsto valjev pri sobni temperaturi. Valji pritiskajo na jeklo, zaradi česar se le-to deformira in tanjša. Na ta način izboljšamo obdelavo površine in povečamo trdnost in vzdržljivost jekla.

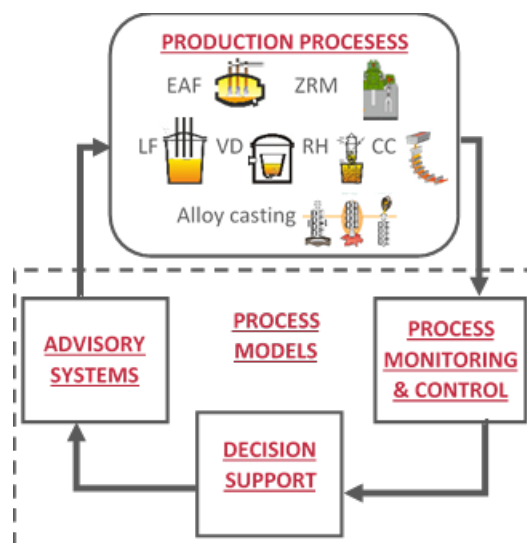
Na delovanje stroja za hladno valjanje, in s tem na kvaliteto končnega izdelka, lahko vplivamo z različnimi procesnimi parametri. Med delovanjem se nastavlja razdalja med valji (ang. *rolling gap*), ki določa s kakšno mero se bo material med valjanjem deformiral. Z nastavitvijo razmika nastavljamo želeno zmanjšanje debeline in lastnosti materiala. S hitrostjo valjanja (ang. *rolling speed*) je definiran čas, ki ga material preživi v reži valja. Z njim lahko prilagajamo prepustnost stroja in določamo obnašanje materiala med deformacijo. Z upogibom valjev (ang. *roll bending*) se nadzoruje oblika in ravnost valjanega materiala. Na kakovost površine vplivamo tudi s količino in temperaturo hladilne tekočine.

## 2 Projekt INEVITABLE

Predstavljen problem je bil obravnavan v okviru mednarodnega projekta INEVITABLE **Error! Reference source not found.**, katerega cilj je optimizacija in izboljševanje proizvodnih procesov v jeklarski industriji z digitalnimi tehnologijami. Obravnavani proizvodni obrati se nahajajo v Sloveniji (SIJ Acroni), Avstriji (voestalpine) in Španiji (Sidenor in EIPC) in zajemajo primarne in sekundarne metalurške procese, kot tudi ulivanje barvnih kovin ter hladno valjanje pločevine. Industrijske partnerje v raziskovalnih aktivnostih podpirajo institucije specializirane za metalurške tehnologije (BFI, K1-MET, Azterlan) in institucije specializirane

za avtomatizacijo in procesno vodenje (Siemens, Fakulteta za Elektrotehniko – UL, Univerza KTH, Institut Jožef Stefan in Compureg).

V okviru projekta so se razvijali višje-nivojski nadzorni sistemi, ki so bili pripravljani za različne proizvodne obrate in demonstrirani v operativnem okolju (TRL 7). Nadzorni sistemi temeljijo na vgrajenem kognitivnem znanju, ki omogoča učinkovito delovanje procesov. Del aktivnosti je bila tudi popolna digitalna preobrazba demonstracijskih mest v obratih, vključno z digitalno posodobitvijo opreme, zajemom, shranjevanjem, obdelavo in analitiko podatkovnih tokov, ter nadgradnja komunikacije in avtomatizacije. V kombinaciji s podatki iz pametnih senzorjev in omrežnih senzorskih sistemov, so bili razviti različni prediktivni modeli, s katerimi je mogoče preučevati vpliv procesnih parametrov na končno kvaliteto proizvedenih izdelkov. Osnovni koncept projekta prikazuje Slika 1.

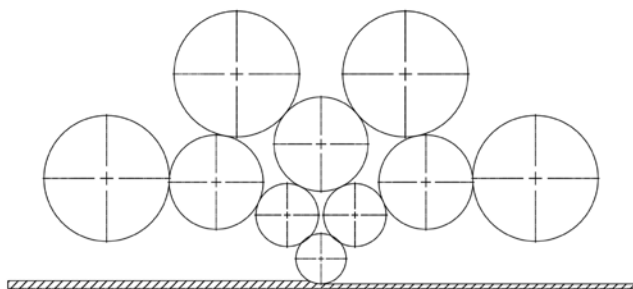


Slika 1: Ideja projekta INEVITABLE.

