

Modelování a optimalizace tepelné práce lící pánve v procesu sekundární metalurgie

Modeling and Optimization of Ladle Thermal Performance in the Secondary Metallurgy Process

Ing. Dalibor Jančar, Ph.D., prof. Ing. Jozef Vlček, Ph.D., Ing. Petr Tvardek, Ing. Radek Nikel

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Pohraniční 693/31, Ostrava – Vítkovice, 703 00, Česká republika, EU, korespondenční email: dalibor.jancar@mmvyzkum.cz

Při dlouhodobém setrvání oceli v lící pánvi v době od odpichu tavby do konce jejího odlévání na ZPO se ve vyzdívce akumuluje značné množství tepla, především pak v případech, kdy je součástí procesu sekundární metalurgie zpracování oceli v pánvové peci. Pro využití akumulovaného tepla ve vyzdívce lící pánve s ohledem na snížení tepelných ztrát tekuté oceli po odpichu následující tavby je nutno optimalizovat tepelnou práci pánve. Stanovením změny teploty oceli v pánvi během technologického úseku od odpichu oceli do lící pánve do konce lití na ZPO, umožní predikci teploty oceli na počátku lití, resp. na konci mimopecního zpracování a možnost optimalizace výjezdové teploty z pánvové pece. Příspěvek je věnován optimalizaci tepelné práce lící pánve se snahou o minimalizaci tepelných ztrát tekuté oceli v lící pánvi v celém technologickém toku od tavicího zařízení, přes mimopecní zpracování až po plynulé odlévání oceli.

Klíčová slova: lící pánve, ocel, vyzdívka, entalpie, ztráty tepla

Industries that carry out high temperature processes, e.g. the iron and steel industry require advanced energy solutions for efficient heat management during processing. Steel makers have been looking for new strategies to decrease the steelmaking energy consumption due to the growing demand for modern steel products and their environmental impacts [1]. Steelmaking community is facing multiple challenges those vary from energy and raw material costs for sustainable business to producing high value-added grades to cater ever increasing demands of customers. Technological advancements facilitate process engineers to meet the challenges to a great extent. Continuously evolving industrial automation systems equipped with sophisticated instrumentation, PLCs, data acquisitions systems and real time process models have demonstrated enormous potential in achieving high quality consistently while optimizing resource utilization. As a result, now-a-day such automation systems became an integral part of the steel manufacturing [2]. When steel remains in the casting ladle for an extended period from tapping to the end of casting at the continuous casting, a considerable amount of heat accumulates in the refractory lining, especially when the steel undergoes secondary metallurgy treatment in a ladle furnace. Knowledge of the amount of thermal energy stored in the ladle allows for better predictions of the steel temperature during the process. This has a potential to improve the quality of the steel [3]. Effective use of the heat accumulated in the ladle lining, aimed at reducing thermal losses of liquid steel after the next tapping, requires optimization of the ladle's thermal regime. To determine the thermal behaviour of the ladle lining and to predict the temperature evolution of the steel, numerical methods for solving transient heat conduction were employed. These methods are based on spatial and temporal discretization of the temperature field [4]. The simulations take into account both the heat accumulation within the lining and the dynamic effects of technological operations over time. The calculations were based on an implicit scheme, which ensures stable simulation even with extended time steps. [5], [6], [7], [8]. Determining the change in steel temperature in the ladle during the technological stage from tapping into the casting ladle to the end of continuous casting enables the prediction of the steel temperature at the start of casting, or alternatively at the end of secondary metallurgy in the ladle furnace. This, in turn, allows for the optimization of the target temperature at the ladle furnace exit. The use of advanced numerical methods and models for controlling the thermal regime of the casting ladle thus represents a key tool for improving process efficiency, reducing production costs, and simultaneously contributing to the environmental sustainability of metallurgical operations. Artificial intelligence methods can also be employed to optimize the temperature field [9], [10]. The paper focuses on optimizing the thermal management of the casting ladle with the aim of minimizing heat losses of liquid steel throughout the entire technological process — from the melting unit, through ladle furnace treatment, to continuous casting. [11]

