

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
v Praze

FAKULTA STROJNÍ

Ústav přístrojové a řídicí techniky



Jiří Procházka

Optimalizace silových poměrů
v procesu válcování za tepla

Bakalářská práce

Praha 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Procházka** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **459603**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Optimalizace silových poměrů v procesu válcování za tepla

Název bakalářské práce anglicky:

Force distribution optimization in a hot flat-rolled steel process

Pokyny pro vypracování:

1. Popis systému řízení procesu válcování za tepla
2. Analýza vlivu silových poměrů ve válcovací stoličce na tloušťku a příčný profil válcovaného plechu.
3. Návrh algoritmu pro optimalizaci a adaptaci silových poměrů na válcovací stoličce.
4. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

Ginzburg V. B.: Metallurgical Design of Flat Rolled Steels, CRC Press, 2004.
Ginzburg V. B.: Flat-Rolled Steel Processes: Advanced Technologies, CRC Press, 2009.
Pietrzyk M. and Lenard J.: Thermal-Mechanical Modelling of the Flat Rolling Process. Series: Materials Research and Engineering, Springer-Verlag, Berlin, 1991.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Tomáš Vyhliďal, Ph.D., U12110.3

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12.06.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:

prof. Ing. Tomáš Vyhliďal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26-04-2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Práce se zabývá adaptací a predikcí silových poměrů v procesu válcování za tepla za účelem optimalizace výpočtu průchodových plánů, nastavení válcovací mezery a dosažení cílené tloušťky materiálu. Je zmíněna základní problematika válcovacího procesu, metodika výpočtů průchodových plánů a technického měření sledovaných veličin. Je navržen a implementován algoritmus krátkodobé adaptace průchodového plánu a zmíněn základní návrh neuronové sítě, použitý pro dlouhodobou predikci sledovaných veličin. Na závěr jsou navrženy nástroje pro vizualizaci a sledování válcovacího procesu.

Klíčová slova: válcování za tepla, tloušťka plechu, adaptace, válcovací síla

Abstract

The thesis deals with adaptation and prediction of force distribution in hot mill rolling in order to optimize pass schedule calculation, set up the roll gap and achieve target material thickness. There is mentioned a basic overview of a hot rolling process, a methodology of pass schedule calculation and technical measurements of tracked values. The algorithm of short-term adaptation is designed and implemented and there is mentioned the basic design of neural networks which are used for long-term prediction of tracked values. In the end, the tools for visualization and rolling process tracking are proposed.

Key words: hot mill rolling, slab thickness, adaptation, rolling force

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

V Praze dne 05.06.2019

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Tomáši Vyhlídalovi, PhD. za odborné vedení této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Knoblochovi za to, že mi umožnil spolupracovat na projektu, který dal vzniknout této bakalářské práce a poskytoval mi bohaté rady během této spolupráce.

Obsah

1	Úvod	11
2	Válcovací proces	12
2.1	Válcovací stolice	12
2.2	Pracovní válce	13
3	Model výpočtu	15
3.1	Omezující podmínky pro úběr	15
3.1.1	Maximální válcovací síla	16
3.1.2	Maximální krouticí moment	16
3.1.3	Přípustný úhel záběru	16
3.1.4	Přípustný příčný profil	16
3.2	Fáze válcování	18
3.2.1	Válcování na hrubo	18
3.2.2	Válcování dokončovací	19
4	Sledování a implementace procesů	19
4.1	Měření veličin	19
4.2	Implementace procesů	19
5	Adaptace	21
5.1	Adaptace teploty	22
5.1.1	Operace před prvním průchodem	23
5.1.2	Válcovací operace	24
5.1.3	Odpočívací operace	26
5.1.4	Teplotní model válce	26
5.2	Adaptace síly	28
5.3	Deformační odpor	29
5.4	Moment	31
5.5	Nastavení válcovací mezery	33
6	Dlouhodobá adaptace	35
6.1	Neuronové sítě	35
6.2	HONU	35
6.2.1	Proces učení	36
6.2.2	Gradientová metoda	37
6.3	Návrh prostředí pro neuronové sítě	37

7	Vizualizace	39
8	Závěr	42

Seznam použitých značek

T_T	teplota tavení	$[^{\circ}C]$
F	válcovací síla	$[N]$
F_g	síla potřebná k eliminaci geometrické vypuklosti válců	$[N]$
F_t	válcovací síla nutná k eliminaci teplotní vypuklosti válců	$[N]$
F_p	válcovací síla nutná k eliminaci předohybu válců	$[N]$
K_T	korekční koeficient teplotní distribuce	$[-]$
\bar{T}	měřená teplota z pyrometru	$[^{\circ}C]$
F_r	repredikovaná síla	$[N]$
\bar{F}_r	měřená válcovací síla v průchodu	$[N]$
K_F	korekční koeficient síly	$[-]$
T_E	vstupní teplota	$[^{\circ}C]$
T_X	výstupní teplota	$[^{\circ}C]$
T_s	okamžitá teplota plechu	$[^{\circ}C]$
T_r	teplota válce	$[^{\circ}C]$
ΔT_A	teplotní ztráta do okolí	$[^{\circ}C]$
ΔT_d	teplotní změna způsobena deformací	$[^{\circ}C]$
ΔT_c	teplotní změna způsobena kondukcí mezi válcem a plátem	$[^{\circ}C]$
ΔT_f	teplotní změna způsobená třením	$[^{\circ}C]$
k_f	koeficient tření	$[-]$
c_s	tepelná kapacita	$[\frac{J}{kg \cdot ^{\circ}C}]$
w	šířka plechu	$[m]$
l_c	je délka kontaktu mezi válcem a plechem	$[m]$
γ_s	hustota materiálu plechu	$[\frac{kg}{m^3}]$
H_E	vstupní tloušťka	$[m]$
H_X	výstupní tloušťka	$[m]$
k_c	koeficient přestupu tepla	$[\frac{J}{mm^3/2 \cdot ^{\circ}C} \cdot \frac{m}{s^{1/2}}]$
v	rychlost plechu	$[m/s]$
σ_s	deformační odpor	$[MPa]$
L_E	vstupní délka	$[m]$
L_X	výstupní délka	$[m]$
t	čas	$[s]$
$\dot{\epsilon}$	rychlost deformace	$[1/s]$
M_k	kroučící moment	$[Nm]$
M_z	základní moment	$[Nm]$
M_t	třecí moment	$[Nm]$

M_{dyn}	dynamický moment	$[Nm]$
M_v	válcovací moment	$[Nm]$
ψ	součinitel tvaru	$[-]$
\mathbf{x}	vektor vstupů perceptronu	$[-]$
\mathbf{w}	vektor vah perceptronu	$[-]$
y	výstup perceptronu	$[-]$
$\phi(\cdot)$	aktivační funkce	$[N]$

1 Úvod

Základem obecného návrhu procesu válcování jsou matematicko-fyzikální modely, které zohledňují veličiny ovlivňující výsledné parametry výrobku. Modely sjednocují fyzikální parametry válcovaného materiálu, samotné válcovací stolice, silové a tepelné děje, které na soustavu působí a v neposlední řadě vlastního řídicího systému. Matematicko-fyzikální aparát použitý v modelech je kombinací teorie válcování, experimentálních metod a určité inženýrské zkušenosti zvláště v případě veličin vyjadřujících charakteristiky materiálu. Během odvozování těchto vztahů je použito velké množství hypotéz, které zjednodušují a urychlují výpočet. To ale vede k tomu, že přesnost těchto modelů je do určité míry limitována. Proto je nezbytné zahrnout do výpočtu i určitou adaptační složku, která zohledňuje odchylky vypočítaných hodnot od hodnot skutečných, získaných zejména měřením. Tuto odchylku zohledňuje výpočet pro další válcovací cyklus. Protože se ale vstupní parametry často mění, i tyto odchylky se mohou značně rozcházet. Proto je potřeba vytvořit určitý mechanismus, podle kterého můžeme model po určité době zkorigovat tak, že rozdíl vypočítaných a skutečných hodnot bude minimální. V případě válcování plechů je hlavním sledovaným parametrem jejich tloušťka a její uniformita napříč plechem. V této bakalářské práci se věnuji návrhu zmíněného mechanismu, jeho optimalizaci a následné implementaci části projektu, kterou jsem se zabýval ve společnosti PTSW, která se věnuje návrhu řídicích procesů pro válcování.

2 Válcovací proces

Válcování je technologický tvářecí proces, kde dochází ke změně mechanických vlastností a geometrického tvaru válcovaného materiálu průchodem mezi dvěma otáčejícími se válci uloženými ve tvářecím stroji - válcovací stolici. Důležitým dějem, který umožňuje tyto změny je vznik plastické deformace, která způsobuje nevratné změny tvaru tvářeného materiálu. Tvářecí proces obecně se dělí podle teploty na:

- Tvářením za tepla - probíhá při teplotách vyšších než je rekrystalizační teplota tvářeného materiálu
- Tvářením za studena - probíhá při teplotách nižších než je rekrystalizační teplota tvářeného materiálu

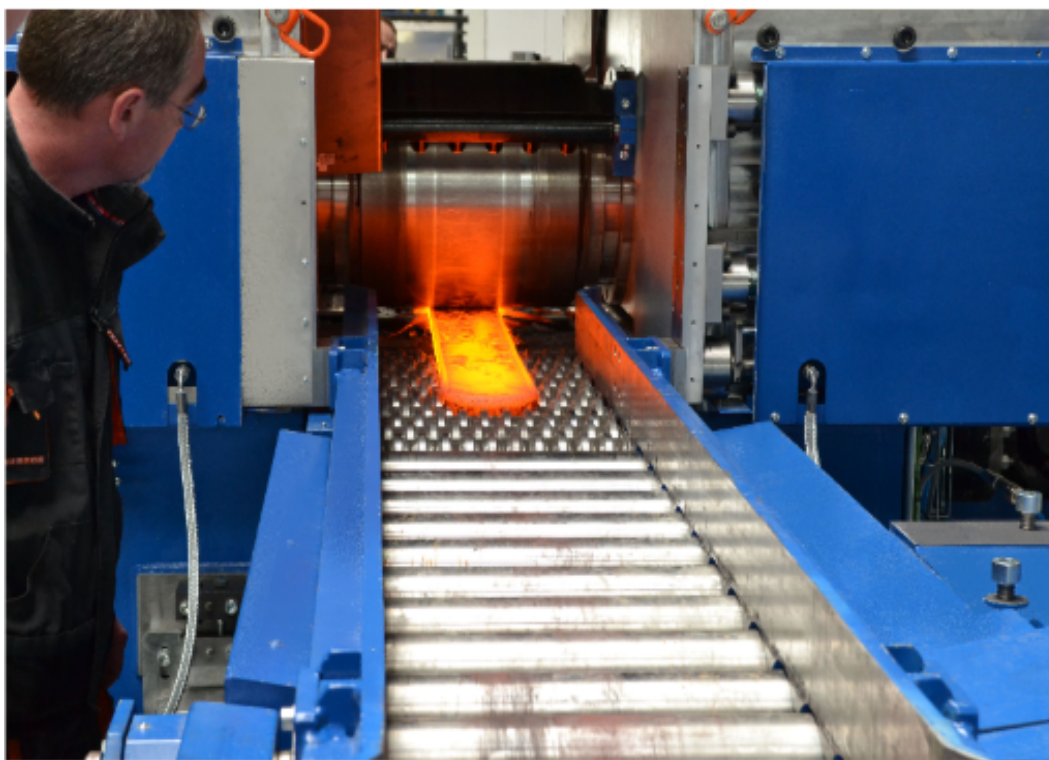
Rekrystalizační teplota - teplota, při které dochází k regeneraci deformovaných zrn vzniklých tvářením za studena beze změny krystalové mřížky. Je vyjádřena jako:

$$T_R = 0.4T_T \quad (1)$$

kde T_T je teplota tavení materiálu, °C. Hlavní výhody tvářením za tepla oproti tvářením za studena jsou, že se mohou použít nižší tvářecí síly, materiál se zpevňuje rovnoměrně a je velice tvárný. Nevýhodou je horší kvalita povrchu (vznik okujení) a menší přesnost rozměrů. Na obrázku č.1 je ukázka válcování za tepla.

