

Využití pokročilých numerických simulací pro optimalizaci plynulého lití oceli

Use of Advanced Numerical Simulations for the Optimization of Continuous Steel Casting

Markéta Tkadlečková¹, Jiří Cibulka¹, Tomáš Huczala¹, Martin Lasota¹, Jiří Cupek¹, Petr Kotas², David Jelínek²

¹ TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město 739 61 Třinec, research@trz.cz

² MAGMA Gießereitechnologie GmbH, org. Složka, K Vinici 1256, 530 02 Pardubice

Abstrakt

Virtuální pokročilé numerické simulace dnes hrají již nezastupitelnou pozici při optimalizaci metalurgických procesů. Díky poměrně široké nabídce sofistikovaných softwarových systémů lze numerické analýzy využívat jak při verifikaci dějů primární výroby, tak i dějů spojených s odléváním a tuhnutím oceli. Cílem předkládaného příspěvku je prezentace zkušeností s využíváním software MAGMASOFT® při studiu plynulého odlévání ocelových předlitků v podmínkách TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN, a.s.

Klíčová slova: ocel, plynulé lití, simulace

Abstract

Virtual advanced numerical simulations today play an irreplaceable role in the optimization of metallurgical processes. Thanks to a wide range of sophisticated software systems, numerical analyses can be used both for verifying processes of primary steelmaking and for studying phenomena associated with casting and solidification of steel. The aim of this paper is to present the experience gained from using the MAGMASOFT® software for studying the continuous casting of steel billets under the conditions of TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s.

Keywords: steel, continuous casting, simulation

1. Plynulé odlévání oceli

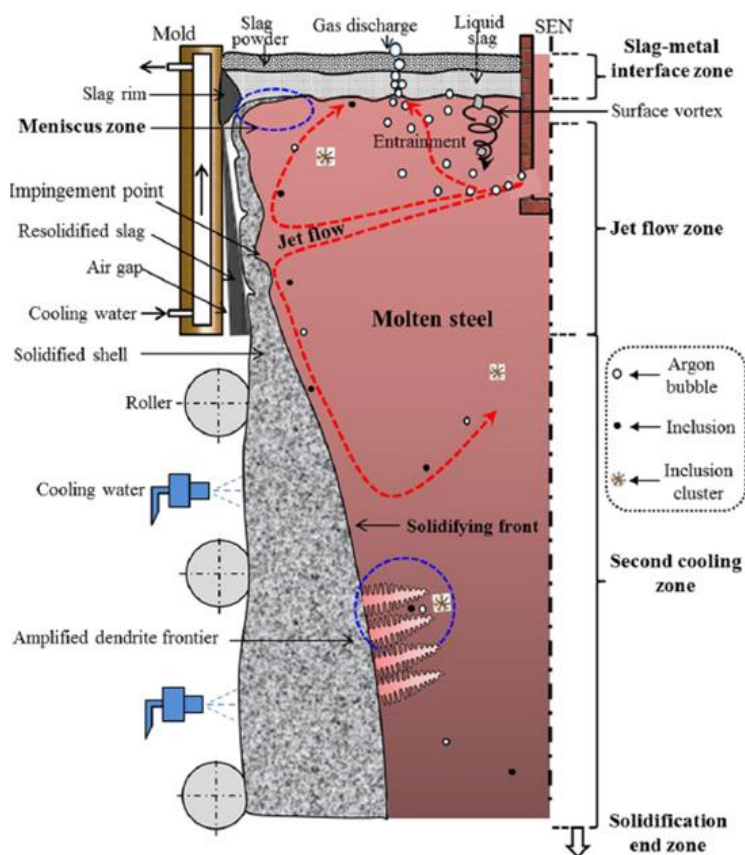
TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s. provozují dvě zařízení plynulého odlévání oceli. Zařízení plynulého odlévání č.1 je blokové, pětiproudé a je přizpůsobeno pro sekvenční odlévání kruhových formátů o průměru 320, 410, 470, 525 a 600 mm v délce 2,5 až 6,4 m, ale také bloků obdélníkového tvaru o rozměrech 300 x 350 mm v délce 4 až 6,5 m. Zařízení plynulého odlévání č. 2 je sochorové a umožňuje odlévání sochorů o rozměru 155 × 155 mm, v délce 10 až 12 m [1].

