

Vývoj LTT modelu pro predikci teploty oceli během jejího zpracování postupy sekundární metalurgie

LTT Model Development for Prediction of Steel Temperature during Secondary Metallurgy

Ing. Jaromír Kaleta, Ph.D., Ing. Jiří Mravec, Ing. Gabriel Zalisz, Ing. Tomáš Huczala, Ph.D., Ing. David Bocek, Ph.D., Ing. Václav Pilka, Ing. Ryszard Marek, Ing. Marek Cienciala, Ing. Jiří Cupek jr., Jan Gaura, Jan Zarzycki

TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s. Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Česká republika, korespondenční email: jaromir.kaleta@trz.cz

Jedním z klíčových parametrů pro liti oceli je udržení tzv. „přehřátí“, tedy určitého rozmezí teploty taveniny na zařízení pro plynulé liti pro každý druh oceli. Pánvové pece jsou z hlediska řízení přehřátí klíčovým pracovištěm – jedná se o jediné místo, kde lze teplotu ocelové lázně zvýšit. V případě absence softwarového řešení pro řízení ohřevu závisí správný ohřev taveniny na zkušenostech a znalostech obsluhy pánvové pece, případně na pokynech operátora vakuovací stanice. Vzhledem k nedostatkům modelů třetích stran i modelů založených na strojovém učení bylo v TŽ rozhodnuto vytvořit vlastní model na odlišném principu. Od roku 2022 je v TŽ vyvíjen interní model založený na fyzikálně-chemických rovnicích, který je jednoduchý, modulární a srozumitelný pro technologické pracovníky TŽ, tedy včetně vhodné vizualizace. Model je v současnosti testován v provozu ocelárny v TŽ. Cílem je jeho plné nasazení do praxe, kde se očekávají přínosy zejména v úsporách elektrické energie a optimalizaci dodržení přehřátí na ZPO.

Klíčová slova: ocel, teplota oceli, sekundární metalurgie, model, pánvová pec

One of the key parameters for casting is to maintain the so-called "superheat", i.e. a certain range of melt temperature on CCM for each steel grade. Ladle furnaces are a key station in terms of superheat control – it is the only place where a steel bath temperature can be raised. In the absence of a SW solution for heating control, it is up to the experience and knowledge of the ladle furnace operator, or the vacuum station's operator's instructions, to heat the melt correctly. To motivate the reduction of the human factor in this process and with the aim of optimizing the superheat distribution, SW for optimal control of this process is offered on the market and TŽ also analysed historical melt data and created their own models based on machine learning. Due to the shortcomings of third-party models and machine learning models, it was decided to create a custom model based on a different principle. Since 2022, an internal model based on physical and chemical formulas has been developed at TŽ, which is uncomplicated, modular and readable for TŽ technologists - i.e. including suitable visualization. The principle of this model is the real-time prediction of the temperature development of a given melt based on currently available data and the prediction of the future melt temperature based on physics-chemical models. With each actual temperature measurement during the melt processing, the model is corrected to the temperature just measured. The output of the model is a dashboard for operators at secondary metallurgy stations, which renders them a temperature curve of the melt in real time, including guidance to the correct outgoing temperature of secondary metallurgy and superheat temperature to CCM (marked with a green band). The on-line model is also complemented by an "off-line" version of the model, which allows for retrospective analysis of already completed melts. The model is currently being tested in practice at the steel plant in TŽ. The aim is to fully deploy the model in practice, where the expected benefits are mainly savings in electricity and optimization of superheat compliance at CCM.

Key words: steel, temperature, secondary metalurgy, model, ladle furnace

1. Úvod

Kysliko-konvertorová ocelárna v Třineckých železárnách (TŽ) produkuje ročně cca 2,5 Mt oceli. Výroba surové oceli probíhá pomocí dvou konvertorů LD-typu, přičemž ocel je dále zpracovávána na zařízeních sekundární metalurgie. Tato zařízení jsou stanice chemického ohřevu (IR-UT), argonovací homogenizační stanice, dvě pánvové pece a dvě vakuovací zařízení typu RH. Odlévání oceli probíhá na dvou zařízeních plynulého odlévání oceli (ZPO), a to ZPO č. 1 (blokové) a ZPO č. 2 (sochorové).

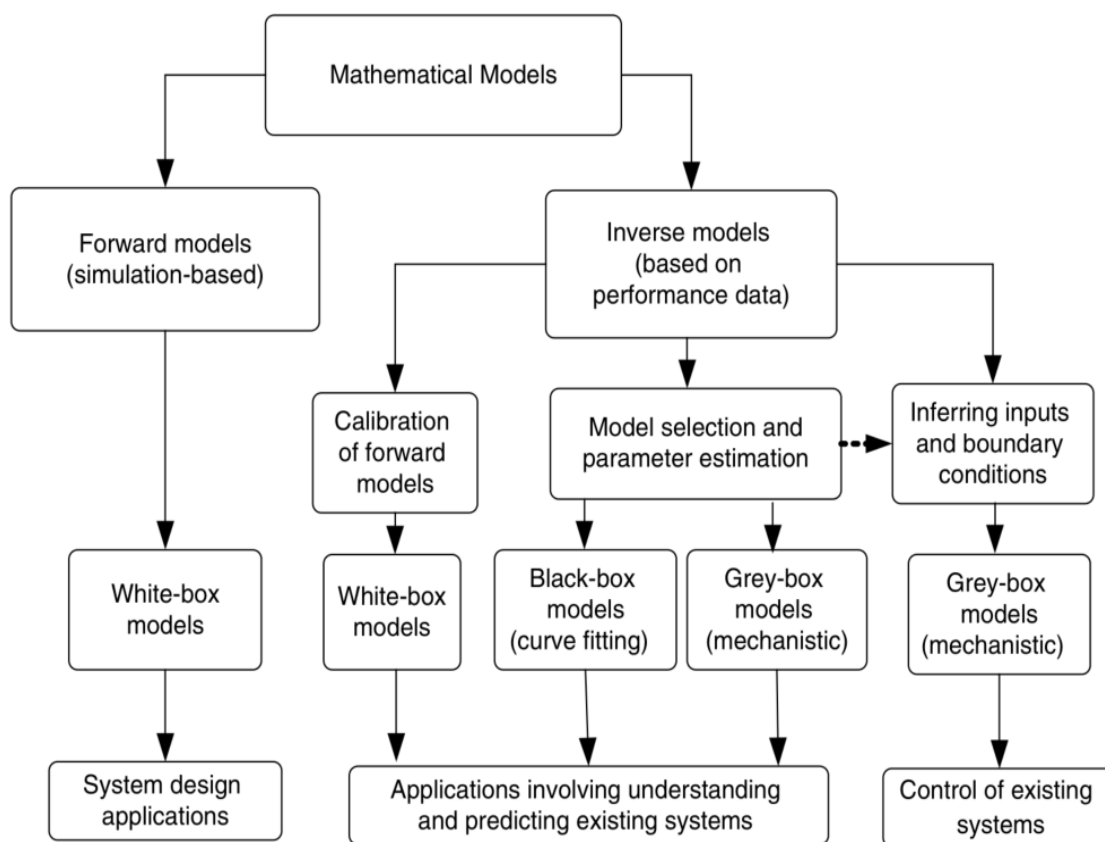
Jedním z klíčových parametrů pro odlévání oceli je dodržení tzv. "přehřátí", tedy určitého rozmezí teploty tavby na ZPO pro každou značku oceli, která je daná technickým předpisem odvozeným od likvidu každé značky oceli. Dodržení požadovaného přehřátí je jedním ze sledovaných parametrů každé ocelárny. U oceláren s pánvovými pecemi, kde dochází k ohřevu ocelové lázně pomocí elektrické energie, je právě toto stanoviště klíčové z hlediska kontroly přehřátí. Jedná se totiž o jediné místo, kde lze ocelové lázni dodat energii a zvýšit její teplotu (po odpichu z konvertoru jinak dochází k ochlazování ocelové lázně při pohybech pánve s ocelí a k poklesu dochází i na ostatních stanicích sekundární metalurgie - tj. argonování