2.1 Válcovací stolice

Součástí válcovací tratě, kde se odehrává samotný proces válcování se nazývá válcovací stolice. Jejím základem je stojan, ve kterém jsou uloženy pracovní válce ve valivých či kluzných ložiscích. Soustava obvykle obsahuje výškové stavění horního válce, čímž se definuje jeho vertikální poloha vymezující velikost úběru. Válce jsou poháněny výhradně elektrickým pohonem, který umožňuje snadnou a přesnou regulaci otáček. Krouťící moment mezi stolicí a motorem bývá redukován v převodové skříně. Důležitou charakteristikou válcovací stolice je její tuhost, která hraje podstatnou roli ve výpočtu válcovací mezery. U stolic se dvěma a více válci, se válce dělí na pracovní (dotýkající se přímo provalku) a opěrné. Na obr. 2 je schéma základního rozdělení válcovací stolic:

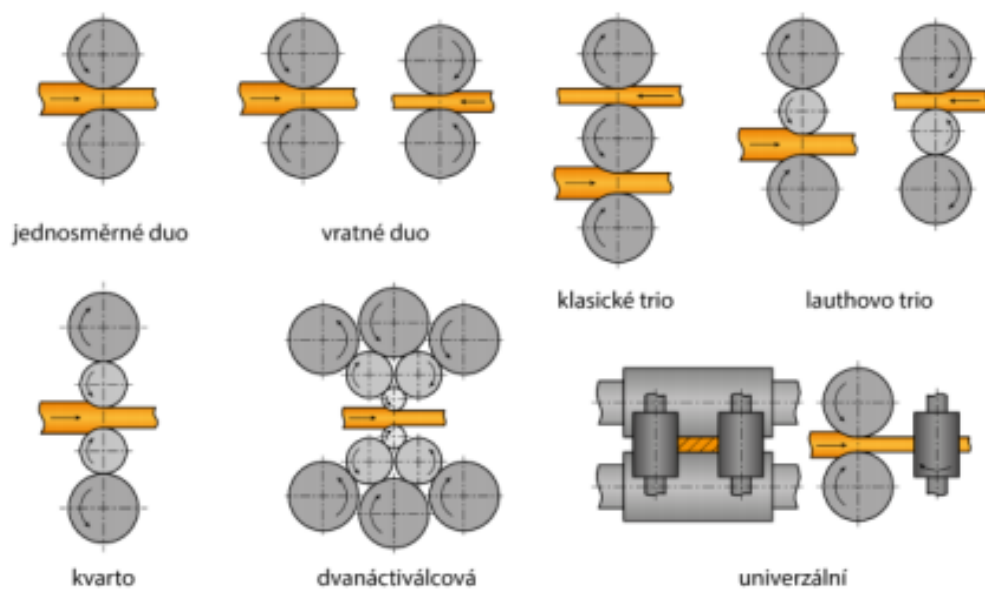


Obr. 1: Ukázka válcování

Pro každý typ stolice se liší výpočty parametrů válcovacího procesu (síla, teplota, tloušťka plátu), ale základní princip sledování a adaptace procesu je u všech vyjmenovaných typů válcovacích stolic podobný. Další část této práce bude věnována hlavně adaptaci vratného (reverzního) duha, kde jsou pláty válcovány jednotlivými průchody tam a zpět bez účasti opěrných válců. Slovo reverzní je důležité, protože u adaptace válcování s jedním průchodem a více válců za sebou by platily poněkud jiné adaptační mechanismy.

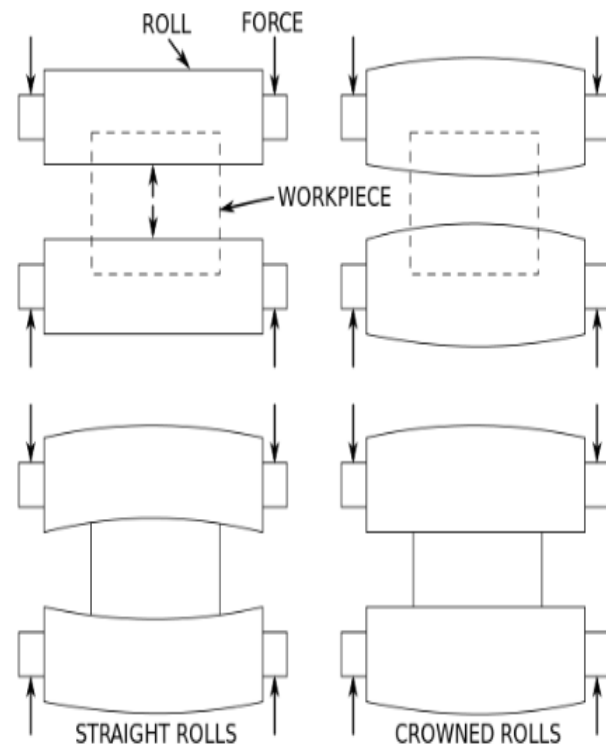
2.2 Pracovní válce

Pracovní válce tvoří základní část válcovací stolice. Vyrábějí se z tvrdých slitin kovů a podléhají relativně přísným tolerancím na jakost povrchu, aby případné odchylky měly minimální vliv na tvar válcovaného plechu. Válec při pokojové teplotě není po své délce rovný, ale lehce zakřivený (v rádech desetin



Obr. 2: Typy válcovacích stolic [1]

mm). Toto zakřivení se nazývá "koruna" (anglicky "crown") a zavádí se z toho důvodu, že válce se během válcování výrazněji prohnu. Zakřivení válce tento průhyb pomáhá kompenzovat a tak je výsledný válcovaný profil plechu rovnoměrnější. Koruna se vytvoří broušením válců a může být pozitivní nebo negativní, viz. obrázek č. 3:



Obr. 3: Koruna válců [2]

O pozitivní koruně mluvíme tehdy, když se průměr válce zvětšuje směrem od kraje do středu válce. O negativní, kdy se stejným směrem zmenšuje.

3 Model výpočtu

3.1 Omezující podmínky pro úběr

Aby bylo dosaženo určité výstupní tloušťky provalku, k jeho vyválnování nestačí pouze jeden průchod válcovací stolicí, ale celkový úběr se musí rozložit do několika dalších. Je to dáno následujícími faktory:

- maximální válcovací síla pro danou stolicí,
- maximální kroutící moment pro danou pohonovou soustavu

- přípustný úhel záběru provalku do válců Ω ,
- přípustná deformace tvářeného kovu z hlediska jeho porušení
- přípustný příčný profil provalku po jeho šířce při jeho konečné výstupní tloušťce,
- přípustné mechanické vlastnosti válcovaného kovu po ukončení posledního průchodu

V [3] jsou jednotlivé body popsány do hloubky. V této práci bych z nich zdůraznil to nejdůležitější.

3.1.1 Maximální válcovací síla

Mezní hodnota válcovací síly F_{max} je stanovena z dovoleného zatížení nejexponovanějšího strojního dílu stolice s určitým bezpečnostním koeficientem. Z této hodnoty se určují maximálně přípustné hodnoty úběrů provalku v jednotlivých průchodech ΔH_F .

3.1.2 Maximální kroutící moment

Mezní hodnota kroutícího momentu M_{max} je stanovena z dovoleného torzního zatížení nejexponovanějšího strojního dílu poháněcí soustavy válec-vřetenomotor. Pro plné využití elektromotoru by mělo být projekčně zajištěno, aby mezní hodnoty kroutících momentů strojích dílů poháněcí soustavy byly vyšší než jsou hodnoty momentové charakteristiky motoru. Maximální úběr pro mezní případ kroutícího momentu je ΔH_M .

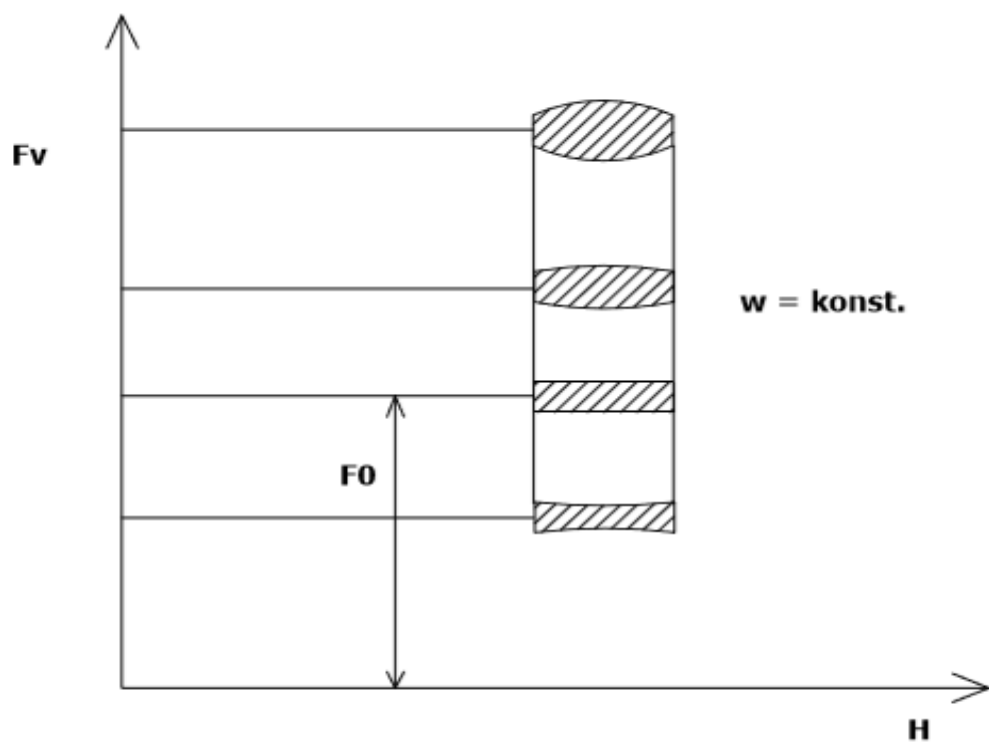
3.1.3 Přípustný úhel záběru

Záběrová schopnost válců je dána válcovací silou a součinitelem třením mezi válcovaným materiálem a pracovním válcem. Tato schopnost je charakterizována úhlem záběru Ω , do jehož mezní hodnoty lze provalek válci uchopit. Z něho se dopočte hodnota mezního úběru ΔH_M .

3.1.4 Přípustný příčný profil

Příčný profil provalku ve válcovací mezeře je zejména závislý na válcovací síle, která ovlivňuje průhyb pracovního válce. Stejně tak je důležité zohlednit

i geometrický a teplotní profil pracovních válců, kterému později bude věnována samostatná část. Pro zachování požadovaného příčného profilu je potřeba nalézt vhodný model průhybu válců, pomocí něhož by bylo možné určit limitní válcovací sílu v posledních průchodech válcovaného procesu. Pro jeho stanovení je nutná znalost tzv. charakteristické válcovací síly F_0 , která pro danou šířku provalku, danou geometrii válců a jejich teplotní profil zaručuje rovinný příčný profil provalku. Všechny síly F_v větší než F_0 způsobují vypuklost provalku a naopak všechny síly F_v menší než F_0 způsobují jeho vydutost. Grafické znázornění této skutečnosti je na obrázku č. 4.