Během plynulého odlévání je tavenina oceli řízeně průběžně transformována na tuhý stav požadovaného rozměru a tvaru předlitku určeného k následnému tváření. Při plynulém způsobu odlévání je líc pánve s taveninou oceli umístěna na otočný líc stojan lícího zařízení. Odtud je ocel přes stínicí trubici odlévána do mezipánve. Z mezipánve je ocel vedena ponornými výlevkami do oscilujících krystalizátorů (primární zóna chlazení). Pod krystalizátorem je soustava vodících a opěrných válečků (sekundární zóna chlazení) včetně chladících trysek, jež zajišťují tažení, přetváření a chlazení lícího proudu oceli [2].

Významnou úlohu při plynulém odlévání oceli sehrávají krystalizátory, které určují tvar předlitku. Krystalizátory jsou tvořeny ocelovým pláštěm a měděnou vložkou, která zajišťuje díky vysoké tepelné vodivosti rychlý odvod tepla a vznik lící kůry předlitku.

Při tuhnutí oceli vzniká mezi vnitřní stěnou krystalizátoru a lící kůrou předlitku plynová mezera, která brání intenzivnímu chlazení předlitku. Z tohoto důvodu bývá krystalizátor lehce zúžený ve své dolní části. Obvyklý úběr představuje 1 % na jeden metr délky krystalizátoru.

Vytahování předlitku z krystalizátoru je zajištěno díky oscilaci krystalizátoru, dostatečnému mazání lícími prášky (které chrání i hladinu oceli v krystalizátoru před sekundární oxidací), a soustavou tažných a vodících válečků. Dnes se začíná ve větší míře prosazovat hydraulické zajištění oscilace, které umožňuje například asymetrický průběh oscilace a vede tak k redukci povrchových vad [3-7]. Schéma dějů v oblasti krystalizátoru je zachyceno na **obr. 1** [8].



Obr. 1 Schéma dějů v oblasti krystalizátoru [8]

Fig. 1 Schematic diagram of the processes in the mould region [8]

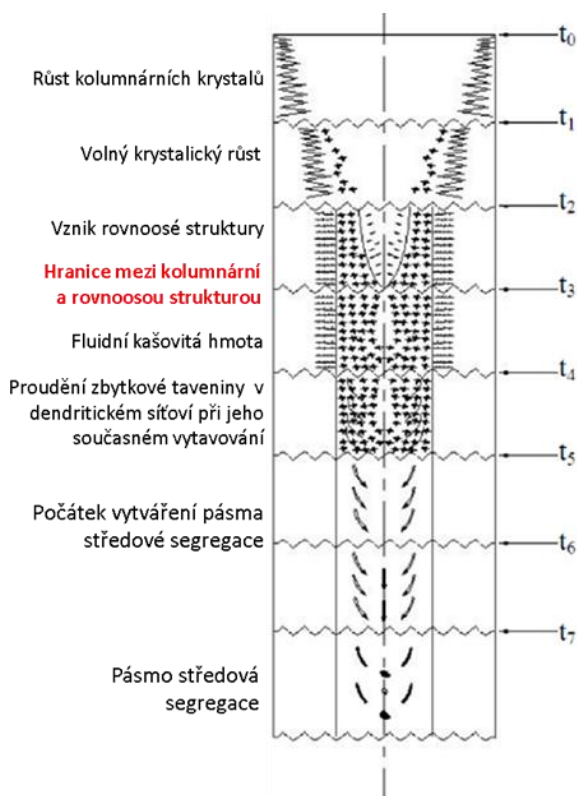
Po opuštění krystalizátoru je předlitek tedy tvořen pouze tenkou lící kůrkou s tekutým jádrem. Aby bylo zajištěno utuhnutí předlitku v celém jeho objemu ještě před jeho dělením, je předlitek v sekundární zóně ochlazován soustavou vodních ostřikových zón. Protože na předlitek s tekutým jádrem působí také ferostatický tlak spolu s gravitační silou, ale i kombinace tažných a rovnacích sil vodících a tažných válečků, je třeba zajistit takovou rychlost tažení a intenzitu chlazení, aby měla výsledná makrostruktura předlitku odpovídající kvalitu [9].