Key words: ladle, ladle lining, enthalpy, heat losses

1. Úvod

Zajištění špičkové jakosti vyrobené oceli, vysoké produktivity a nízkých výrobních nákladů ocelárny je v současné době možné jen při aplikaci moderních postupů sekundární metalurgie a plynulého odlévání oceli. Neustále stoupající požadavky na snižování energetických nákladů v přímé návaznosti na snižování emisí skleníkových plynů (především CO₂) vedou ocelářské společnosti k intenzivnímu zaměření na aplikovaný výzkum a vývoj nových technologií, které by tento požadavek splňovaly. V tomto procesu hrají stále významnější roli pokročilé softwarové systémy a metody umělé inteligence, které umožňují optimalizaci výrobních procesů, zvyšování efektivity a dosažení vyšší úrovně automatizace. Jednou z možností snižování energetických nákladů je efektivní řízení teplotního režimu lící pánve, které omezuje nežádoucí úniky tepla tekuté oceli během celého výrobního cyklu. Pro tento proces řízení je nezbytné detailně porozumět faktorům, které ovlivňují změnu teploty oceli, a především je kvantifikovat pomocí matematických modelů a algoritmů, které umožní přesnou predikci a optimalizaci teplotního režimu.

2. Změna teploty oceli v lící pánvi

Změna teploty oceli v lící pánvi je dynamický proces ovlivněný několika faktory, které působí současně a v různých časových úsecích. Pro přesnou analýzu a optimalizaci je proto nezbytné nejen identifikovat jednotlivé příčiny změn teploty, ale také kvantifikovat jejich vliv na celý proces. Mezi hlavní faktory ovlivňující změnu teploty oceli patří:

- Tepelné ztráty vyzdívkou – probíhají kontinuálně a představují jednu z hlavních složek celkové tepelné bilance lící pánve.
- Tepelné ztráty hladinou lázně (struskou) – dochází k nim v důsledku tepelného vyzařování a konvekce na volném povrchu oceli.
- Přidávky legujících prvků a struskových materiálů – mohou způsobit jak pokles, tak nárůst teploty v závislosti na jejich fyzikálně-chemických vlastnostech.
- Foukání inertního plynu – urychluje homogenizaci oceli, ale zároveň vede ke snížení teploty vlivem jejího intenzivního míchání, ohřevu plynu a event. i obnažováním povrchu oceli.
- Ohřev v pánvové peci – pokud je součástí procesu, představuje jediný faktor přispívající k nárůstu teploty.

Protože tyto faktory působí současně, je nezbytné jejich vliv správně vyhodnotit a optimalizovat celý proces řízení teplotního režimu lící pánve. Zejména se jedná o tepelné ztráty vyzdívkou a hladinou lázně (struskou) probíhající po celou dobu provozu lící pánve. V tomto příspěvku se zaměřujeme především na tepelné ztráty vyzdívkou, které mají zásadní vliv na rovnoměrnost teplotního pole oceli během celého procesu.

3. Tepelné ztráty vyzdívkou lící pánve

U agregátů pracujících s cyklickým provozem je stanovení ztrátových tepelných toků značně složitější, neboť teplotní pole ve vyzdívce je nestacionární. Ztrátový tepelný tok je v tomto případě určen tepelným tokem z vnějšího povrchu zdíva do okolního prostředí a změnou ztrátového tepelného toku akumulací tepla ve vyzdívce, tedy:

$$P_z = P_{z,p} + P_{z,ak} \quad (1)$$

kde: $P_{z,p}$ je ztrátový tepelný tok z vnějšího povrchu lící pánve (W)

$P_{z,ak}$ - ztrátový tepelný tok akumulací tepla ve vyzdívce (W)

Ztrátový tepelný tok z vnějšího povrchu lící pánve (do okolního prostředí) $P_{z,p}$ se vypočte vztahem:

$$P_{z,p} = \alpha_c \cdot (t_p - t_{ok}) \cdot S \quad (2)$$

kde: α_c je celkový součinitel přestupu tepla z vnějšího povrchu pánve do okolního prostředí (W.m⁻².K⁻¹)

t_p - střední hodnota povrchové teploty (°C)

t_{ok} - teplota okolí (°C)

S - celková plocha, na které dochází k tepelné výměně (m²)

Ztrátový tepelný tok akumulací tepla ve vyzdívce lze určit:

$$P_{z,ak} = m_{vyz} \cdot \Delta c_{p,vyz} \cdot \Delta t_{vyz} \quad (3)$$

kde: m_{vyz} je hmotnost vyzdívky (kg)

$\Delta c_{p,vyz}$ - měrná tepelná kapacita vyzdívky (J.kg⁻¹.K⁻¹)

Δt_{vyz} - rozdíl středních teplot vyzdívky za příslušný časový úsek (K.s⁻¹)