Obr. 4: Vliv velikosti válcovací síly na příčný profil provalku při jeho konstatní šířce

Hodnoty síly F_0 lze jednoduše určit jako

$$F_0 = F_g + F_t + F_p \quad (2)$$

kde F_g je síla potřebná k eliminaci geometrické vypuklosti pracovní válců;
 F_t je válcovací síla nutná k eliminaci teplotní vypuklosti pracovních válců;
 F_p je válcovací síla nutná k eliminaci předohybu pracovních válců.

Je nutno podotknout, že vlivy jednotlivých eliminujících sil na změnu válcovací síly F_0 nejsou stejné. Na řadu tedy přichází zpracování výpočetního modelu, který si klade za cíl navrhnout průchodový plán pro válcovaný materiál na základě informací o materiálu, válcovací stolici, teplotě a rozměrech materiálu. Podle tohoto plánu se postupně nastavují mezery ve válcovací stolici, které vymezí výšku úběru. Rovnice popisující tepelné změny v materiálu nebo velikost válcovací mezery v závislosti na distribuci síly jsou značně náročné. Proto se většinou namísto analytického výpočtu používají metody konečných diferencí nebo konečných prvků, které se snaží skutečný model aproximovat s co nejmenší chybou. Modelové rovnice a výpočetní postupy jsou výsledky mnohaletého výzkumu a není cílem této práce se jimi do hloubky zabývat. Budou zde nastíněny obecné základy a pro hlubší pochopení bude nutno nahlédnout do odkazované literatury.

3.2 Fáze válcování

Ke zpracování modelu musíme také přistupovat podle toho, v jaké fázi se válcovaných plech nachází. Představíme si zde dvě základní válcovací fáze, kterými jsou tzv. válcování na hrubo a válcování dokončovací. Mezi těmito fázemi ještě materiál může procházet nějakými dalšími dílčími operacemi (tepelná úprava, odstranění okujení atd.).

3.2.1 Válcování na hrubo

Tato fáze válcování nastává po vyndání z pece, proto má materiál poměrně velkou tloušťku ($\geq 20mm$) a vysokou teplotu (800-1000 °C). Díky vyšší teplotě nás tolik nelimituje maximální velikost válcovací síly a úběry mohou být větší. Kdyby byly úběry příliš velké, vedlo by to ke zvlněnému podélnému a velice nerovnoměrnému příčnému profilu. U tlustých materiálů také mohou vyvstávat potíže při odhadu výstupní tloušťky materiálu. Pokud totiž válcovaný plech přijde do kontaktu s pracovním válcem, který má nižší teplotu o několik stovek stupňů, je teplotní distribuce v průřezu plechu díky jeho tloušťce zpočátku velice nerovnoměrná. To zapříčiní, že teplota v jádře plechu bude odlišná od měřené teploty povrchu, podle které se posléze bude adaptovat průchodový plán.

3.2.2 Válcování dokončovací

Zde již bývá materiál tenčí ($\leq 20mm$) a studenější, potřebné síly jsou větší než u válcování na hrubo. Tato fáze si klade za cíl dosáhnout cíleného profilu a tloušťky požadované tolerance (u tloušťky může být tolerance i $50 \mu m$). Průchodů je tedy více a s nižším úběrem.

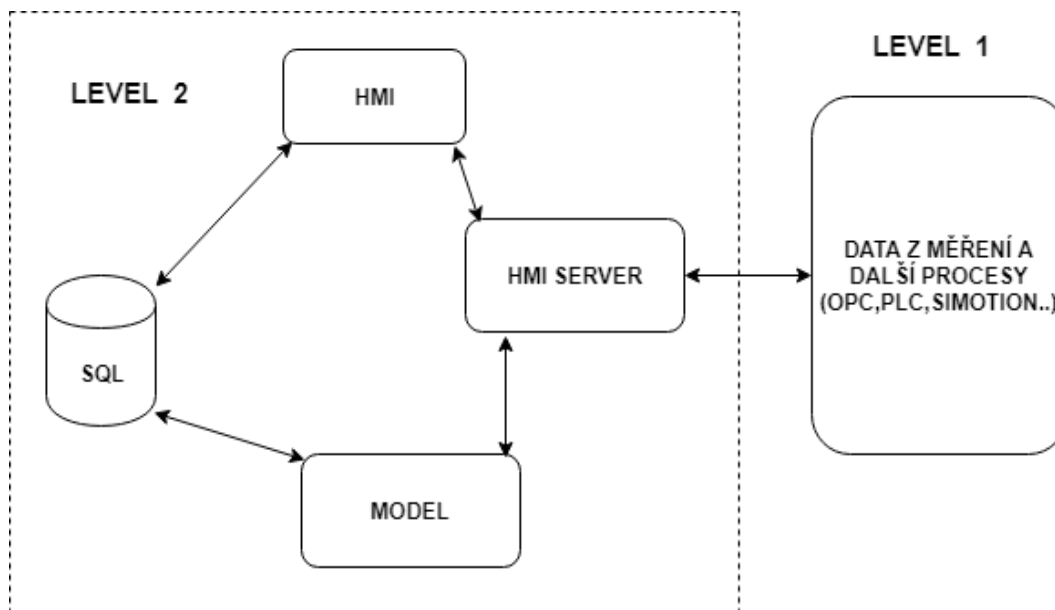
4 Sledování a implementace procesů

4.1 Měření veličin

Pro potřeby adaptace a zjišťování odchylek vypočteného průchodového plánu se na válcovací trati sbírá poměrně velké množství senzoricky měřených dat. Povrchová teplota plátu je zaznamenávána pomocí pyrometrů, které jsou umístěny na obou stranách válcovací stolice přibližně 0,5 m od středu válců. Některé válcovny mají teplotní senzory a senzory zachycující velikost tření zabudované přímo ve válcích. Při tomto způsobu měření je možné lépe nahlédnout do dějů, které se odehrávají v kontaktu mezi válcem a plátem. Výroba takto vybavených pracovních válců je ale daleko nákladnější a pro tento projekt toto měření nebylo zavedeno, takže jej v této práci uvažovat nebudeme. O měření rychlosti plátu se starají fotonky, které jsou rozmístěny vedle trati v určité vzdálenosti od sebe. Podle zaznamenané polohy a následným porovnáním s časem vypočítáme požadovanou rychlost plechu. Rychlost válců stejně jako válcovací síla a moment jsou určeny parametry hnacího elektromotoru. Teprve po vyválcování všech průchodů se změří tloušťka a profil materiálu pomocí laseru.

4.2 Implementace procesů

Architektura řídicího procesu je rozdělena na dvě základní úrovně. Říkejme jim Level 1 a Level 2. Level 1 se stará o logiku a aktuaci procesů ve válcovně a samotné měření dat. Level 2 má na starost výpočet průchodových plánů, sledování pohybu materiálu ve válcovně, zpracování měřených dat a jejich vizualizaci. Hlavní části Level 2 jsou HMI (Human Machine Interface), SQL databáze a výpočtový model. Na obr. č. 5 je znázorněna základní architektura procesu.



Obr. 5: Architektura

HMI vytváří uživatelské prostředí pro operátora, který tam má například možnost nakonfigurovat vstupní parametry válcovaného plechu, provádět testovací kalkulace válcovací pláňů, vidět stav plechu v průběhu válcování nebo sledovat stav pracovních válců. Výpočtový model zpracovává konfigurační a posléze i měřené hodnoty a přepočítává průchodový plán. Požadavky na výpočet a zpracování hodnot jde přes HMI server, který kromě toho ještě zpracovává požadavky z jiných procesů. Celá komunikace funguje na bázi klient-server. Všechny potřebné hodnoty (konfigurační, hodnoty z měření atd.) jsou ukládány do SQL databáze. Výpočetní modely jsou kvůli rychlosti implementovány v jazyce C++. HMI a HMI server jsou implementovány v jazyce C#. Pro vývoj všech částí Level 2 (kromě SQL databáze) bylo použito vývojové prostředí Microsoft Visual Studio.

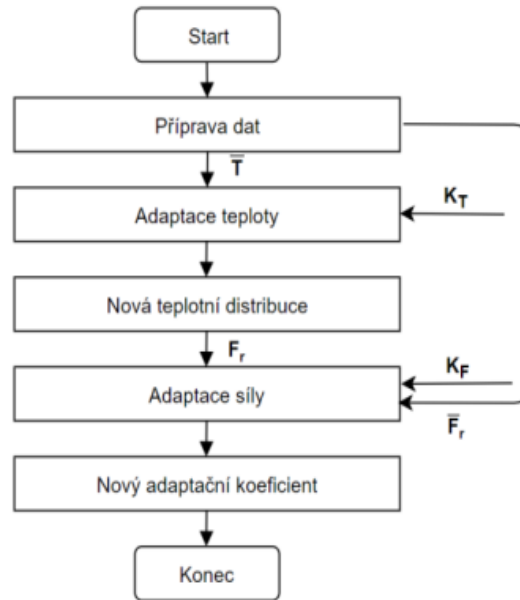
Celý proces válcování od vyndání materiálu z pece až po dokončení posledního průchodu se skládá ze sledu několika operací. Může to být například vlastní válcování, kdy se výrazně mění tloušťka materiálu nebo jen "odpočívací" fáze, kdy materiál stojí na dopravníku a čeká na další zpracování. Návrh programu je koncipován tak, že pro každý typ operace, kterou materiál podstupuje, je vytvořena třída oddělená ze třídy "Operace". Třída definuje vlastní atributy, které určují zpracování provalku v dané

operaci. Objekty těchto tříd (jednotlivé operace) budou umístěny v poli za sebou podle časové posloupnosti a budou mít jiné hodnoty těchto atributů, podle toho, jak se materiál bude vyvíjet. U těchto operací zpravidla sledujeme jejich počáteční a koncový stav. Protože operace na sebe navazují, počáteční stav jedné operace bude stejný jako koncový stav předchozí operace.

Příklad.: Mějme zjednodušené válcování, které se sestává ze dvou typů operací - "Průchod" a "Odpočinek". Řekněme, že pro zadané parametry model vypočítal počet průchodů na 8. Bude tedy vytvořeno 8 objektů třídy "Průchod" a 9 objektů třídy "Odpočinek", protože tyto dvě operace se střídají. Posloupnost operací tedy názorně bude vypadat "Odpočinek" - "Průchod" - "Odpočinek" - "Průchod" atd.

5 Adaptace

Hlavní faktory ovlivňující proces válcování jsou teplota a válcovací síla. Přesnost predikce těchto dvou parametrů je základním kamenem pro kvalitu výsledného vývalku. Tyto veličiny jsou na sobě značně závislé a je potřeba toto zohlednit při jejich korekci. Jak již bylo zmíněno v úvodu, i přesto, že používané výpočtové modely jsou často sofistikované a robustní, je téměř nemožné předvídat a zohlednit všechny děje, které do procesu vstupují. Nastává proto rozdíl mezi předpokládanými a skutečnými hodnotami těchto podmínek. Vyskytnou-li se tyto rozdíly v samém procesu válcování, pak následně zjištěné odchylky vstupních parametrů od predikovaných hodnot způsobí nejen dodatečnou změnu válcovací síly, ale i výstupní výšky provalku. Je snaha, aby tyto nepředpokládané změny vstupních podmínek válcování byly v průběhu procesu co nejrychleji vykompenzovány. A to například regulací jiného vstupního parametru, aby původně požadovaná výstupní tloušťka provalku zůstala nezměněna. Pokud nelze některé odchylky vstupních parametrů v průběhu válcování zpětně identifikovat, ale jen lze zjistit rozdíl mezi původně předpokládanou a skutečně zjištěnou veličinou (síla, momentem), považujeme jmenovité hodnoty podmínek tváření za neměnné a rozdíl hodnot přičítáme nepřesnosti modelových rovnic. Z tohoto rozdílu pak provedeme rychlou adaptivní korekci modelových rovnic a znovu nový výpočet válcovací síly pro stejné jmenovité hodnoty vstupních parametrů podle adaptivně upraveného modelu [3]. Obecný algoritmus pro adaptaci válcování je znázorněn na následujícím schématu (obr. č. 6).