Uspešnost vpeljanih tehnologij se spremlja preko vpeljanih kazalnikov učinkovitosti. S pomočjo sistemov razvitih v okviru projekta INEVITABLE je bila izboljšana zmogljivost in zanesljivost obstoječih sistemov vodenja procesov, kar nam zagotavlja tudi učinkovitejšo proizvodnjo in boljše lastnosti končnih izdelkov. Poleg tega se pričakuje zmanjšanje porabe proizvodnih virov in emisij toplogrednih plinov (CO<sub>2</sub>).

### 3 Problem nastavljanja začetne sile valjanja

V prispevku se osredotočamo na problem, ki smo ga reševali v okviru optimizacije delovanja stroja za valjanje tipa Sendzimir (ZRM). Gre za kompozicijo valjev, s katero lahko povzročamo največje preoblikovalne tlake in sestoji iz delovnega in devetih podpornih valjev na vsaki strani. Podporni valji so razporejeni v tri dodatne sloje, kot je to prikazano spodaj (Slika 2).



Slika 2: Prerez valjarskega stroja tipa Sendzimir (ZRM).

Ustrezne lastnosti končnega produkta zagotovimo s ponavljajočim se spreminjanjem smeri valjanja skozi ista obdelovalna valja, pred vsakim valjanjem pa ustrezno nastavimo začetne vrednosti parametrov valjanja. V obravnavanem primeru, kot najvplivnejše nastavitvene parametre upoštevamo želeno izhodno debelino (ang. *thickness*), potrebne napetosti v materialu (ang. *tension*), in nastavitve valjev (ang. *roll configurations*).

Za doseganje optimalnega delovanja in pridobivanje kvalitetnega izdelka s čim manjšim izmetom, so med drugim pomembne tudi začetne nastavitve, ki jih mora nastaviti operater, preden se začne proces valjanja. Z nastavitvami teh parametrov zagotavljamo dosleden in ponovljiv postopek valjanja in s tem želeno kakovost in konsistenco končnega izdelka.

V prispevku se osredotočamo na prilagajanje nastavitvenih vrednosti sile s katerimi delovni valji pritisnejo na pločevino pred pričetkom valjanja.

#### 3.1 Predhodno stanje

Za nastavitve začetnih vrednosti parametrov valjanja, ki so primerne glede na zahteve podane

z delovnim nalogom, skrbi informacijski sistem, ki je že implementiran v podjetju. Z njegovo pomočjo so pred nadgradnjo operaterji izbrali ustrezen recept izmed več vnaprej določenih statičnih receptov, ki pokrivajo širše območje razredov tipov materiala in debelin. Nastavitvene vrednosti recepta se do določene mere prilagodijo glede na dejanske lastnosti pločevine (začetna in ciljna debelina), za kar se uporablja linearna interpolacija. Poleg tega lahko operaterji te vrednosti ročno prilagajajo glede na svoje izkušnje in želje, da optimizirajo nastavitve in izboljšajo rezultat.

V sklopu projekta smo v prvi fazi izvedli analizo do sedaj predlaganih priporočil in ugotovili, da referenčne vrednosti začetne sile, ki jo predlaga trenutni sistem, ne ustreza vrednosti, ki bi bila dejansko potrebna pred začetkom valjanja. V začetnem prehodnem obdobju ob začetku valjanja je bila zaznana dinamika prilagoditve sile valjanja od začetne nastavitvene na dejansko delovno silo. Ta prehod pripisujemo dejstvu, da se morajo valji v začetnem obdobju prilagoditi na delovne pogoje.

### 4 Sila valjanja

Da bi lahko predlagali primernejše nastavitve, smo najprej analizirali dinamiko sile, ki jo generira avtomatski sistem od začetka valjanja dalje. Preučili smo obnašanje preteklih delovnih ciklov in to dinamiko skušali opisati s pomočjo dinamičnega nevronskega modela.

Na to, kakšno napetost je potrebno povzročiti v materialu za njegovo ustrezno preoblikovanje, so poleg lastnosti materiala in zahtev iz delovnega naloga (lastnosti končnega produkta), pomembni še dejanska debelina obdelovanca na vhodu, predvidena hitrost valjanja, predvidena sila nategov. V ta namen smo raziskali odvisnost najpomembnejših procesnih parametrov in lastnosti obdelovancev in s tem poskušali ugotoviti kako različni pogoji in vrednosti receptov vplivajo na končno kakovost izdelka, t.j. odmik debeline od referenčne vrednosti.

Sila valjanja vpliva na dolžino glave (odpadek, ki prihaja iz začetnega dela valjane tuljave). Začetna sila valjanja predstavlja en od

parametrov recepta valjanja, ki se ga uporablja kot referenčna vrednost regulacije razdalje med valji (*rolling gap*).