a vakuování). Operátoři pánvové pece jsou tak zodpovědní za dodržení přehřátí na ZPO, neboť svými ohřevy stanovují dodanou energii ocelové lázni a uvolňují ocel z pánvové pece s určitou teplotou, která by měla být dostatečná pro dodržení přehřátí na ZPO (tj. vč. očekávaného poklesu během převozu pánve či během vakuování, které následuje po pánvových pecích jako poslední proces sekundární metalurgie). Při absenci SW řešení pro řízení ohřevu je na zkušenostech a znalostech operátora pánvové pece, případně na instrukci operátora vakuovací stanice u vakuovaných taveb, aby ohřev dané tavby provedl správně - tj. aby nedošlo ani k "zamrznutí" ani k "přehřátí" tavby.

Z motivace omezení lidského faktoru při tomto procesu a s cílem optimalizace dodržení přehřátí jsou na trhu nabízeny SW pro optimální řízení tohoto procesu. Tyto SW byly do TŽ postupně nabídnuty ze strany několika firem v letech 2020-2023. Souběžně s těmito nabídkami komerčních SW docházelo v TŽ k analýze historických dat taveb a rovněž k tvorbě vlastních modelů na bázi strojového učení (na základě dat r. 2020/2021). V r. 2022 bylo učiněno rozhodnutí o tom, že TŽ zatím nebudou kupovat komerční SW a řídit proces ohřevu na pánvových pecích pomocí SW třetí strany. Hlavním důvodem byla "black-box" povaha těchto SW, značný náklad na jejich pořízení a nepříliš pozitivní dosavadní zkušenost TŽ s datovými modely pro řízení metalurgických procesů od třetích stran. Rovněž,

interní modely čistě na bázi strojového učení (tj. pouze na základě dat, ne metalurgického know-how) nebyly schopné dostatečné přesnosti (zejména na nestandardně se chovajících tavných) a objevil se zde problém s kvalitou vstupních dat a interpretabilitou (pochopením chování modelů) pro provozní podmínky.

Modely lze rozdělit do tří hlavních kategorií. První jsou modely reprezentující jevy teoretickými prostředky, známé jako matematické modely nebo modelování bílé skřínky. Tyto modely reprezentují jevy pomocí zákonů fyziky a chemie, které zahrnují kondukcii, konvekci i radiaci a jsou založeny na Fourierových zákonech, Newtonově ochlazování a Stefan-Boltzmannových zákonech. Nově je také využíváno technik jako je Computational Fluid Dynamics (CFD). Jak ale upozorňují autoři v [1], jejich algoritmus prováděl výpočet ~35 minut, což neumožnilo jeho použití v průmyslových podmínkách a navrhli použití technik strojového učení. Obdobně i v práci [2] byla zvolena kombinace matematického a regresního modelu. Modely založené na strojovém učení a aplikované v reálném čase lze rozdělit na dvě třídy: hybridní, známé také jako modelování šedé skřínky využívající znalosti z modelování fyzikálních zákonů a nehybridní, nazývané modelování černé skřínky. Rozdělení modelů dle literatury [3] je na Obr. 1.

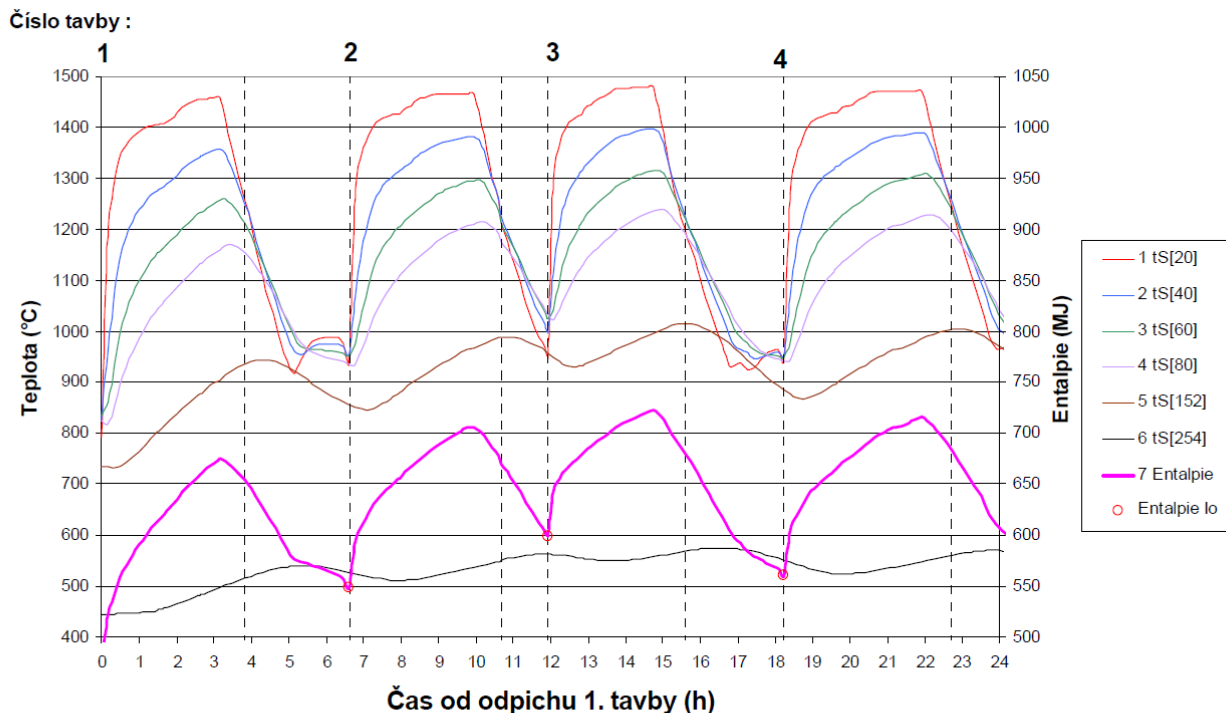


Obr. 1 Rozdělení matematických modelů dle [3]