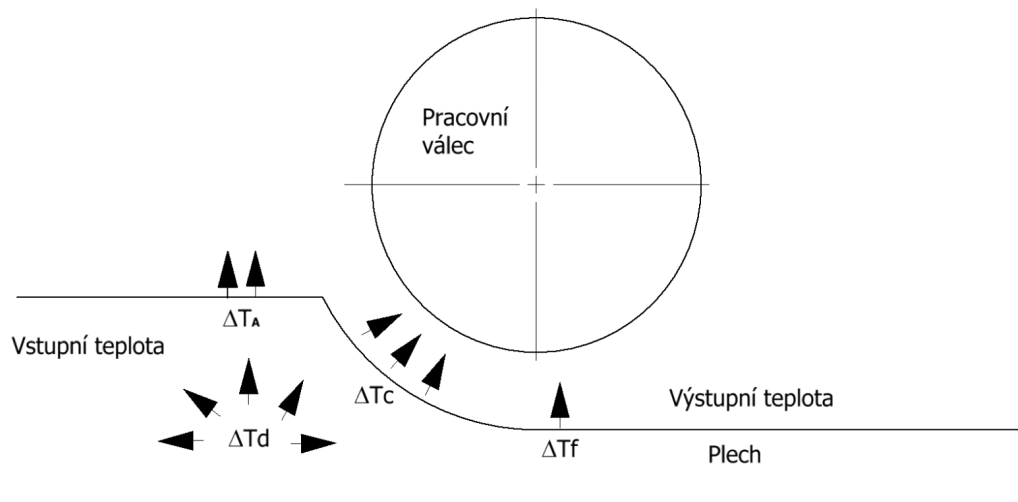


Obr. 6: Adaptační mechanismus

kde K_T je korekční koeficient teplotní distribuce, \bar{T} je měřená teplota z pyrometru, °C; F_r je repredikovaná síla, N; \bar{F}_r je měřená válcovací síla v průchodu, K_F je korekční koeficient síly.

5.1 Adaptace teploty

V průběhu válcování se materiál většinou externě nepřihřívá a tak jeho teplota mezi prvním a posledním průchodem se často liší v řádech stovek stupňů Celsia. Pevnostní charakteristiky materiálu jsou ze značné části závislé na teplotě a proto je nutné vývoj teploty sledovat. Pro velkou skupinu materiálů jsou již v tabulkách zpracovány charakteristiky chování materiálu při různých teplotách. Ale např. pro některé nově válcované slitiny není dostatek dat a válcovna musí provést vlastní materiálové zkoušky (např. trhací nebo vnikací). Ale i když bychom poměrně přesně odhadli např. koeficienty přestupu tepla, tak nejsme při návrhu schopni určit směr a rychlost všech tepelných toků. Proto se před uváděním do provozu provádí zkušební válcování, kdy se výpočtový model testuje a ladí pro jednotlivé materiály. Na obr. 7 jsou znázorněny tepelné děje mezi válcem a plátem:



Obr. 7: Tepelné děje mezi válci a plechem

Sledování teplotní modelu na reverzní válcovací stolici by se dalo rozdělit do tří následujících částí.

5.1.1 Operace před prvním průchodem

Touto prvotní operací rozumíme tu část, kdy je materiál vyndán z pece a jeho cestu na dopravníku než začne vjíždět do válcovací stolice. Po té co je materiál vyndán z pece na dopravník je jeho teplota změřena a model dostává signál k novému přepočítání průchodového plánu již s aktuální teplotou, aby se podchytila případná odchylka od hodnoty nastavené. Zároveň se inicializuje čas, se kterým model dále počítá. Cesta materiálu od pece k válcovací stolici může trvat až několik desítek vteřin a mohou na ní probíhat nějaké dílčí procesy, jako například odstranění okují. Během této operace probíhají teplotní změny pouze vlivem teplotní ztráty do okolí ΔT_A . Toto teplo je vydáváno hlavně zářením a konvekcí do okolního prostředí. Před vstupem materiálu do válcovací stolice se změří teplota plátu pyrometrem. Bezprostředně po tomto měření by bylo možné průchodový plán znovu přepočítat, ale v našem případě tento přepočet vynecháme, protože není jisté, jestli by model stačil kalkulaci provést včas. Nějaký čas ještě zabere nastavení válcovací mezery.

5.1.2 Válcovací operace

Válcovací operací rozumíme tu část, kdy materiál začne vjíždět do stolice a je tvářen. Do této části procesu již vstupuje více vlivů, jako například deformační teplo, teplo způsobené třením nebo tepelná kondukcce mezi válcem a plátem.

Teplotní diferenci jednoho průchodu způsobenou vlastním válcováním můžeme vyjádřit jako

$$T_X = T_E + \Delta T_A + \Delta T_d + \Delta T_c + \Delta T_f \quad (3)$$

kde T_X je výstupní teplota, $^{\circ}C$; T_E je vstupní teplota, $^{\circ}C$; ΔT_A je teplotní ztráta do okolí, $^{\circ}C$; ΔT_d je teplotní změna způsobena deformací, $^{\circ}C$; ΔT_c je teplotní změna způsobena kondukcí mezi válcem a plátem, $^{\circ}C$; ΔT_f je teplotní změna způsobená třením, $^{\circ}C$;

Teplo vytvořené třením je způsobené relativní skluzem mezi válcem a povrchem plátu. Absorbované teplo vede k ohřátí plátu. Tato teplotní změna může být vyjádřena jako

$$\Delta T_f = k_f \frac{1000F}{wl_c c_s \gamma_s} \quad (4)$$

kde k_f je koeficient tření, F je válcovací síla, N ; c_s je tepelná kapacita, $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$; γ_s je hustota, kg/m^3 , w je šířka plechu, m . l_c je délka kontaktu mezi válcem a plechem, m . Deformační teplo je tvořeno během procesu plastické deformace. Je vyjádřena jako

$$\Delta T_d = k_d \frac{\sigma_s \ln\left(\frac{H_E}{H_X}\right)}{c_s \gamma_s} \quad (5)$$

kde k_d je deformační koeficient, σ_s je deformační odpor, MPa ; H_E, H_x jsou vstupní a výstupní tloušťka, mm ; Konduktivní teplotní změna je způsobena teplotním rozdílem mezi válcem a plátem. Je vyjádřena jako

$$\Delta T_c = k_c \frac{(T_s - T_r) \sqrt{\frac{l_c}{v}}}{H_X c_s \gamma_s} \quad (6)$$

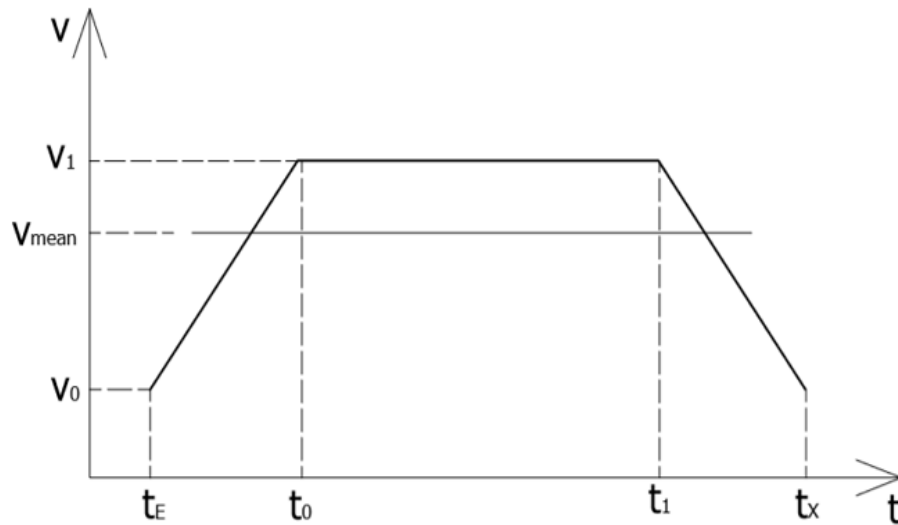
kde k_c je koeficient přestupu tepla, $J(m/s)^{1/2}/(mm^{3/2} \cdot ^{\circ}C)$; T_s je teplota provalky, $^{\circ}C$; T_r je teplota válce, $^{\circ}C$; v je rychlost plechu m/s . Byly použity teplotní modely podle [4]. Střední rychlost válcování můžeme odvodit z

rychlostního profilu válců a délky válcovaného plátu. Během tohoto procesu lze zanedbat změnu šířky a zároveň platí zákon zachování hmoty. Válcovanou délku tedy lze vyjádřit jako:

$$L_X = L_E \frac{H_E}{H_X} \quad (7)$$

kde L_E, L_x jsou vstupní a výstupní délka, mm .

Rychlost v průběhu válcování není konstantní, ale prochází nějakým zrychlením a zpomalením. Můžeme zavést tzv. střední rychlost v_{mean} , která je znázorněna na obrázku č. 8:



Obr. 8: Rychlostní profil válcování

Z obrázku ji můžeme odvodit jako integrál okamžitých rychlostí poděleno celkovou dobou operace:

$$v_{mean} = \frac{v_1 - v_0}{2(t_X - t_E)} (t_0 - t_E + 2(t_1 - t_0) + t_X - t_1) \quad (8)$$

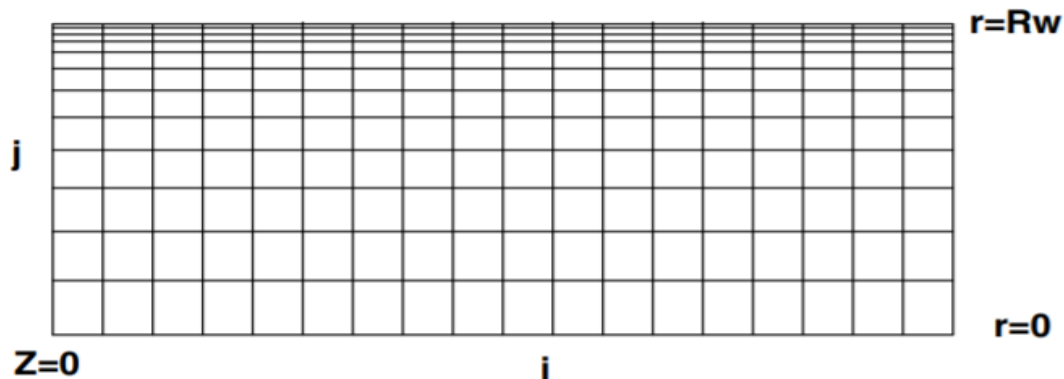
Povrchovou výstupní teplotu zase kontinuálně zaznamenává pyrometr. Po vyjetí celého plátu ze stolice se pošle informace se všemi naměřenými daty do modelu ke zpracování.