V rovnici (3) se nejobtížněji stanovuje hodnota Δt_{vyz} . Její určení vyžaduje znalost průběhů teplot vyzdívkou v příslušných časových úsecích, což vyžaduje řešení nestacionárního vedení tepla. V těchto případech je teplotní funkce obecně dána Fourierovou rovnicí vedení tepla:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_p \cdot \rho} \quad (4)$$

kde: a je součinitel teplotní vodivosti (m².s⁻¹)

∇^2 - Laplaceův operátor (m⁻²)

q_v - vydatnost vnitřního objemového tepelného zdroje (W.m⁻³)

c_p - měrná tepelná kapacita při stálém tlaku (J.kg⁻¹.K⁻¹)

ρ - hustota (kg.m⁻³)

t - teplota (°C)

τ - čas (s)

Řešení této parciální diferenciální rovnice vedení tepla pro konkrétní okrajové podmínky je nejjednodušší pomocí numerických metod [4], [5], [6], [7], [8].

Vzhledem k tomu, že teplotní pole vyzdívky je rozhodujícím způsobem ovlivněno tepelnými pochody v pracovním prostoru pánve je především nutno získat co nej přesnější údaje v blízkosti pracovního povrchu vyzdívky. Tepelné ztráty vyzdívkou se poté stanoví jako integrální hodnota závislá na čase pro celou vyzdívku lící pánve. Pokles teploty oceli způsobený tepelnými ztrátami vyzdívkou v zadaném časovém úseku je určeno vztahem:

$$\Delta t_{oc} = \frac{P_z}{m_{oc} \cdot c_{p,oc}} \cdot \tau \quad (5)$$

kde: m_{oc} je hmotnost oceli (kg)

$c_{p,oc}$ - měrná tepelná kapacita oceli ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

τ - příslušný časový úsek (s)

Výpočet tepelných ztrát provádíme pro zvolené dílčí úseky lící pánve, které charakterizují provoz lící pánve, a v kterých rovněž dochází k dalším ztrátám teploty oceli, jak již bylo zmíněno v kapitole 2. Nabízí se následující dílčí úseky:

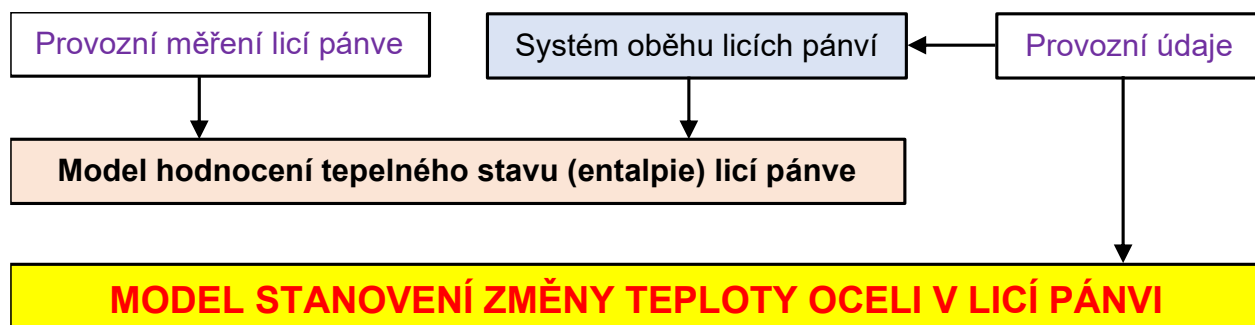
1. úsek plnění pánve po odpichu

2. úsek od konce toku oceli do 10. min po odpichu
3. úsek od 10. min po odpichu do začátku zpracování na pánvové peci
4. úsek zpracování v pánvové peci
5. úsek transportu pánve od pánvové pece k ZPO
6. úsek lití z pánve na ZPO

4. Praktické řešení problematiky optimalizace tepelné práce lící pánve

Na základě výše uvedených teoretických poznatků lze vytvořit základní koncept pro komplexní řešení problematiky optimalizace pánvové metalurgie v procesu výroby oceli. Podstatou je vytvoření zcela nového nástroje pro optimalizaci tepelného hospodářství v oblasti pánvové metalurgie, který využívá a integruje znalosti o tepelně bilančních vlivech procesů pánvové metalurgie na teplotu oceli v lící pánvi. Jedná se o nový komplexní prostředek pro stanovení změny teploty oceli v pánvi během technologického úseku od odpichu oceli (do lící pánve) do konce lití na zařízení pro plynulé odlévání oceli, tzv. „teplotní model“, který umožní predikci teploty oceli v lící pánvi, a to v průběhu jejího zpracování v uváděném agregátu.