Fig. 1 The split of mathematical models according to [3]

Autoři v [4] provedli měření teploty dolomitové vyzdívky pánve. Pro stanovení tepelného stavu vyzdívky zvolili entalpii vyzdívky pánve vztahenou na 1 m² pracovního povrchu pánve (J·m⁻²). Tepelný stav vyzdívky pánve ovlivňuje teplotní gradient stěny pánve a množství tepla pro ohřev vyzdívky pánve. Z průběhu grafu entalpie na Obr. 2 (křivka č. 7) vyplývá, že největší tepelný tok do vyzdívky je po odpichu tavby a s dobou pobytu oceli v

pánvi se snižuje. Entalpie na konci liti je ovlivněna i odpichovou teplotou oceli. Teplota trvalé vyzdívky (křivka 6) se zvyšuje opožděně. Obdobně lze předpokládat, že i zvýšení nebo snížení teploty pláště neodpovídá aktuálnímu zvýšení či snížení teploty oceli a tato hodnota není vhodným prediktorem tepelných ztrát. Převládajícím dějem je spotřeba tepla na ohřev vyzdívky pánve (zvýšení její entalpie).



Obr. 2 Průběh teplot a entalpie vyzdívky dolomitové pánve v časovém úseku 1. až 4. tavby [4]

Fig. 2 The temperature and enthalpy development of a dolomite-lined ladle over time of 1-4th heat [4]

2. Vývoj LTT modelu

Od r. 2022 došlo v TŽ k vývoji interního modelu průběhu teploty oceli v pánvi v programovacím prostředí/jazyku R. Klíčovým předpokladem, tvorby tohoto modelu bylo, aby byl model postaven na základě modelování šedé skříňky s využitím znalostí fyzikálních a termodynamických vzorců a byl ze své povahy nekomplikovaný, modulární a čitelný pro technology TŽ - tj. včetně vhodné vizualizace (nejen predikce teplot, ale i vizualizace celého procesu ocelárny). Hlavním principem tohoto modelu je predikce teplotního vývoje dané tavby v daném čase na základě aktuálně dostupných dat z databází TŽ a predikce vývoje budoucí teploty na základě fyzikálně-chemických modelů (např. model ohřevu na pánvových pecích, model teplotních ztrát během legování, model poklesu teplot v pánvi atd.). Odtud také označení LTT model: Ladle Metallurgy, Tretament time, Thermal model).

Základem modelu je výpočet tepla Q dle rovnice:

$$Q = Q_{El} + Q_{Ch} + Q_L \quad (1)$$

kde Q_{Ch} - chemického teplo (IRUT) [J]

Q_L - tepelné ztráty [J].

Pro výpočet změny teploty ΔT byla použita rovnice:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c} \quad (2)$$

Zjednodušeně lze závislost změny tepla Q jako změnu volné entalpie ΔH , která vyjadřuje změnu tepla soustavy za konstantního tlaku. Tepelná kapacita oceli je vypočtena z hmotnosti oceli v pánvi m a měrná tepelná kapacity oceli c je odhadována výpočtem podle Neuman-Koppova pravidla na základě požadovaného chemického složení oceli.

Doba zpracování oceli v pánvi v procesu sekundární metalurgie je nejvýznamnějším parametrem pro modelování procesů sekundární metalurgie. V TŽ je pokles teploty oceli v pánvi $\sim 1^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ u taveb pod bazickou struskou. Není-li tavba míchána, klesá rychlost ochlazování na hodnoty $\sim 0.5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$. Pro odchylku 10 min v plánovaných časech zpracování tavby v pánvi tak může být chyba predikce $\sim 10^\circ\text{C}$. Predikce budoucích časových parametrů je proto zahrnuta do vyvíjeného modelu, i když může být nahrazena externím modelem pro plánování (mill scheduling). Mezi tyto parametry lze zařadit např.:

- doba přesunu tavby,
- doba zpracování oceli ve vakuu,
- čas začátku odlévání,

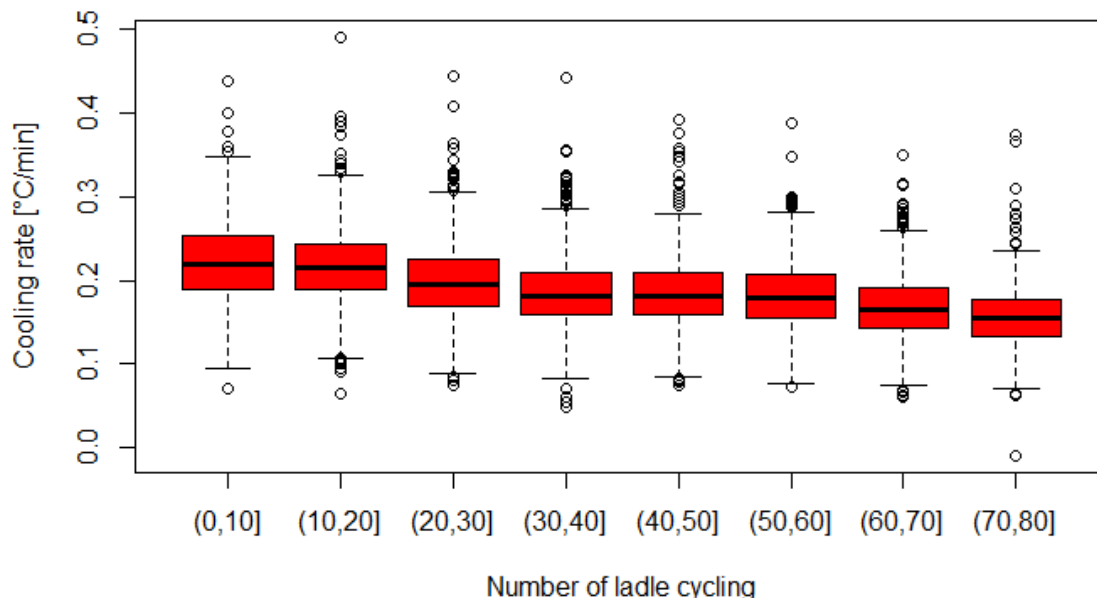
- doba odlévání atd.