5.1.3 Odpočívací operace

Tato operace nastává mezi jednotlivými průchody a svým charakterem je velice podobná operaci před prvním průchodem. Opět na ni mohou probíhat nějaké dílčí operace, ale primárně slouží k homogenizaci teploty válcovaného materiálu a ustálení teploty pracovního válce. Po předešlé válcovací operaci, kde probíhaly velké plastické deformace, je v materiálu rozložena teplota velmi nehomogenně a dalším okamžitým zpracováním by mohlo docházet k nerovnoměrným uběrům materiálu. Teplotní expanzi na pracovním válci je věnována další kapitola. Fáze trvá 6-12 vteřin. Tuto dobu je opět nutné zaznamenat a spolu s měřenou teplotou po dokončení průchodu odeslat do modelu ke zpracování. Po uplynutí této doby materiál začne vjíždět do stolice a celý proces se opakuje až do posledního průchodu.

5.1.4 Teplotní model válce

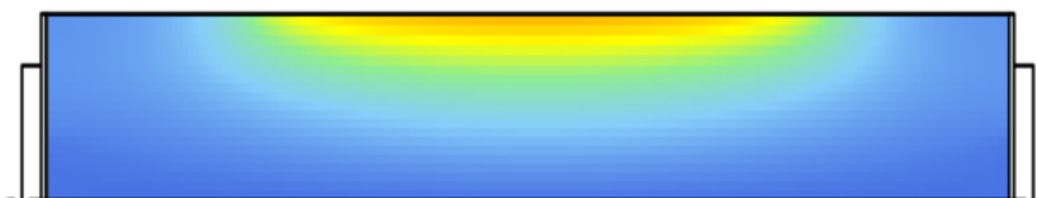
Současně se sledováním vývoje teploty válcovaného materiálu je nutné sledovat i teplotní distribuci samotného válce. Po kontaktu s horkým materiálem se vystavená část válce začne rozpínat a tvoří se tzv. "teplotní koruna"(anglicky "thermal crown"). Ta má dále vliv na tvar profilu válcovaného materiálu a musí se s ní počítat při nastavení válcovací mezery. Tepelné děje ve válci a následná teplotní expanze je počítána numericky metodou konečných diferencí. Válec se geometricky rozdělí na malé segmenty, na kterých se počítá teplotní změna. Aby se ušetřil výpočetní čas, uvažujeme, že teplotní distribuce se bude měnit hlavně průřezu válce a bude symetrická. Tímto způsobem vznikne síť jako na obrázku č. 9:



Obr. 9: Neuniformní výpočetní síť

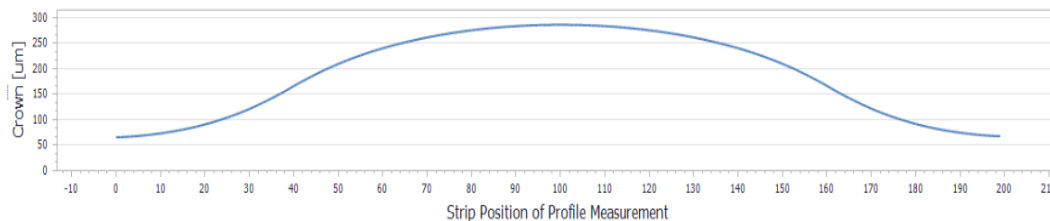
Je potřeba použít neuniformní rozložení sítě (sít' je hustší se zvětšujícím se poloměrem), protože na povrchu, kde válec přichází do kontaktu s válcovaným materiálem, očekáváme větší teplotní gradienty. V našem modelu byla sít' rozdělena na 200 segmentů po délce a 20 po šířce. Konkrétní postup výpočtu je zpracován v [4].

V průběhu válcovacího procesu je potřeba, aby se teplota válců stále aktualizovala, ať už na něj působí pouze teplota okolí nebo teplo z válcovaného materiálu. Výpočtový model počítá s určitým časovým krokem a tento krok musí být maximálně 3 vteřiny, aby teplotní gradient nebyl příliš velký a model konvergoval. Když se válcuje, tak se teplota aktualizuje na každém odválcovaném 0.5 metru délky. Na obrázku č. 10 je v HMI znázorněna vizualizace oteplení válce po několika odválcovaných průchodech.



Obr. 10: Teplotní distribuce průřezem válce

Vidíme, že hlavní teplotní změny probíhají blízko povrchu, v prostřední části válce (Sytě červená barva - cca 100 °C). Když se válcuje v dostatečných časových intervalech, povrch válce chladne poměrně rychle, protože teplo se rychle rozkládá do okolní hmoty. Na obr. č. 11 je graficky vynesena teplotní koruna válce, tedy změna velikosti průměru oproti počáteční hodnotě:



Obr. 11: "Koruna" válce způsobená teplotní expanzí

Největší teplotní expanze bude na prostředním disku. S touto

hodnotou bude nutno počítat při nastavení válcovací mezery.

5.2 Adaptace síly

Při adaptaci síly budeme vycházet z podmínky, že vstupní a výstupní hodnoty geometrických rozměrů provalku i válcovací mezery jsou při daném procesu spolehlivě identifikovány a nespolehlivost v identifikaci nastává pouze při definování teplotních, třecích a materiálových faktorů [3].

Díky určité poddajnosti válců nebude válcovací poloměr konstantní, ale bude se postupně zvětšovat v závislosti na válcovací síle. Dále se znalostí aktuální vstupní a výstupní tloušťky, válcovací rychlosti můžeme vypočítat poměrnou deformaci $\dot{\epsilon}$. Pro výpočet deformačního odporu materiálu σ_s , MN/mm²; použijeme nově přepočítanou teplotní distribuci T . Pro předpokládané vstupní parametry byla síla stanovena jako:

$$F = \sigma_s(T, \dot{\epsilon})l_c w \quad (9)$$

l_c je délka kontaktního oblouku, m; w je šířka provalku, m. Experimentálně však pro dané podmínky válcování byla zjištěna hodnota válcovací síly \bar{F} , která je odlišná od F . Znamená to, že při neměnné tuhosti stolice bude pro skutečné hodnoty válcování platit jiná výstupní tloušťka H_X . Abychom za těchto podmínek válcování udrželi konstantní původně požadovaou výstupní tloušťku je nutno pro další průchody regulačním zásahem změnit nastavení válcovací mezery. Adaptivní úpravu modelových rovnic pro sílu charakterizujeme korekčním součinitelem:

$$k_{FU(K)} = \frac{\bar{F}}{F} \quad (10)$$

Pro účely ladění adaptace je vhodné zavést konstantu β ; $0 \leq \beta \leq 1$, určující stupeň využití adaptivně upraveného modelu válcovací síly z předchozího průchodu v následujícím průchodu. Poté by pro aktuální korekční koeficient k_F platilo:

$$k_{F(K)} = \beta k_{FU(K-1)} + (1 - \beta)k_{FU(K)} \quad (11)$$

kde K je aktuální průchod. Tedy při $\beta = 0$ bereme pouze v potaz aktuální koeficient naopak pro $\beta = 1$ plně využíváme předchozí koeficient. V praxi se často volí $\beta = 0.5$ a platí pro všechny průchody konstantně.

Podle [3] se při výpočtech někdy doporučuje, aby hodnota adaptivního

součinitele respektovala i hodnoty skutečných adaptivních součinitelů z několika přechozích průchodů. Jedna z variant pro stanovení hodnoty pro stanovení hodnoty předpokládaného adaptivního součinitele je uvedena ve tvaru:

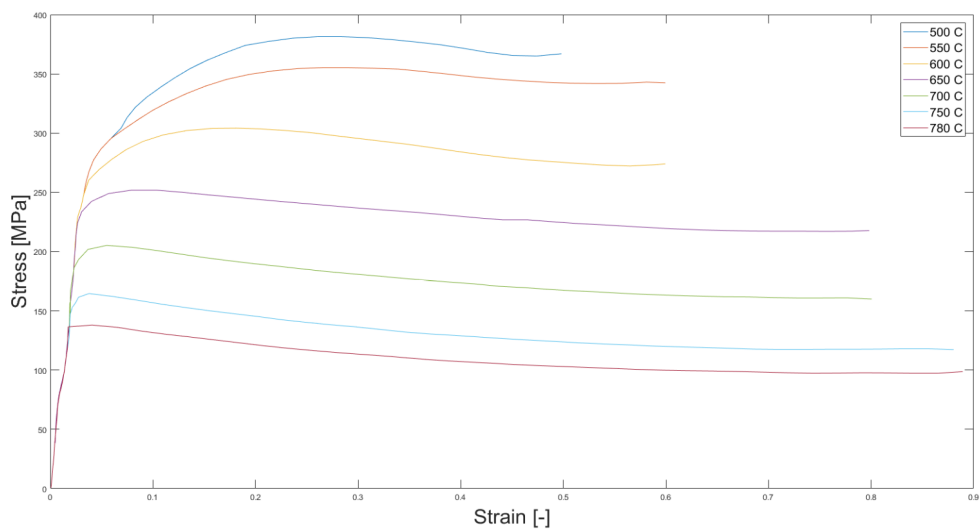
$$k_F(K) = \frac{\sum_{n=1}^K n k_{FU(n)}}{\sum_{n=1}^K n} \quad (12)$$

Podle této varianty výpočet válcovací síly v následujícím průchodu respektuje skutečné korekční faktory z předchozích průchodů, které ale postupem času ztrácí na důležitosti. Největší váhu má poslední předchozí průchod. Výsledná rovnice pro určení síly s uvážením korekčního koeficientu bude:

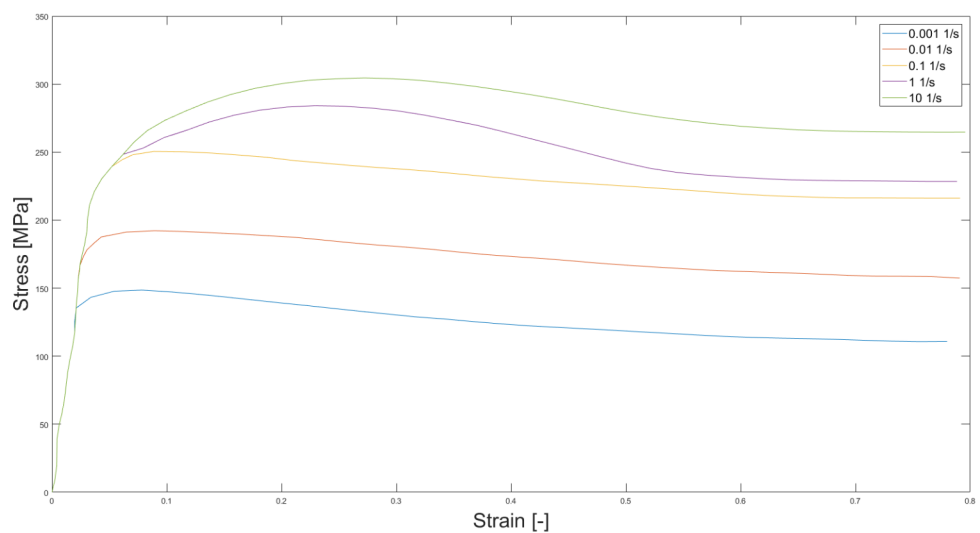
$$F = \sigma_s(T, \dot{\epsilon}) l_c w k_{F(K)} \quad (13)$$

5.3 Deformační odpor

Neznalost přesné závislosti deformačního odporu na deformaci a teplotě je hlavní příčinou velkých korekčních koeficientů. Z hlediska dlouhodobé adaptace je potřeba, aby se křivky, se kterými model pracuje, dostatečně přesně blížili k závislostem skutečným. Velikost deformačního odporu vztahujeme hlavně k teplotě, deformaci a rychlosti deformace. Jelikož se chemické složení jednotlivých řad materiálů může lišit, tyto závislosti se přesněji ladí až po výsledcích zkušebních válcování. Rád bych ale nastínil, jak taková závislost může vypadat. Mechanickým vlastnostem v tlaku podobných typů slitiny, na které se zaměřuje tento projekt, se věnovali v [5]. Konkrétně se jedná o slitinu s názvem Zircaloy-4, používané jako obložení trubek pro jaderné palivo a to díky svému nízkému neutronovému účinnému průřezu. Hlavní složky této slitiny jsou zirkonium (Zr), cín (Sn), železo (Fe), chrom (Cr) a kyslík (O). Autoři testovali materiál v rozsahu teplot $500 - 780^\circ C$ a rychlosti deformace $10^{-3} - 10s^{-1}$. Závislost deformačního odporu (angl. Stress) na deformaci (angl. Strain) a na teplotě (angl. Temperature) při konstantní rychlosti deformace (angl. Strain rate) $0.1s^{-1}$ je zobrazena na obr. č.12. Naopak závislost deformačního odporu na deformaci a její rychlosti při konstantní teplotě $650^\circ C$ je zobrazena na obr. č. 13.