Na Obr. 1 je uveden příklad způsobu práce teplotního modelu v rámci Informačního systému ocelárny.



Obr. 1 Schéma vstupů Modelu stanovení změny teploty oceli v pánvi

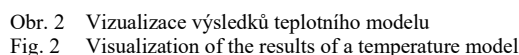
Fig. 1 Input diagram of the model for determining the change in steel temperature in a ladle

Model dynamicky reaguje na faktory ovlivňující teplotu oceli v lící pánvi v technologickém úseku od odpichu do konce odlévání na lícím stroji. Algoritmy, uplatněné v modelu, kvantifikují jednotlivé vlivy determinující teplotu oceli v agregátu (vliv vyzdívky lící pánve a vliv operací s tekutým kovem). Tím je umožněn výpočet změny teploty v průběhu technologického cyklu zpracování oceli.

Předložený model využívá řadu vstupních dat, včetně systému pro identifikaci zakrytí pánve víkem na vybraném stanovišti, který identifikuje pozici lící pánve ve vybraných segmentech procesu pánvové metalurgie. Jedná se o stanovení času začátku a konce jednotlivých operací a přítomnost víka na pánvi. Dále model využívá výsledky technologie měření a vyhodnocení tepelné práce lící pánve, na základě které je stanovována entalpie pánve.

Pro funkčnost modelu jsou nezbytné údaje z řídicího systému ocelárny, a to teplota oceli v pánvi po odpichu z pecního agregátu, značka vyráběné oceli a ostatní provozní údaje. Data, se kterými model pracuje, lze dle jejich provozní povahy obecně vyjádřit následovně:

- značka oceli
- chemická analýza oceli
- tepelný stav (entalpie) pánve
- doby jednotlivých technologických operací
- teplota oceli v pánvi po odpichu
- množství a typ (pecní, syntetická) strusky v pánvi
- množství argonu zaváděného do oceli během mimopecního zpracování oceli
- doba a stupeň ohřevu oceli v pánvové peci
- množství jednotlivých přísad nasazených do pánve během mimopecního zpracování oceli



- Úspora zemního plynu v procesu přehřevu licích pánví prostřednictvím cíleného řízení energetických vstupů.
- Redukce spotřeby elektrické energie pro ohřev oceli v pánvové peci díky přesnější predikci teplotních ztrát.
- Snížení emisí CO₂ v důsledku optimalizace celého procesu a efektivnějšího využití dostupné energie.
- Využití moderních numerických metod a modelů pro řízení teplotního režimu lící pánve tak představuje klíčový nástroj pro dosažení vyšší efektivity, snížení výrobních nákladů a současně pozitivně přispívá k environmentální udržitelnosti hutní výroby.

Poděkování

Príspevek vznikl v rámci projektu č. FW01010097 – „Automatizované řídicí systémy v oblasti pánové metalurgie“ spolufinancovaného Technologickou agenturou ČR v rámci Programu Trend, v rámci projektu “Institucionální podpora dlouhodobého a koncepčního rozvoje výzkumné organizace v roce 2025”, kterou poskytlo Ministerstvo průmyslu a obchodu a s podporou operačního programu Spravedlivá transformace pod záštitou Ministerstva životního prostředí České republiky, projekt CirkArena číslo CZ.10.03.01/00/22_003/0000045.

Vytvořený model navíc usnadňuje predikci vývoje teploty během technologického cyklu a umožňuje rychlou reakci na případné odchylky. Výsledkem je nejen zlepšení energetické efektivity, ale i konzistentní kvalita produkované oceli.

- [1] SANTOS, M.F, MOREIRA, M.H., CAMPOS, M.G.G., PELISSARI, P.I.B.G.B, ANGÉLICO, R.A., SAKO, E.Y, SINNEMA, S, PANDOLFELLI, V.C. Enhanced numerical tool to evaluate steel ladle thermal losses. 2018. 44 (11), 12831-12840. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.092>.
- [2] SRINIVAS, Peri Subrahmanya, KOTHARI, Anil Kumar, AGRAWAL, Ashish. Parameter Estimation by Inverse Solution Methodology Using Genetic Algorithms for Real Time Temperature Prediction Model of Ladle Furnace. ISIJ International. 2016, 56 (6), 977-985. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-712>.