#### 4.1 Nevronske mreže

Pri modeliranju dinamike smo uporabili pristop z nevronskimi mrežami. Statistični modeli se pogosto uporabljajo za predstavljanje in napovedovanje dinamičnega stanja sistemov, predvsem v situacijah, kjer je obravnavane sisteme težko predstaviti z determinističnimi metodami. Pri tem so modeli umetnih nevronskih mrež (NN) najpogosteje uporabljeni pristopi. Obstaja več tipov nevronskih mrež, kjer se za modeliranje dinamičnih sistemov pogosto uporablja tip nevronske mreže večplastni parceptron (ang. *Multi-layer Perceptron*), ki vsebuje več skritih plasti med vhodno in izhodno plastjo. Funkcija vhodno-izhodne preslikave se vzpostavi med fazo učenja, kjer se po predhodni izbiri arhitekture NN nauči pravilno povezovati vhode in izhode. Primerno arhitekturo NN določimo z izbiro števila plasti, števila vozlišč na plast in števila povezav. Ko določimo arhitekturo, naučimo mrežo s tem, da se ji s prilagajanjem na testne podatke predpiše vrednosti uteži med posameznimi nevroni. Model NN, uporabljen v tej študiji, je nelinearni avtoregresivni model z eksogenimi vhodi (NARX).

Obravnavan regresijski problem lahko predstavimo kot statični proces z enim izhodom z  $n$ -vhodno matriko  $X$  in izhodnim vektorjem  $y$ . Ocenjeni model lahko torej predstavimo z:

$$\hat{y} = f(X, w) + \varepsilon \quad (1)$$

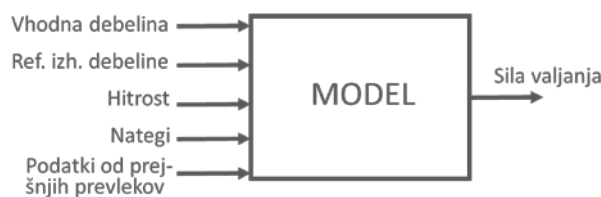
kjer je  $f$  nelinearna preslikava, realizirana z osnovnimi funkcijami, ki so predstavljene z aktivacijskimi funkcijami, in  $w$  so uteži, t.j., parametri optimizacije nevronske regresije, ki jih je treba oceniti.  $\varepsilon$  je naključna spremenljivka z ničelno srednjo vrednostjo.

#### 4.2 Model sile valjanja

Da smo identificirali model sile valjanja, smo uporabili arhivske podatke preteklih valjanja. Na razpolago smo imeli proizvodne podatke za 40 navitij pločevin (delovnih operacij), kjer se je

vsaka od teh valjala preko 5 prevlekov. Podatki so shranjeni v obliki časovne vrste. V prvem koraku smo pridobljene podatke pregledali ročno in iz nadaljnje analize odstranili nepopolne in tiste, ki odstopajo od ustaljenih obratovanj.

Začetna sila valjanja je odvisna od lastnosti materiala, kot so hodna debelina, referenčna vrednost izhodne debeline, od ostalih nastavitvev kot so hitrost prevleka, natezne sile, pa tudi od podatkov iz prejšnjih obdelav (prevlekov) (*Slika 3*).



*Slika 3: Model sile valjanja.*

Da smo dobili zanesljive in hitre predikcije, smo za vsak prevlek določili svoj model. Nabor podatkov smo torej obravnavali ločeno za vsak prevlek posebej s tem, da smo za učenje uporabili cca. 80 % podatkov, ostalo pa za validacijo modela. Pred identifikacijo modela so bili podatki predhodno tudi normirani.

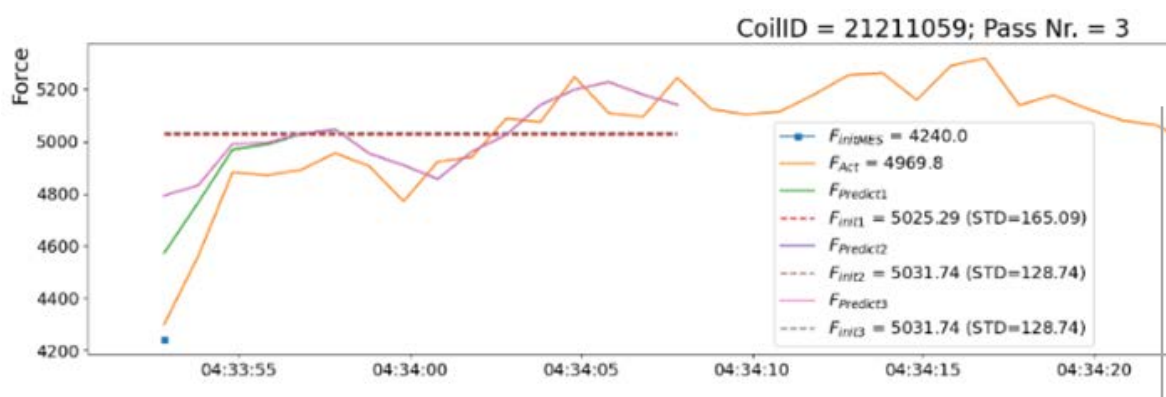
V nabor vhodnih podatkov smo vključili tudi informacijo o tem kakšna sila je dosežena v nominalnih delovnih pogojih, t.j. povprečna sila od začetnega dela dalje. Podatke o tem dobimo v primeru prvega prevleka iz sistema MES, v nadaljnjih pa jo izračunamo iz podatkov prejšnjega prevleka.