Obr. 12: Závislost deformačního odporu na deformaci a teplotě při rychlosti deformace $0.1s^{-1}$



Obr. 13: Závislost deformačního odporu na deformaci a rychlosti deformace při teplotě $650^{\circ}C$

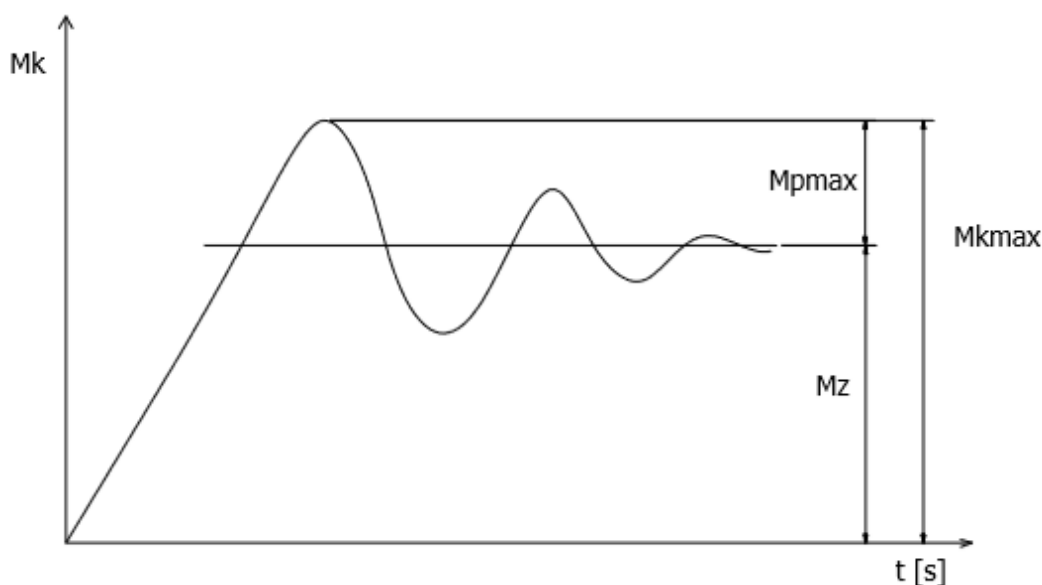
Z grafů můžeme odečíst, že deformační odpor roste se snižující se teplotou a se zvyšující se rychlostí deformace. Rychlost deformace má

největší vliv na deformační odpor přibližně na intervalu $[0, +1]$, poté se růst velice zpomalí. Při válcování na duo stolici se u deformace většinou pohybujeme v rozmezí $[0.05, 0.25]$.

5.4 Moment

Poháněcí soustava (motor-vřeteno-válec) v průběhu válcovacího průchodu přenáší kroutící moment M_k , který je složen ze dvou složek. Základního momentu M_z , který je určen technologickými, rychlostními a třecími parametry válcovacího procesu a oscilující přídatné složky M_p (obr. č. 14). M_p je způsobena odezvou pružné pohonové soustavy na časovou změnu základního momentu M_z . Obecně kroutící moment můžeme vyjádřit jako:

$$M_k(t) = M_z(t) \pm M_p(t) \quad (14)$$



Obr. 14: Průběh kroutícího momentu

Základní moment M_z se skládá z válcovacího momentu M_v , třecího momentu M_t a momentu dynamického M_{dyn} podle vztahu

$$M_z(t) = M_v(t) + M_t(t) \pm M_{dyn}(t) \quad (15)$$

Dynamický moment M_{dyn} udává moment, který potřebují hmotné části poháněcí soustavy ke změně své rychlosti. Vyjádřit ho můžeme podle vztahu

$$M_{dyn} = \sum_{i=1}^n J_i \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (16)$$

kde J_i je hmotný moment setrvačnosti jednotlivých rotujících i dílů válcovací stolice a vřeten včetně motoru rotoru, $kg.m^2$, $\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ je úhlové zrychlení rotující součásti, s^{-2} . Třecí moment M_t zahrnuje výsledný moment všech třecích sil rotačně se pohybujících součástí poháněcí soustavy. Pro stolici duo platí vztah

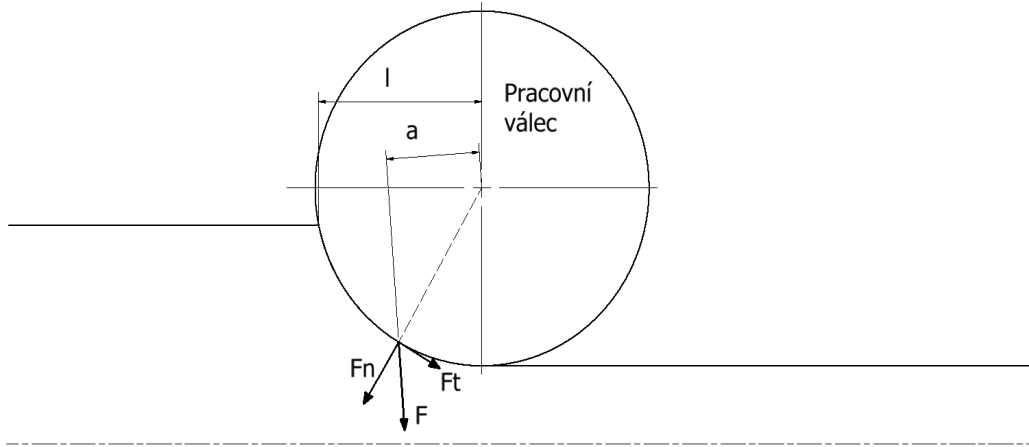
$$M_t = M_{up} + M_{uv} + M_{um} \quad (17)$$

kde M_{up} je moment nutný k překonání sil v uložení pracovních válců, M_{uv} je moment nutný k překonání sil v uložení vřetena, M_{um} je moment nutný k překonání sil v uložení motoru.

Hlavní složkou základního momentu je moment válcovací M_v . Bohužel tato složka je nejnáročnější na výpočet. Kromě deformačního odporu, síly a rychlosti nám do výpočtu vstupuje ještě proměnlivý válcovací poloměr (zvětšující se zatěžující silou) a hlavně tření, které významně mění rozklad silových poměrů mezi pracovním válcem a plátem. Součinitel tření závisí hlavně na lubrikaci stykové plochy, na teplotě a povrchu stykových ploch. Pro výpočet momentu vyjdeme ze vzorce:

$$M_v = F\psi l \quad (18)$$

kde l je horizontální průmět délky záběrového oblouku pracovního válce; ψ je součinitel tvaru. Postup výpočtu tvarového součinitele ψ je relativně komplikovaný a je popsán např. v [3]. Je značně závislý na ramenu výsledné přitlačné síly a , které je spolu s celkovým rozkladem sil ve válcovací mezeře vidět na obr. č. 15.



Obr. 15: Rozložení sil mezi válcem a plechem

Mechanismus pro získání momentového krátkodobého korekčního koeficientu bude prakticky stejný jako u adaptace síly. Předpočítaný moment zde porovnáváme se skutečným kroutícím momentem na pracovním válci. Tedy pro výsledný korekční koeficient pro moment $k_{M(K)}$ můžeme použít například vztah

$$k_{M(K)} = \gamma k_{MU(K-1)} + (1 - \gamma) k_{MU(K)} \quad (19)$$

kde γ je stupeň využití adaptivně upraveného modelu momentu z předchozího průchodu v následujícím průchodu. Výsledný vztah pro válcovací moment tedy bude:

$$M_v = F\psi l k_{M(K)} \quad (20)$$

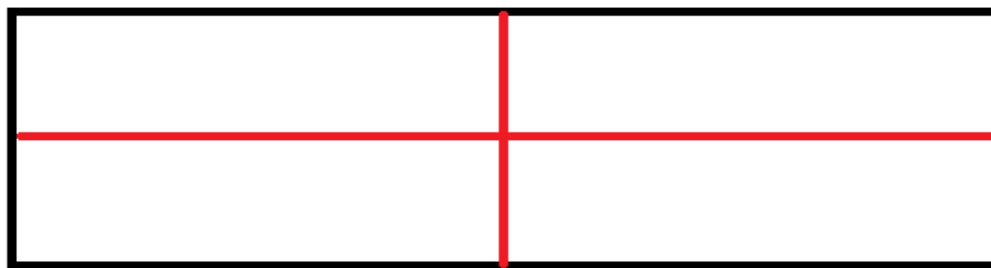
kde $k_{M(K)}$ je zmíněný momentový korekční koeficient K-tého průchodu.

5.5 Nastavení válcovací mezery

Před každým průchodem je potřeba správně nastavit válcovací mezeru. Ta není stejně velká jako výstupní tloušťka materiálu z průchodu, ale zohledňuje i další aspekty, jako například průhyb stolice při válcování, teplotní korunu válce a korekci předchozího válcování. Tvar pro výpočet můžeme vyjádřit ve zjednodušeném tvaru jako:

$$H_{gap} = H_X + H_{corr} + H_{crown} + H_{ofilm} - H_s - H_r \quad (21)$$

kde H_{gap} je velikost válcovací mezery, H_{corr} je korekce tloušťky po předchozích válcováních, H_{crown} je zvětšení díky teplotní koruně pracovního válce, H_{ofilm} je výška olejového filmu (pokud se používá mazivo), H_s je velikost průhybu stolice od válcovací síly F_v , H_r je výška smrštění materiálu díky elasticitě. Výpočet hodnot H_s a H_r se dají najít v [3]. Jako velikost hodnoty H_{crown} bereme největší hodnotu teplotní koruny po délce (téměř vždy to bývá prostřední hodnota - kap. 9.1.4). Hodnota H_{corr} bude muset být odvztažena při porovnání vypočítaného výstupního profilu s hodnotami naměřené laserem. Jak již bylo zmíněno dříve, tloušťka a profil materiálu jsou změřeny až po vyválnování posledního průchodu pomocí laseru. Na obr. č. 16 je vidět trajektorie, po které laser měří.



Obr. 16: Červeně zvýraznění trajektorie měření laseru

Z obrázku je vidět, že hlavní část měření je cílena na prostřední části plechu. Je to logické, protože v této části očekáváme největší tloušťku materiálu. Korekci posledního válcování \bar{H}_{corr} dostaneme jednoduchým rozdílem

$$\bar{H}_{corr} = H_{XCalced} - H_{XMeas} \quad (22)$$

kde $H_{XCalced}$ a H_{XMeas} jsou vypočítaná, respektive měřená tloušťka. Nebylo by ale vhodné vzít rovnou tento korekční koeficient a použít jej rovnou do dalšího nastavení válcovací mezery. Vhodné bude spíše zaznamenávat hodnoty dlouhodoběji sledovat jejich vývoj a podle toho vymyslet adaptační mechanismus.