Během odlévání oceli je pánve shora izolována a ocel není míchána inertním plynem, proto jsou tepelné ztráty menší než v procesech SM. Největší pokles teploty oceli je způsoben ztrátou při transportu oceli do MP a prostupem tepla stěnou MP. Z provozních dat vyplývá, že ochlazování oceli ve shora zakryté (izolované) pánvi je menší než 0,2 °C/min.

TŽ již disponují modelem, jehož výstupem je aktuální entalpie vyzdívky pánve. Model je používán pro řízení ohřevu vyzdívky pánvi. Statistickou analýzou i modely strojového učení byl tento parametr ve vyvíjeném modelu vyhodnocen jako nevýznamný. Z dat vyplývá, že pouze u prvního nasazení pánve je entalpie vyzdívky nižší, a během dalšího cyklování je udržována na předepsaném rozsahu hodnot. Hodnota může být vyšší, je-li proveden odpich oceli do pánve krátce po konci odlévání oceli. I když od druhého cyklu je entalpie vyzdívky před následným odpichem udržována v úzkém intervalu hodnot, byly pozorovány odchylky teploty modelu od reálné teploty po

konci vakuového zpracování oceli u prvních cyklů (oběhů).

Na Obr. 3 jsou pomocí boxplotů zobrazeny vypočtené průměrné teplotní ztráty oceli vlivem prostupu tepla do vyzdívky pánve. Výpočet byl proveden na základě doby zpracování oceli v pánvi, změny hmotností vyzdívky a rozdílů entalpie pánve před odpichem a na konci SM. Hlavní nevýhodou modelu entalpie pánve je, že počítá pouze aktuální tepelný stav pánve a nelze použít pro predikci změny entalpie pro následné zpracování oceli. Obdobně intenzitu míchání oceli pomocí argonu (argon stirring), která významně ovlivňuje tepelné ztráty, lze pouze odhadovat. Do modelu byl proto zahrnut zjednodušený empirický model pro odhad změny entalpie pánve v čase a pravidlo pro ochlazování oceli dle základních stavů míchání oceli. Vstupními parametry jsou doba od odpichu tavby do konce odlévání, doby přesunu pánve a doby zpracování tavby v procesu SM. Upřesnění podmodelu tepelných ztrát pánve bude podrobeno dalšímu zkoumání.



Obr. 3 Vypočtené průměrné ochlazování oceli vlivem změny entalpie pánve dle počtu lití na pánvi

Fig. 3 Calculated average cooling of steel due to the change of enthalpy of the ladle with various cycle (casting) times of the ladle (cycle count is on the x-axis)

Sekundární metalurgie v TŽ zahrnuje ohřevu oceli v LF, legování a u části taveb také vakuové zpracování oceli na zařízeních RH. Ocel je během odpichu legována na spodní limity chemického složení. Další tepelné ztráty jsou způsobeny následným legováním na finální hodnoty chemické analýzy tavby. Ohřev a ochlazení oceli jsou počítány pomocí empirických rovnic. Ochlazovací účinek přísad (chill factor) byl popsán v práci [5]. Entalpie vyzdívky RH komory není známa. Pro model bylo přijato zjednodušené pravidlo pro konstantní pokles dle typu oceli. Upřesnění tepelných ztrát předpokládáme v dalším vývoji modelu spolu s predikcí množství legujících přísad do pánve.

Výjezdový čas tavby v sekvenci je řízen výpočtem času konce lití předchozí tavby podle úbytku hmotnosti a

aktuální rychlosti lití. Je-li tento čas znám, pak je predikovaný čas modelu nahrazen časem z řídicího systému ocelárny.

Po převozu pánve do stojanu liciho stroje je na pánve položen poklop pro snížení tepelných ztrát. Tepelné ztráty jsou proto způsobeny převážně prostupem tepla vyzdívkou pánve. Ocel není míchána, proto dochází pouze k samovolnému pohybu oceli v pánvi vlivem volné (přirozené) konvekce. Tento pohyb je malý a neovlivňuje výrazně přestup tepla mezi ocelí a vyzdívkou pánve, proto jsou tepelné ztráty oceli v pánvi během odlévání nízké s nižším rozptylem než během procesu SM. Počáteční teplota je ovlivněna teplotou předchozí tavby v MP, proto je teplota oceli kontrolována až s časovým odstupem. Vlivem rozdílných zařízení (ZPO č.1 – 1 MP 40 t, ZPO č.2

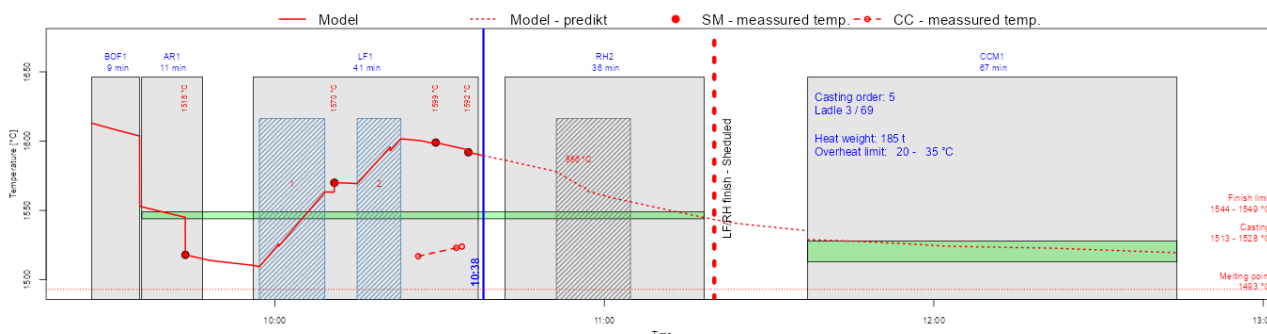
– 2 MP, 2×10t) vykazují měřené hodnoty teploty oceli v MP rozdílné chování. Pro pokles teploty oceli byly vytvořeny pravidla a zjednodušený výpočet na základě měřených hodnot teploty oceli v MP.

Ne-li ocel míchána, pak v důsledku volné konvekce klesá ke dnu chladná ocel a teplejší stoupá k hladině oceli. Doba od konce procesu SM do začátku lití proto ovlivňuje teplotní nehomogenitu oceli a tím i průběh teploty oceli v MP. V optimálním případě vyrovnává křivku oceli. V některých extrémních případech bylo zaznamenáno i nelogické chování, kdy došlo ke zvýšení teploty oceli v procesu odlévání. Studenější ocel na dně pánve může způsobit zamrznutí liciho proudu, proto je doba od konce procesu SM do zahájení lití udržována na optimální krátké hodnotě.