Na ta način smo dobili pet nevronskih modelov, ki so se primerno izkazali tudi v postopku validacije.

#### 4.3 Izračun primerne sile valjanja

Z opisanim postopkom identificiran model je bil integriran v sistem, ki operaterju predlaga primerno začetno vrednost sile valjanja.

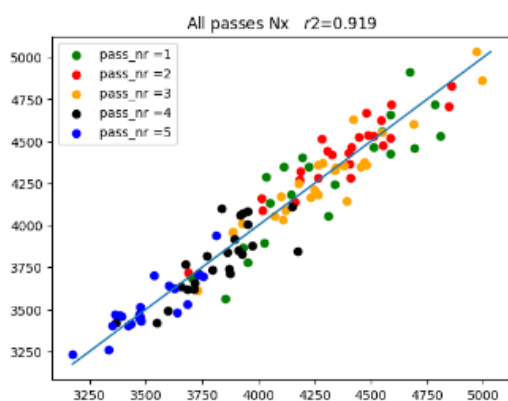
V ta namen se s pomočjo prej določenega modela in podatkov, ki jih imamo za določeno navitje pločevine, izvede simulacija dinamike začetne sile v začetnem delu valjanja. Primerno silo dobimo preko iterativne simulacije dinamike in prilagajanja začetne sile glede na postavljen



Slika 4: Iterativno izboljševanje izračuna primerne začetne sile valjanja.

kriterij čim krajšega prehoda med začetnim in ustaljenim stanjem (Slika 4).

Primernost priporočene začetne sile valjanja smo validirali nad podatki, ki so bili uporabljeni med valjanjem (Slika 5).



Slika 5: Validacija modela na testni množici podatkov

## 5 Povzetek

V prispevku je predstavljena rešitev za bolj optimalno nastavljanje začetne sile valjanja, ki je en od pomembnih dejavnikov, ki vpliva na količino izmeta pri valjanju pločevine. Analiza je pokazala, da obstaja neidentificirana dinamika sile, v začetni fazi valjanja. Na osnovi preteklih podatkov smo to dinamiko najprej identificirali v obliki modela nevronske mreže, to pa smo potem uporabili za izračun primerne začetne sile valjanja.

Uporabljen pristop je bil na koncu tudi implementiran v obrat hladnega valjanja v podjetju SIJ Acroni. Primernost predlagane

vrednosti začetne sile valjanja so tako na koncu validirali tudi operaterji tekom svojega rednega dela. Z rezultati so zadovoljni, saj so z uporabo novega sistema dosegli manjši izmet. Na podlagi rezultatov modela so bili izvedeni tudi določeni popravki obstoječih fiksnih receptov. Postopek pa bi bilo smiselno razširiti tudi na druge tipe materialov.

## Zahvala

Delo je bilo izvedeno v okviru mednarodnega projekta INEVITABLE (»Optimization and performance improving in metal industry by digital technologies«) (GA No. 869815), ki je sofinanciran s strani Evropske komisije v okviru programa Obzorja 2020, SPIRE in v sklopu nacionalnega raziskovalnega programa Sistemi in vodenje, P2-0001.

## 6 Literatura

- [1] A. Bhaduri: *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*, Springer Nature, Singapore, 2018, str. 521 – 555.
- [2] K. Cuznar and M. Glavan, "Optimization of cold rolling process recipes based on historical data," *2022 IEEE 21<sup>st</sup> Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Palermo, Italy, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/MELECON53508.2022.9843127.
- [3] D. Gradišar, M. Glavan, G. Dolanc, M. Lončar. Nadzor senzorske opreme stroja za hladno valjanje s spremljanjem masnega pretoka. *AIG 2021*.
- [4] Projekt INEVITABLE, <http://inevitable-project.eu/>, 2023.