6 Dlouhodobá adaptace

S krátkodobou adaptací modelových rovnic jsme schopni relativně dobře vyladit žádané výstupní veličiny tvářeného materiálu. Korekční koeficienty ale mohou nabývat poměrně vysokých hodnot (v řádu několika jednotek). To může způsobovat jakousi početní oscilaci, která ladění ztěžuje. Proto je vhodné mít z hlediska delšího časového horizontu nějaký nástroj, který by již při počáteční kalkulaci na základě vstupních parametrů průchodového plánu korekční faktory předvídal. Jako tento nástroj nám mohou vhodně posloužit neuronové sítě. Pro tento projekt byly použity neuronové jednotky vyššího řádu HONU (High Order Neural Units) a byly navrženy Adamem Peichlem z Fakulty Strojní, ČVUT [6]. Z mé strany se jednalo spíše o implementaci do systému PTSW. V následující pasáži bych chtěl tedy nastínit jak jejich základní princip, tak i posléze návrh základního prostředí pro testování a vizualizaci.

6.1 Neuronové sítě

Základem neuronové sítě je perceptron, který poskytuje výstup jako nelineární funkci lineární kombinace neuronových vstupů a synaptických vah. Základní princip lineárního perceptronu můžeme popsat vektorem vstupů

$$\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_n]^T \quad (23)$$

vektorem vah

$$\mathbf{w} = [w_0, w_1, \dots, w_n]^T \quad (24)$$

a výstupní hodnotou

$$y = \phi(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) \quad (25)$$

kde $\phi(\cdot)$ je aktivační funkce.

6.2 HONU

Neuronové jednotky vyšších řádů vylepšují robustnost klasifikace dat tím, že kombinují vektor vstupů nelineárně a tím lépe zachycují korelace v systému. Obecně je můžeme zapsat ve tvaru:

$$y = \phi\left(w_0 + \sum_{i_1}^n w_{i_1} x_{i_1} + \sum_{i_1, i_2}^n w_{i_1, i_2} x_{i_1} x_{i_2} + \sum_{i_1, \dots, i_N}^n w_{i_1, \dots, i_N} x_{i_1} \dots x_{i_N}\right) \quad (26)$$

kde aktivační funkce $\phi(\cdot)$ je striktně monotónní. Počet takovýchto kombinací nám udává řád HONU. Například pro HONU prvního řádu by platilo:

$$y^1 = \phi\left(w_0 + \sum_{i_1}^n w_{i_1} x_{i_1}\right) \quad (27)$$

analogicky pro HONU druhého řádu (kvadratická HONU) platí:

$$y^2 = \phi\left(w_0 + \sum_{i_1}^n w_{i_1} x_{i_1} + \sum_{i_1, i_2}^n w_{i_1, i_2} x_{i_1} x_{i_2}\right) \quad (28)$$

Pro tento projekt si vystačíme s kvadratickou HONU, protože se zvyšujícím se číslem řádu dramaticky roste výpočetní složitost.

6.2.1 Proces učení

Cílem učení je nastavit váhy a prahy neuronové sítě tak, aby prováděla požadovanou činnost. Pro tuto činnost se předpokládá, že je dána topologie sítě. To znamená, že je dán počet vstupů a výstupů sítě, počet vrstev a neuronů v nich, způsob propojení neuronů a aktivační funkce neuronů. V našem případě chceme neuronovou síť naučit na známé korekční koeficienty (viz. kapitola 5), takže se jedná u učení s učitelem (Supervised learning). Určitou část korekčních koeficientů tedy budeme brát jako množinu trénovacích dat. Po naučení neuronové sítě ji otestujeme na validační části dat. Samotný proces učení je dynamickým procesem, který využívá informace v obsažených v souborech naměřených dat, expertních znalostí a numerických procedur ke zdokonalování vlastností sítě. Ve většině případů je hlavní náplní procesu učení ladění vah vstupů neuronů. Tato procedura v sobě musí obsahovat jednak určitou algoritmickou strategii nastavování vah a jednak numerické postupy, které jsou vyjádřeny matematickými vzorci. Důležitý problém, který neuronová síť evokuje, je konvergence neuronové sítě. Podle [7] konvergenčí procesu učení rozumíme schopnost procesu nastavit korektní a stabilní váhy neuronové sítě v konečně efektivním výpočetním čase. Pro konvergenci modelů se většinou využívá analogie s energetickým procesy. Podobně jako se u fyzikálních systému jejich stabilita vztahuje k oblasti minim na energetické ploše, tak u neuronových sítí hlídáme, jestli se stavový vektor sítě pohybuje na energetické ploše k některému stabilnímu stav.

6.2.2 Gradientová metoda

Jedním z používaných postupů učících algoritmů, který byl mimo jiné využit v tomto projektu, je postup minimalizace kvadrátu odchylky gradientovou metodou. Tato metoda aktualizuje váhy pro každý nový parametr tak, aby míra chyby sítě byla minimální. Jinak řečeno, nové váhy by měli snižovat míru chyby sítě e_k s jistým učícím koeficientem μ . Stabilita učícího procesu zde závisí na mohutnosti vstupů a výstupů a na zmíněném učícím koeficientu. Funkce jejíž vektor vah \mathbf{w} chceme optimalizovat je dána jako:

$$y(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^{n-1} w_i x_i \quad (29)$$

zavedeme *cost* funkci:

$$\text{cost}(\mathbf{w}, (\mathbf{x}^{(i)}, y^{(i)})) = \frac{1}{2} [y(\mathbf{x})^{(i)} - y^{(i)}]^2 \quad (30)$$

chubová funkce e_k potom bude:

$$e_k = \frac{1}{M} \sum_{i_1}^M \text{cost}(\mathbf{w}, (\mathbf{x}^{(i)}, y^{(i)})) \quad (31)$$

kde M je počet řádků matice *cost* funkce. Vektor vah \mathbf{w}_{k+1} upravený oproti hodnotě \mathbf{w}_k o diferenci $\Delta \mathbf{w}_k$ zapíšeme jako

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + \Delta \mathbf{w}_k \quad (32)$$

$$\Delta \mathbf{w}_k = -\mu \frac{\partial \text{cost}(\mathbf{w}, (\mathbf{x}^{(k)}, y^{(k)}))}{\partial \mathbf{w}} = \mu (y(\mathbf{x})^{(k)} - y^{(k)}) \mathbf{x}^{(k)} \quad (33)$$

kde k je počet iterací.

6.3 Návrh prostředí pro neuronové sítě

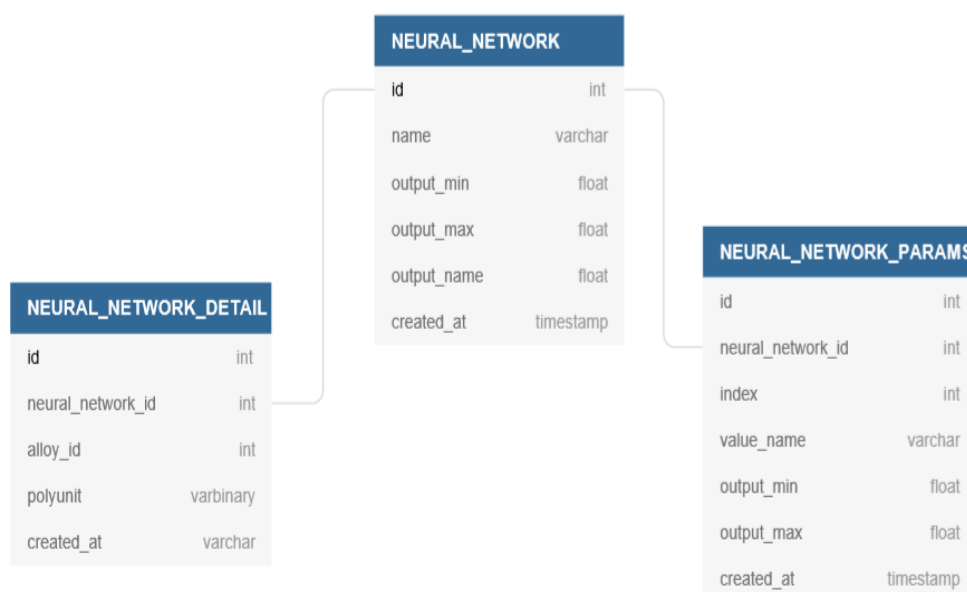
Softwarový balík, do kterého Fakulta Strojní ČVUT zapracovala model neuronových sítí bylo nutné napojit na systém, který používá firma PTSW. Cílem bylo, aby se neuronové sítě daly konfigurovat a testovat přímo z HMI prostředí. Kromě toho byl zde požadavek, aby se prostředí navrhlo obecně

tak, aby se neuronové sítě daly použít pro klasifikaci jakékoli další veličiny nebo pro úplně jiný projekt. Například v budoucnu bude zřejmě potřeba klasifikovat chemické složení používaných materiálů a jejich vlastností. K tomu bylo zapotřebí vhodně navrhnout databázi. Při jejím návrhu bylo nejprve nutné definovat určité parametry, podle kterých se sítě budou konfigurovat a rozlišovat. Těmi parametry jsou

- **veličiny jako vstupní parametry** - Některé veličiny mají vliv na výstupní parametry větší než jiné (např. teplota má daleko větší vliv na korekci síly než rychlost). Počet těchto parametrů se může různit (Síť na klasifikaci určité veličiny může být nakonfigurována různými způsoby).
- **veličina jako výstupní parametr** - Veličiny, na které budeme chtít síť naučit se mohou různit. V tomto případě budeme chtít síť naučit na krátkodobé korekční koeficienty.
- **typ materiálu** - Chceme rozlišovat systémy podle materiálu.
- **limitní hodnoty parametrů** - Parametry je před vstupem nutné naškálovat na hodnoty v intervalu $[-1, +1]$, aby síť konvergovala. Případně si na tento interval můžeme naškálovat i cílový parametr.