Pro vizualizaci jsou použity diskretní hodnoty kontinuálního měření teploty v MP. V předepsaném čase se provádí ruční měření teploty oceli. Ruční měření teploty na zařízení CELOX Lab je pokládáno za přesnější a je od kontinuálního měření vychýleno. Vychýlení teploty je převážně kladné, ale v ojedinělých případech záporné.

Předpokládáme, že kontinuální měření může být ovlivněno nehomogenní teplotou oceli v MP vlivem proudění a mísení teplé přitékající oceli s ocelí v MP.

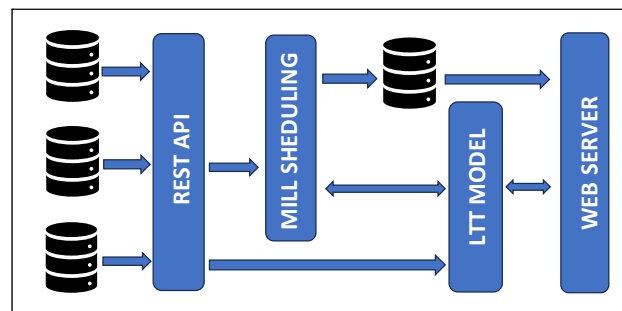
Typický průběh tavby je zobrazen na Obr. 4. Šedými boxy jsou vykresleny doby jednotlivých procesů SM a ZPO. Čerchovanými boxy pak podprocesy jako je doba ohřevu a doba vakuování. Tavba je po homogenizaci pomocí argonu dmýchaného horní tryskou na Ar stanici. ohřátá na pánvové peci, zpracována ve vakuu na zařízení RH a odlévána na ZPO. Predikovaná teplota (červená čára) je opravena po změření teploty oceli (plný červený bod). Plnou červenou čarou jsou zobrazeny opravené teploty vypočtené na základě známých hodnot, tečkovane pak predikované teploty. Diskretizované hodnoty teploty oceli v MP jsou zobrazeny červenými body spojenými čerchovanou čarou. Měřená teplota v MP navazuje na teplotu oceli předchozí odlévané tavby až dosáhne maxima, poté mírně klesá. Zeleně je zobrazeno pásmo výjezdové teploty oceli a požadované teploty oceli v MP.



Obr. 4 Typický proces zpracování oceli v pánvi včetně teplotní křivky oceli vykreslené pomocí modelu LTT
Fig. 4 A typical treatment process of steel in ladle including temperature curve of steel visualized by the LTT Model

Základní model byl vyvíjen jako statický na základě historických dat a následně je vyvíjen a zdokonalován pro dynamicky se měnící data v průběhu zpracování oceli v pánvi. Je-li tavba odlita, jsou již všechny parametry statické. Proto je snahou ukládat i změny v důležitých datech v čase pro následnou dynamickou simulaci zpracování oceli v pánvi u historických taveb. On-line vyvíjený experimentální model pravidelně načítá vstupy, aby mohl zachytit změny v datech. Pro konečný model je zvažován koncept real-time modelu, kdy model bude reagovat na změny v datech. Pro vývoj modelu byly zvoleny programovací jazyk R a prostředí R Studio. Základní funkce jsou kódovány v jazyce C++ a používány ve formě balíčku. Pro vizualizaci byl vytvořen dashboard pomocí balíčku Shiny. Základní schéma je na Obr. 5.

Historická data odlitých taveb lze načíst přímo ze služby REST API. Data aktuálních taveb v procesu SM se načítají přes plánování časů zpracování na jednotlivých zařízeních (typicky LF, RH) a následně začátku lití.



Obr. 5 Schéma LTT modelu
Fig. 5 The basic schema of the LTT model

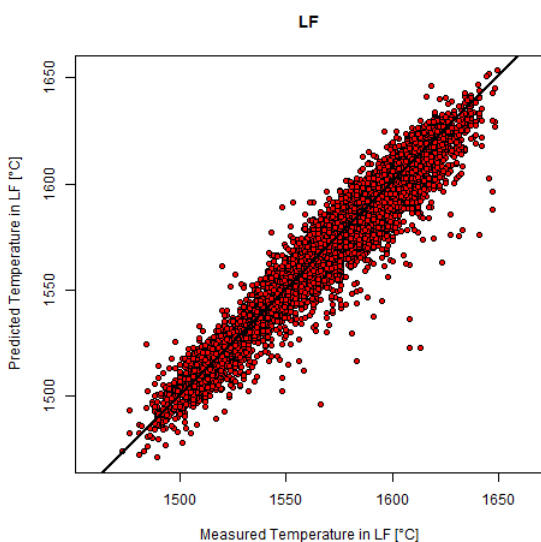
3. Verifikace modelu

Vyhodnocení modelu bylo provedeno pro proces LF, RH a pro finální teplotu v mezipání. Pro verifikaci modelu byly použity provozní data technologii BOF-LF-CC a BOF-LF-RH-CC. Verifikace predikce teplot na LF a RH byla provedena porovnáním měřených teplot

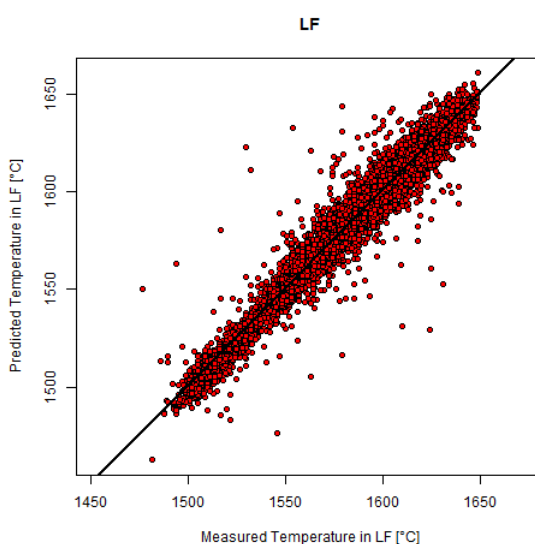
a predikovaných teplot v čase před opravou modelu t-1sec. Největší odchylka modelu je pro první teploty na LF, Obr. 6. Pro následné teploty měřené na LF, viz Obr. 7, je predikce přesnější. Na Obr. 8 jsou první měřené teploty po vakuování. Model vykazuje větší chybovost po procesu RH. Další měřené teploty na stanici RH jsou na Obr. 9. Pro tyto teploty vykazuje model vyšší přesnost predikce. V modelu se ojediněle vyskytují odlehle hodnoty, které mohou být způsobeny chybou dat. Data pro verifikaci teplot na LF a RH nebyla očištěna.