Způsob krystalizace a tuhnutí plynule litého ocelového předlitku lze také ovlivnit použitím tzv. elektromagnetického míchání tekutého jádra plynule litého předlitku. Kromě elektromagnetického míchání v oblasti v krystalizátoru (M-EMS = Mould Electromagnetic Stirrer) či sekundárního chlazení (S-EMS) se dnes prosazují i míchače v oblasti konce tzv. metalurgické délky (neboli konce tekutého jádra předlitku), tzv. F-EMS = Final Electromagnetic Stirrer). V tomto místě se také začíná poslední dobou zavádět i tzv. Dynamic Soft Reduction, neboli redukce průřezu předlitku [10-12].

Na konci sekundární zóny, kdy je předlitek tuhý v celém svém objemu, dochází k jeho dělení, např. kyslíko-palivovými hořáky. Obvykle jsou předlitky za dělicím zařízením ukládány na tzv. chladícím loži, kde dochází k dalšímu ochlazování předlitku sáláním, prouděním a vedením tepla do okolí a chladicího lože [3].

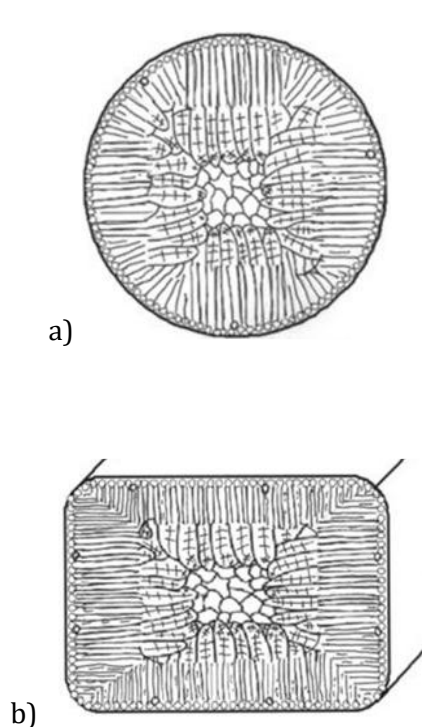
2. Struktura plynule litého ocelového předlitku

Růst krystalů a utváření struktury po délce předlitku je zachyceno na **obr. 2**. Typická struktura plynule litých předlitků v příčném řezu je pak schematicky zachycena na **obr. 3**. Je patrné, že primárně vzniká jemná rovnoosá struktura. Se snížením odvodu tepla se začnou vytvářet protáhlé kolumnární krystaly, které mohou dle způsobu odvodu tepla přerůstat až v dendritický růst (zejména při výrazné rychlosti ochlazování). Ve středu předlitku pak detekujeme různě orientované rovnoosé krystaly.



Obr. 2 Schéma makrostruktury plynule litého ocelového předlitku v řezu [13, 14]

Fig. 2 Schematic diagram of the macrostructure of a continuously cast steel billet in cross section [13, 14]



Obr. 3 Schéma struktury plynule litých ocelových předlitků v příčném řezu pro formát a) obdélníkový, b) kruhový [15]

Fig. 3 Schematic diagram of the cross-sectional structure of continuously cast steel billets for a) rectangular and b) circular formats [15]

Při vytváření makrostruktury plynule litého ocelového předlitku hrají velkou roli právě okrajové podmínky odlévání. Například **Sun a kol.** ve svém článku porovnával míru vlivu intenzity míchače v oblasti krystalizátoru, licí teploty a licí rychlosti na výslednou makrostrukturu. Nejvýrazněji makrostrukturu za zvolených podmínek odlévání ovlivnila intenzita míchání, kdy byl testován proud 200 A, 300 A, 400 A a 450 A. Při vyšší hodnotě proudu se zvětšil rozsah rovnoosé oblasti a současně docházelo k zmenšení velikosti zrna [16].