Databáze je rozčleněna do tří tabulek. Hlavní tabulka NEURAL_NETWORK nám dává informace o názvu sítě a o parametrech cílové veličiny. Informace o cílové veličině jsou v této tabulce zaznamenány, protože v tomto případě má každá neuronová síť právě jednu výstupní veličinu, na kterou se má naučit. Vstupních veličin může mít libovolné množství a v různých kombinacích. Informace o nich jsou zahrnuty v další tabulce NEURAL_NETWORK_PARAMS. Tato tabulka ještě obsahuje sloupec index, podle kterého se veličiny mohou případně řadit. Poslední tabulka NEURAL_NETWORK_DETAIL nám dává informaci o materiálu a uchovává "paměť" neuronové sítě. "Paměť" neuronové sítě v tomto případě rozumíme hodnoty jejích vah uloženy v tabulce jako pole bytů. Kdybychom ji nechtěli mít uloženy jako pole bytů, museli bychom buď pro každou váhu mít vlastní sloupec nebo by se mohla každá váha vkládat po řádkách. První případ je značně nepraktický, protože dopředu nevíme kolik vah budeme mít (liší se od počtu v stupních parametrů). Ve druhém případě by se nám spousta hodnot zbytečně opakovalo. Je to tedy vyřešeno

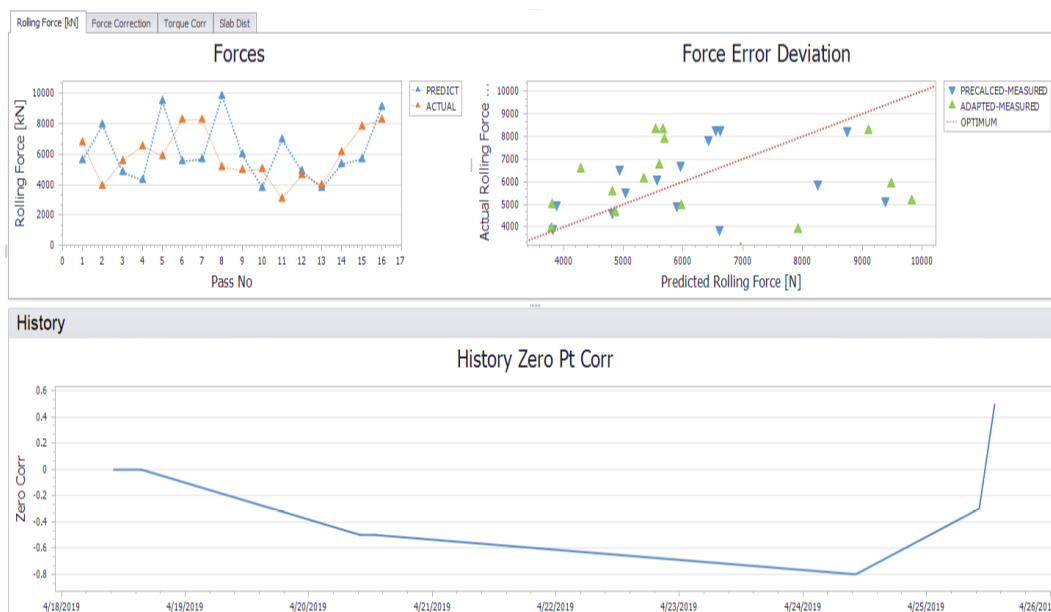
programově tak, že při vkládání do databáze se pole vah (pole typu double) konvertuje na pole bytů. Naopak je tomu při inicializaci neuronových sítí v programu z databáze, kde se pole bytů konvertuje na pole typu double (tedy pole vah). S nimi neuronová síť dále pracuje. Tabulky NEURAL_NETWORK_PARAMS a NEURAL_NETWORK_DETAIL mají cizí klíč na tabulku NEURAL_NETWORK. Navržená databáze je vidět na obr. č. 17.



Obr. 17: Návrh databáze pro neuronové sítě

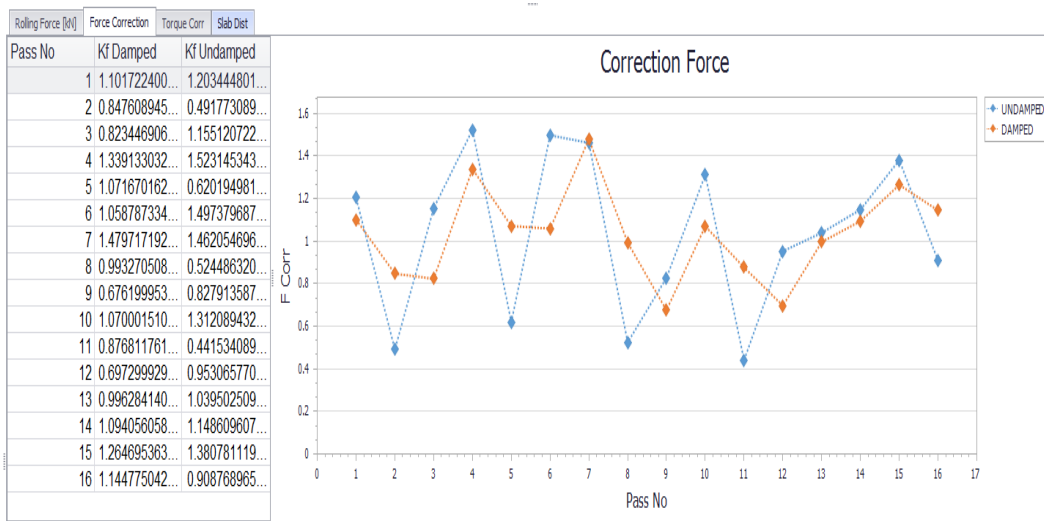
7 Vizualizace

Cílem předchozího vývoje adaptačních mechanismů bylo vylepšit a zpřesnit samotný proces válcování. Dalším krokem je vizualizace těchto mechanismů, která nám poskytuje nástroj na jejich sledování a testování. Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny zmíněné vizualizace vytvořené mými kolegy z PTSW. Je nutné podotknout, že jsou vizualizována náhodná data (podobná pozdějším skutečným datům). Skutečná data budou k dispozici až v létě 2019, kdy začne testovací válcování projektu.



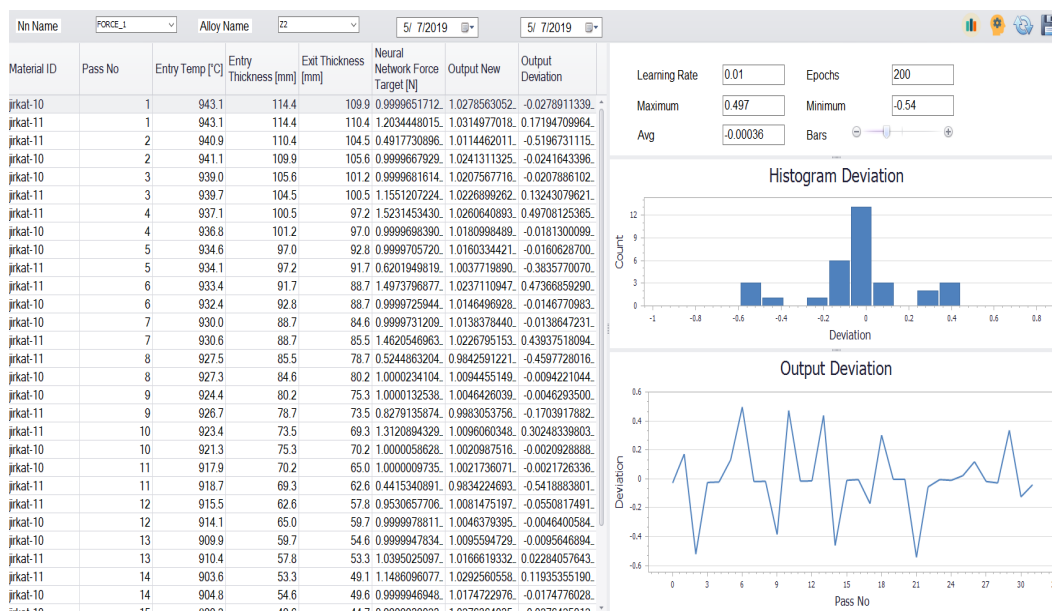
Obr. 18: Vizualizace adaptace síly a vývoj korekce válcovací mezery

V horní části obrázku č. 18 jsou vyobrazena predikovaná a skutečná síla v závislosti na číslu průchodu, respektive deviace původně vypočítané a adaptované síly od síly skutečné. V dolní části je vývoj korekce válcovací mezery (Zero point correction) v závislosti na čase.



Obr. 19: Vizualizace vývoje korekčního koeficientu pro sílu

Na obrázku č. 19 je vidět vývoj korekčního koeficientu pro sílu s uvážením a bez uvážení korekčního koeficientu pro škálování v závislosti na čísle průchodu.



Obr. 20: Vizualizace neuronové sítě

V levé části obrázku č. 20 jsou vypočítány korekční koeficienty (Output New) pro určitý typ plechu (Material ID). V pravé části je poté jejich vizualizace ve formě četnosti v určitém intervalu a ve formě deviace od hodnoty 1. Tlačítky a nastavením parametrů v pravém horním rohu lze nakonfigurovat učení sítě.

8 Závěr

V této bakalářské práci jsem se věnoval optimalizaci silových poměrů v procesu válcování plechů za tepla. Této optimalizace je dosaženo predikcí charakteristik válcovacího procesu, jeho sledováním, adaptací a v neposlední řadě korekcí. Byl nastíněn úvod do problematiky válcování za tepla, základní fungování výpočetních modelů a inženýrská aplikace neuronových sítí. Vytvořili jsme potřebné nástroje pro vyladění válcovacího procesu tak, aby byly splněny žádané výrobní tolerance válcovaného plechu. V současné době proběhly testy komunikace mezi Level 1 a Level 2 a jejich správné funkčnosti. Pro adaptaci to znamenalo hlavně otestovat dříve zmíněný příjem validních dat z měření, jejich zpracování a následné zaznamenání do databáze pro další analýzu. Tato analýza dat bude v počátcích válcování velice důležitá pro správné naladění parametrů válcovací stolice, které bychom ale měli být schopni z velké části odstínit mechanismem adaptace. Je poměrně náročné odhadnout počáteční odchylky parametrů válcování od reality neboť řešení je děláno zákazníkovi na míru a parametry použité válcovací stolice a válcovaných materiálů se liší od těch z předchozích projektů. Také zatím není možné ověřit a otestovat navržené mechanismy na skutečných výrobních datech a případně provést jejich korekci. To bude možné po uvedení celého projektu do provozu a uskutečnění testovacích válcování.

Zdroje

- [1] Sigmund Lukáš. *Výroba válcovaného profilu a její ověření pomocí numerické simulace*. Vysoké učení technické v Brně, 2018.
- [2] Millennium Steel. Roll crown. <https://www.millennium-steel.com/>. [Online; accessed May 8, 2019].
- [3] Milan Hajduk and Josef Konvičný. *Silové podmínky při válcování oceli za tepla*. Nakladatelství techn. lit, Praha, 1. vyd. edition, 1983.
- [4] PENG Wen, Zi-ying Liu, Xi-lin Yang, Jian-zhao Cao, and Dian-hua Zhang. Optimization of temperature and force adaptation algorithm in hot strip mill. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 21(3):300–305, 2014.
- [5] Cédric Chauvy, Pierre Barberis, and Frank Montheillet. Microstructure transformation during warm working of β -treated lamellar zircaloy-4 within the upper α -range. *Materials Science and Engineering: A*, 431(1-2):59–67, 2006.
- [6] Peichl Adam. *Adaptivní predikce korekčních faktorů válcovacích sil*. České vysoké učení technické v Praze, 2018.
- [7] Jiří Bíla. *Umělá inteligence a neuronové sítě v aplikacích*. České vysoké učení technické, Praha, vyd. 1. edition, 1995.
- [8] Carlos Thadeu de Ávila Pires, Henrique Cezar Ferreira, and Roberto Moura Sales. Adaptation for tandem cold mill models. *journal of materials processing technology*, 209(7):3592–3596, 2009.
- [9] Ivo Bukovsky and Noriyasu Homma. An approach to stable gradient-descent adaptation of higher order neural units. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 28(9):2022–2034, 2017.
- [10] Vladimir B Ginzburg. *Flat-rolled steel processes: advanced technologies*. CRC Press, 2009.
- [11] Pierre Montmitonnet. Hot and cold strip rolling processes. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 195(48-49):6604–6625, 2006.

- [12] MedicalXPress. Neuron. <https://medicalxpress.com/>, 2018. [Online; accessed May 8, 2019].
- [13] Přírodovědecká fakulta MUNI. Vícevrstvá neuronová síť. <http://portal.matematickabiologie.cz/>. [Online; accessed May 8, 2019].
- [14] Dukman Lee and Yongsug Lee. Application of neural-network for improving accuracy of roll-force model in hot-rolling mill. *Control Engineering Practice*, 10(4):473–478, 2002.
- [15] Maciej Pietrzyk and John G Lenard. *Thermal-mechanical modelling of the flat rolling process*. Springer Science & Business Media, 2012.