Pro verifikaci predikce teploty v mezipánvi ZPO byly použity průměrné měřené teploty kontinuálního a ručního měření, protože v aktuálních dostupných datech nejsou měření identifikována. Běžně se provádí pouze jedno

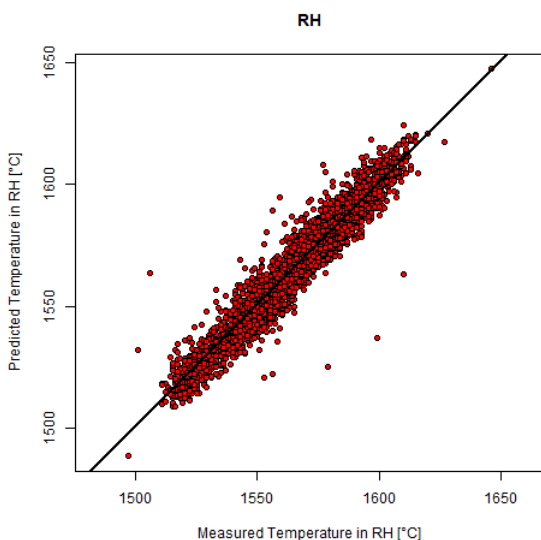
kontrolní měření. V ojedinělých případech dochází během kontinuálního měření k větším odchylkám od ručního kontrolního měření. V takovém případě probíhá více měření. Pro ZPO č.2 mohou být data doplněna o měření v druhé mezipánvi. Hodnoty poté vykazují vysoký rozptyl naměřených hodnot. Ze vstupního souboru dat byly proto odstraněny tavby s vysokým rozptylem měřených teplot na základě pravidla 6*sigma. Další podmínkou čištění bylo, aby měření obsahovalo alespoň 3 plané hodnoty. Rozsahy směrodatných odchylek všech měření a filtrovaného souboru dat jsou na Obr. 10. Protože je v první fázi odlévání teplota oceli závislá na teplotě předchozí tavby a u prvních taveb v sekvenci vykazuje měření na začátku lití velké odchylky, jsou pro verifikaci použity průměry měření od 15 min po zahájení odlévání.



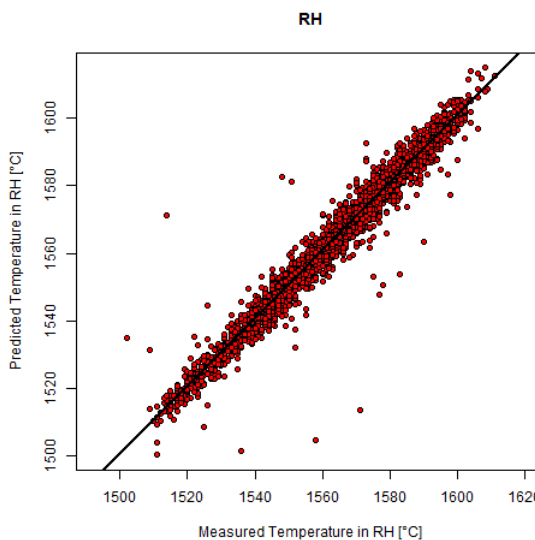
Obr. 6 Porovnání první měřené teploty na LF s predikovanou teplotou
Fig. 6 Comparison of the first measured temperature of LF with the predicted model temperature



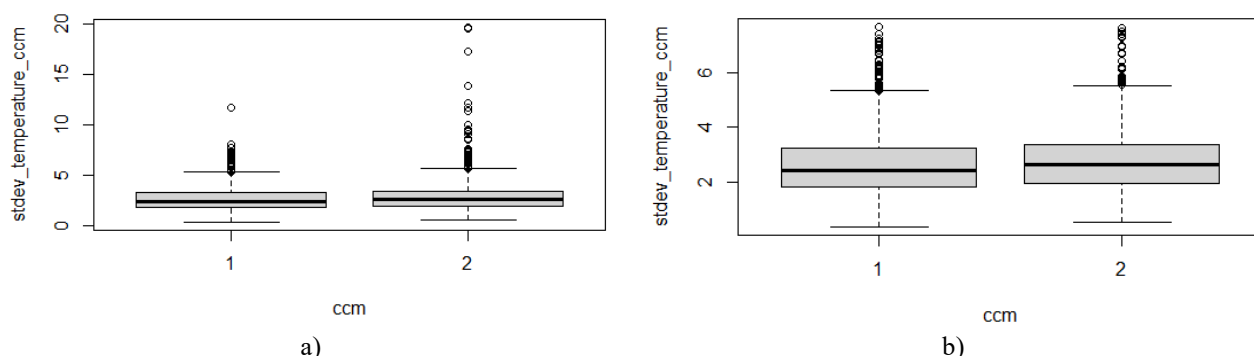
Obr. 7 Porovnání měřených teplot na LF bez první teploty
Fig. 7 Comparison of the LF temperatures without the first temperature



Obr. 8 Porovnání prvních měřených teplot na RH s predikovanou teplotou
Fig. 8 Comparison of first RH temperatures with the predicted temperature by the model



Obr. 9 Porovnání měřených teplot na RH bez první teploty s predikovanou teplotou
Fig. 9 Comparison of the other RH temperatures (without first) with the predicted temperature



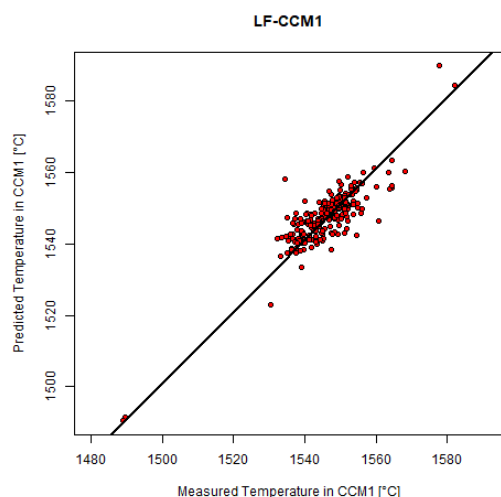
Obr. 10 Standardní odchylka teplot v mezipánvi před (a) a po čištění (b)
Fig. 10 Standard deviation of the tundish temperatures before (a) and after the filtration (b)

Datový soubor byl rozdělen na dva soubory dle technologií (BOF-LF-CC a BOF-LF-RH-CC) a dle ZPO.