3. Metody verifikace procesu plynulého odlévání oceli

Z výčtu výše uvedených informací je zřejmé, že metalurgie oceli je složitá. V průběhu výroby a zpracování taveniny oceli dochází k řadě fyzikálně chemických jevů, z nichž některé lze v reálných podmínkách ověřovat jen omezeně nebo vůbec. Předpokladem kvalitativně stabilní výroby je pak právě správné zvládnutí nastavení okrajových podmínek technologie odlévání, respektive jejich verifikace a optimalizace. Zvláště v náročných metalurgických podmínkách dnes proto při optimalizaci postupů výroby a odlévání oceli hraje nezastupitelnou pozici tzv. metoda modelování, a to jak fyzikální, tak numerické modelování.

Numerické modelování (vytvoření numerického modelu reálného systému), nebo též numerická simulace procesů (simulace různých podmínek procesu na modelu) představuje metodu verifikace, kdy je zkoumaný systém (proces) popsán soustavou parciálních diferenciálních rovnic (PDR) doplněných i o rovnice empirické povahy a řešených numerickými metodami.

Obecně se pomocí numerických metod hledá vhodné numerické řešení (výpočet, algoritmus) PDR, tedy takové, kdy je velmi obtížné nalezení přesného analytického řešení. Každé numerické řešení je charakterizováno stabilitou algoritmu výpočtu, konvergenčí a mělo by rovněž obsahovat i odhad chyby [17].

Pro uživatele by přímé řešení rovnic bylo komplikované. Aby mohla být aplikována numerická metoda, je vhodné systém proto rozčlenit na menší objemové úseky (budeme-li uvažovat o třírozměrných úlohách) a v těchto dostatečně malých podoblastech základní geometrie hledat diskrétní nebo aproximační řešení. Výsledkem řešení je hodnota hledané veličiny v diskrétním bodě tzv. výpočetní síť. Podle typu úlohy lze volit nejčastěji ze tří numerických metod, a to metody konečných diferencí (FDM), konečných objemů (FVM) a konečných prvků (FEM) [18].

Je zřejmé, že značnou nevýhodou numerického modelování je náročnost sestavování modelu a výpočtového programu (algoritmu), zejména pro komplikované systémy a děje. K řešení různých procesů z oblasti přenosu hmoty, hybnosti a energie jsou však dnes k dispozici speciální a mnohdy univerzální programové produkty, které již obsahují matematické modely proudění a tuhnutí a algoritmy jejich řešení. Jedním z těchto software je MAGMASOFT®, který je také aktuálně využíván při studiu plynulého odlévání ocelových předlitků v TRINECKÝCH ŽELEZÁRNÁCH, a.s.

4. Modelování plynulého odlévání oceli s využitím SW Magmasoft

MAGMASOFT® je modulární software určený pro komplexní 3D plně prostorový numerický výpočet a simulaci dynamiky proudění kovové taveniny a následné tuhnutí oceli [19]. Simulace plynulého odlévání oceli je realizována ve verzi MAGMASOFT 6.0 vybaveného modulem Continuous Casting (CC modul).

MAGMA CC, dle mota „committed to casting excellence“, poskytuje robustní řešení pro kontinuální lití oceli s důrazem na návrh procesních podmínek pro optimalizaci kvality výrobků i díky implementovanému algoritmu DOE (Design of Experiment).

Jako většina software tohoto typu uvažuje s rozdělením výpočtu do tří etap. První etapou je tvorba geometrie analyzované části procesu a definice vstupních dat, v průběhu druhé etapy probíhá vlastní výpočet a poté následuje třetí etapa s vyhodnocením výsledků.

4.1 Zkušenosti s přípravou geometrie

Z pohledu uživatele nabízí SW velmi příjemné a intuitivní prostředí tvorby geometrie. Modul pro přípravu geometrie obsahuje řadu nástrojů, které tvorbu konstrukčních prvků zařízení plynulého odlévání značně usnadňují. Např. zde existuje nástroj pro přímou definici tvaru, délky a pozice analyzovaného licího proudu. V případě elektromagnetického míchače lze definovat počet vinutí.

Výpočet tuhnutí oceli tak lze, obdobně jako v případě jiných SW, realizovat buď na zjednodušené geometrii odlévaného licího proudu a okrajové podmínky definovat výběrem konkrétních ploch nebo uživatelskou funkcí.