- [3] BERNSTSSON, Fredric, WIKSTRÖM, Patrik. Thermal tracking of a ladle during production cycles. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*. 2023, 24 (6), 406-416. <https://doi.org/10.1080/15502287.2023.2253255>
- [4] TALER, Jan., DUDA, Piotr. *Solving Direct and Inverse Heat Conduction Problems*. Berlin: Springer, 2006. ISBN 978-3-540-33470-5j.
- [5] SIDDIQUI, M.I.H., KIM, M.-H. Two-Phase Numerical Modeling of Grade Intermixing in a Steelmaking Tundish. *Metals* 2019, 9, 40. <https://doi.org/10.3390/met9010040h>
- [6] JANČAR, Dalibor, MACHŮ, Mario, VELIČKA, Marek, TVARDEK, Petr, VLČEK, Jozef. Use of Numerical Methods for the Design of Thermal Protection of an RFID-Based Contactless Identification System of Ladles. *METALS*. 2022, 12 (7), 1163. eISSN 2075-4701.
- [7] MÁKELÄ, Ilpo, VISURI, Ville-Valtteri, FABRITIUS, Timo. A mathematical model for the thermal state of a steel ladle. *Ironmaking & Steelmaking*. 2023, 50 (7), 867-877. <https://doi.org/10.1080/03019233.2023.2201544>.
- [8] PAN, Yuhua, GRIP, Carl-Erik, BJÖRKMAN, Bo. Numerical studies on the parameters influencing steel ladle heat loss rate, thermal stratification during holding and steel stream temperature during teeming. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 2003, 32 (2), 71-85. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0692.2003.10608.x>.
- [9] JANČAR, Dalibor, MACHŮ, Mario, VELIČKA, Marek, TVARDEK, Petr, KOCIÁN, Leoš, VLČEK, Jozef. Use of Neural Network for Lifetime of Teeming Ladles. *Materials*. 2022, 15 (22), 1163. eISSN 1996-1944.
- [10] SCHMIDT, Thomas, CHRISTIS, Maximilian, SODEURS, Andreas, PLOCIENNIK, Uwe. Physics-informed AI approach for temperature guidance of ladles and heats. 11th ECCC European Continuous Casting Conference. 7. - 11. 10. 2024, Essen, Germany. Essen. www.eccc-2024.com
- [11] RUELA, Victor, Paul van BEURDEN, LUCHINI, Bruno, HOFMANN, Rene, BIRKELBACH, Felix. Optimizing the Steel Ladle Thermal Management: Toward a Sustainable and Cost-Effective Ladle Fleet Logistics. 2024, 96 (2), 2400616. <https://doi.org/10.1002/srin.202400616>.

INFORMATIVNÍ ČLÁNEK

Zkrachovalá Liberty má nového majitele, kupuje ji sdružení firem exministra Peciny

16. července 2025

Ocelárna Liberty Ostrava mění majitele. Zadlužený podnik v konkurzu, jehož provoz se podařilo alespoň částečně udržet díky tzv. tollingu, získalo sdružení firem SPV NH Ostrava a SPV NH Koksovna. Obě společnosti ovládá někdejší ministr vnitra a průmyslu Martin Pecina. Věřitelský výbor i zajištění věřitelé s transakcí souhlasili jednomyslně. Jiný zájemce o koupi nebyl.

„Cílem prodeje je zajistit co nejvyšší výnos pro majetkovou podstatu dlužníka, jiná varianta by byla pro věřitele méně výhodná,“ uvedl mluvčí insolvenčního správce Michal Štefl.

Za hlavní závod a koksovnu nabídl Pecinův tým částku 3,01 miliardy korun. Prodejní proces vedla společnost PricewaterhouseCoopers (PwC), která oslovila 230 potenciálních investorů. Podle odborných posudků firem

PwC a Deloitte byla tato nabídka výhodnější než rozprodej majetku po částech – jak z hlediska výnosu, tak z hlediska zachování výroby a zaměstnanosti.

„V porovnání s potenciálním rozprodejem podniku po částech znamená prodej funkčního celku vyšší míru uspokojení pohledávek pro všechny věřitele,“ potvrdil Jan Černý, mluvčí státní pojišťovny EGAP, která je předsedou věřitelského výboru.

V rámci prodeje nedochází k převodu některých nemovitostí, pohledávek či movitých věcí, které nejsou nezbytné k dalšímu provozu huti.

Díky rozhodnutí věřitelů se podle správce podařilo zachovat přibližně 2 500 pracovních míst. Výroba bude zatím i nadále pokračovat formou tollingu prostřednictvím firem Don Quixote a Vítkovice Machinery Trade.



Foto: Areál Liberty Ostrava

Celý článek na [iDNES](https://idnes.cz)