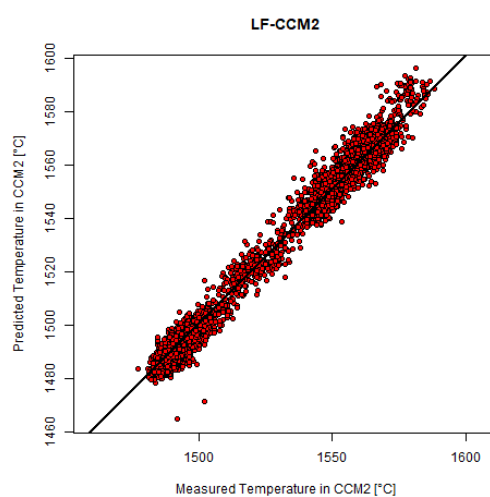
Verifikace predikce teploty taveb vyráběných technologií BOF-LF-RH-CC byla provedena na datech bez opravy teploty po RH a s opravou teploty po RH. Data byla opět rozdělena dle zařízení ZPO. Zrušení oprav simuluje proces na konci LF jak je zobrazeno na Obr. 11 a Obr. 12.

Porovnání přesnosti predikovaných teplot s měřenými teplotami v mezipánvi ZPO 1 je na Obr. 13 a Obr. 14.

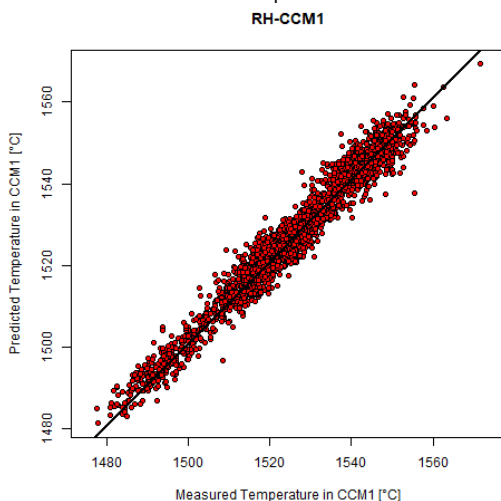
Porovnání přesnosti predikovaných teplot s měřenými teplotami v mezipánvi ZPO 2 je na Obr. 15 a Obr. 16. Na ZPO 2 jsou odlévány především tavby technologie BOF-LF-CC. Většina taveb je odlita při vyšších teplotách.



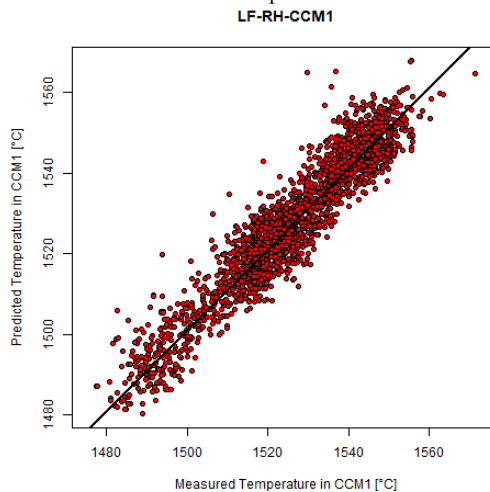
Obr. 11 Predikovaná vs měřená teplota mezi LF a ZPO 1
Fig. 11 Predicted vs. measure temperature between LF and CCM1



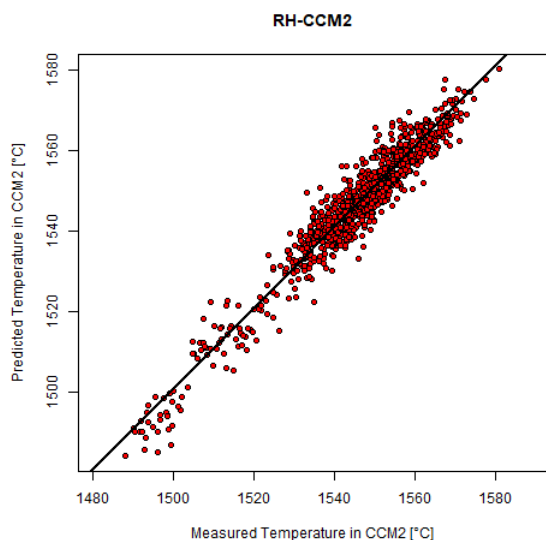
Obr. 12 Predikovaná vs měřená teplota mezi LF a ZPO 2
Fig. 12 Predicted vs. measured temperature between LF and CCM2



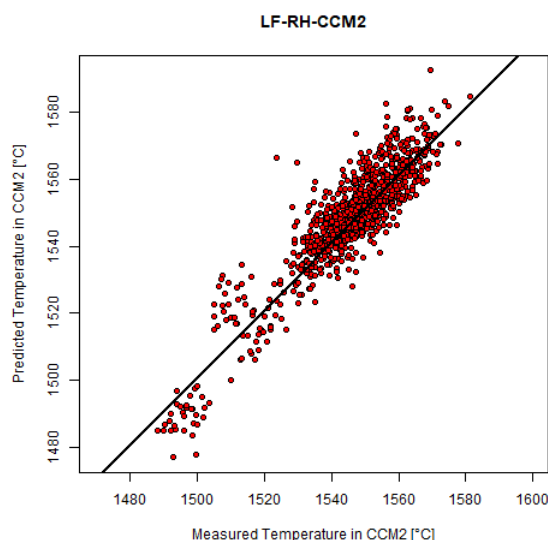
Obr. 13 Predikovaná vs měřená teplota v MP po RH
Fig. 13 Predicted vs. measured temperature in the tundish of CCM1 after RH



Obr. 14 Predikovaná vs měřená teplota v MP po LF
Fig. 14 Predicted vs. measured temperature in the tundish of CCM1 after LF



Obr. 15 Predikovaná vs měřená teplota v MP po RH
Fig. 15 Predicted vs. measured temperature in the tundish of CCM2 after RH



Obr. 16 Predikovaná vs měřená teplota v MP po LF
Fig. 16 Predicted vs. measured temperature in the tundish of CCM2 after LF

Metriky provedených verifikací jsou uvedeny v tab. 1. Pro porovnání modelů byl použit koeficient determinace. Koeficient determinace je označován jako R^2 a je vypočten na základě reziduí, za koeficient determinace r^2 je v této práci označena druhá mocnina Pearsonova korelačního koeficientu závislé proměnné a jejího odhadu. Pro metodu nejmenších čtverců je R^2 shodný s r^2 . V obecných modelech r^2 představuje teoretickou hodnotu nejlepšího odhadu, rozdíl $r^2 - R^2$ pak odchylku od nejlepšího modelu. Další nejpoužívanější metrikou je **MAE** (Mean Absolute Error) a střední kvadratická odchylka **RMSE** (odmocnina průměrných reziduálních čtverců), která vyjadřuje absolutní míru predikce modelu. Vydělíme-li RMSE průměrem vysvětlované proměnné a násobíme stem, dostaneme procentuální odchylku reziduálních čtverců **MPSE**.

Data byla očištěna velmi hrubě a následně byly analyzovány největší odchylky modelu od měřené teploty.

Přesnost predikce modelu je ovlivněna přesností měření teploty jak na zařízeních CELOX Lab, tak i mezi CELOX Lab a kontinuálním měřením oceli v mezipánvi. Byly zaznamenány i ojedinělé větší odchylky teploty od modelu v průběhu tavy, které byly způsobeny chybným měřením nebo chybou dat. Z deseti největších odchylek predikce teploty a měřené teploty po vakuování tavy bylo 7 způsobeno chybou měření a tři případy nepřesností modelu. Odchylka větší jak 10 °C byly zaznamenána u méně jak 5 % taveb. Požadované rozpětí teplot v mezipánvi vakuovaných taveb je nejčastěji $\pm 7,5$ °C až ± 10 °C, nejužší požadované rozmezí teplot je ± 5 °C, bez započtení přesnosti měřené teploty. Ze sledovaného souboru dat bylo méně jak 4 % taveb s odchylkou predikce teploty v mezipánvi nad 7,5 °C. Předpokládáme proto, že model je v současné době dostatečně přesný pro běžné jakosti taveb.

Tab. 1 Metriky provedených verifikací LTT modelu

Tab. 1 Metrics of the verifications done for the LTT model

Technology	Station	MAE	RMSE	MPSE	R^2	r^2	Note
BOF-LF-CCM	LF	6.68	9.19	0.58	0.934	0.934	first temperature
BOF-LF-CCM	LF	4.02	6.02	0.38	0.972	0.976	without first temp.
BOF-LF-RH-CCM	RH	4.48	6.05	0.39	0.920	0.927	first temperature
BOF-LF-RH-CCM	RH	2.71	4.2	0.27	0.958	0.962	without first temp.
BOF-LF-CCM	CCM 1	3.79	4.92	0.32	0.720	0.754	temp. between LF-CCM
BOF-LF-CCM	CCM 2	3.53	4.66	0.30	0.979	0.983	temp. between LF-CCM
BOF-LF-RH-CCM	CCM 1	2.98	3.78	0.25	0.949	0.959	temp. between RH-CCM
BOF-LF-RH-CCM	CCM 1	4.52	5.85	0.38	0.877	0.894	temp. between LF-CCM
BOF-LF-RH-CCM	CCM 2	3.33	4.28	0.28	0.924	0.931	temp. between RH-CCM
BOF-LF-RH-CCM	CCM 2	5.80	7.68	0.50	0.755	0.825	temp. between LF-CCM

4. Závěr

Od r. 2022 došlo v TŽ k vývoji interního modelu pro proces SM v prostředí R. Klíčovou premisou tvorby tohoto modelu bylo, aby byl model postaven na základě fyzikálních a chemických rovnic a byl ze své povahy nekomplikovaný, modulární a čitelný pro technology TŽ, včetně vhodné vizualizace (nejen predikce teplot, ale i vizualizace celého procesu ocelárny). Hlavním principem tohoto modelu je predikce teplotního vývoje dané tavby v daném čase na základě aktuálně dostupných dat z databází TŽ a predikce vývoje budoucí teploty na základě fyzikálně-chemických modelů (např. model ohřevu na pánvových pecích, tepelný model legování, model poklesu teplot v pánvi atd.).

Při každém skutečném změření teploty v průběhu zpracování tavby dochází ke korekci modelu na právě změřenou teplotu. Výstupem modelu je dashboard pro operátory na stanicích sekundární metalurgie, který jim v reálném čase vykresluje teplotní křivku dané tavby vč. navádění na správnou výjezdovou teplotu sekundární metalurgie a teplotu přehřátí na ZPO (označeno zeleným pásmem).

Doplňkem on-line modelu je rovněž "off-line" verze modelu, která umožňuje zpětnou analýzu již proběhlých taveb (vhodné pro zpětnou analýzu technologů, hledání příčin atd.). Model je aktuálně testován v praxi na ocelárně v TŽ, probíhá zpětná vazba ze strany technologů, operátorů a dochází k zapracování dílčích změn pro optimalizaci chodu modelu v reálném čase.

Cílem je plné nasazení modelu v praxi na ocelárně v TŽ, kdy očekávanými přínosy jsou zejména úspory el. energie a optimalizace dodržení přehřátí na ZPO.

Po celou dobu vývoje i používání je model pod kontrolou technologů TŽ, je možné jej dále optimalizovat, provádět v něm změny a dále jej vyvíjet jako interní know-how bez závislosti na třetí straně (tj. včetně možnosti dodání prvků umělé inteligence). Navržená vizualizace i přístup se setkávají s dobrým přijetím u technologů a provozu ocelárny a z prvotních analýz a testování v reálném provozu je patrné, že model dokáže teplotní křivku tavby predikovat velmi přesně. Tento projekt TŽ je tak v souladu s principem, který někteří dodavatelé a experti v odvětví potvrzují, a to je princip vizualizace know-how a poskytnutí srozumitelného nástroje pro operátory a technology na bázi známých principů, kteří sami mohou proces s pomocí tohoto nástroje zlepšovat.

Použitá literatura

- [1] SZTANGRET, Ł.; REGULSKI, K.; PERNACH, M.; RAUCH, Ł. Prediction of Temperature of Liquid Steel in Ladle Using Machine Learning Techniques. *Coatings* 2023, 13, 1504. <https://doi.org/10.3390/coatings13091504>
- [2] GUPTA, N., CHANDRA, S. Temperature Prediction Model for Controlling Casting Superheat Temperature, *ISIJ International*, 2004, vol. 44, num. 9, p. 1517-1526, Online: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1517>
- [3] REDDY, T. A. Applied Data Analysis and Modeling for Energy Engineers and Scientists [online]. B.m.: Springer US, 2011. SpringerLink : Bücher. ISBN 9781441996138. Dostupné z: doi:DOI 10.1007/978-1-4419-9613-8
- [4] HAŠEK, P., TVARDEK, P., JANČAR, D. Stanovení průběhu entalpie vyzdívky pro modelování oběhu licích pánví v podmínkách Ocelárny Mittal Steel Ostrava. In Sborník přednášek 14. mezinárodní konference metalurgie a materiálů METAL 2005 : 24. – 26. 5. 2005, Hradec nad Moravicí. Ostrava : TANGER, spol. s r. o., 2005, s. 38. ISBN 80-86840-13-1.
- [5] KALETA, Jaromír. Metodologie analýzy průmyslových dat a jejich aplikace pro vývoj modelu chemického ohřevu oceli. Online, Disertační práce. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2021. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/145021>. [cit. 2025-06-16].

INZERCE



STEELSIM 2025

11TH INTERNATIONAL CONFERENCE
ON MODELLING AND SIMULATION OF
METALLURGICAL PROCESSES IN STEELMAKING

2 - 4 SEPTEMBER · TŘINEC · CZ

STEELSIM2025.COM