Anebo je navíc možné v případě komplexního výpočtu, kdy cílíme i na predikci proudění v průběhu odlévání včetně elektromagnetického míchání a tuhnutí během vytahování předlitku z krystalizátoru, při tvorbě geometrie zakreslit a zhmotnit všechny důležité konstrukční prvky, které jsou zahrnuty i do výpočtu.

Vytvoření podstatných funkčních i procesních částí zařízení plynulého odlévání oceli, jež ovlivňují způsob tuhnutí předlitku, je výhodné nejen pro lepší prostorovou představu při analýze a prezentaci výsledků procesu, ale i z důvodu zpřesnění definice parametrů výpočtu.

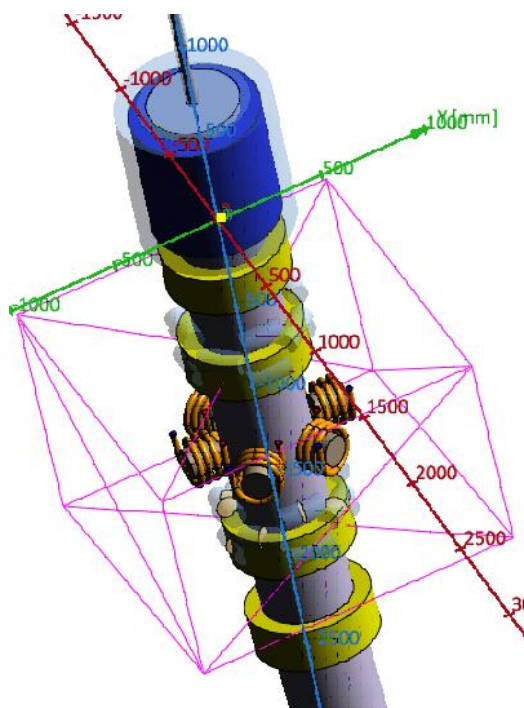
Základní geometrii tak tvoří nejen základní licí proud, ale např. i krystalizátor, chlazení krystalizátoru, výlevka, elektromagnetický míchač, konec startovací tyče, ostřikové oblasti či vodící, tažné a rovnací válečky. Příklad geometrie 3D modelu plynule odlévaného předlitku s vybranými konstrukčními prvky zařízení plynulého odlévání oceli je uveden níže na **obr. 4**.

4.2 Zkušenosti s přípravou výpočetní sítě

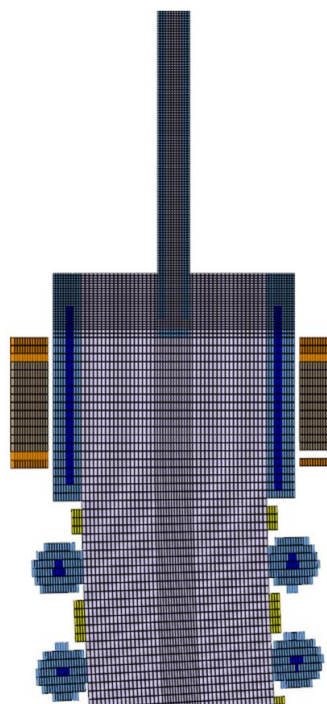
Výpočetní síť je tvořena elementy konečných diferencí. Jedná se tedy o pravoúhlou síť, která popisuje jednotlivé konstrukční části pravoúhlými hexaedry (šestistěny). Při tvorbě výpočetní sítě je proto důležité promyslet, které konstrukční prvky jsou nejdůležitější a vyžadují zjemnění a naopak, které lze, řekněme, zvolit větší. Pro simulace plynulého lití včetně zachycení odlévání je důležité jemně vysítovat vstup (výlevku).

Aby byl dobře zachycen i přestup tepla mezi chlazenými válečky, ostřikovými zónami a licím proudem, je třeba zvážit i velikost výpočetních buněk těchto komponentů a ověřit velikost dotykových ploch. Z tohoto důvodu je důležité rozdělit jednotlivé konstrukční prvky ZPO do tzv. skupin.

Při přípravě jednotlivých skupin, které se liší velikostí výpočetních buněk, je také důležité pořadí jednotlivých komponent. Nejdůležitější komponenta je na konci seznamu, a „důležitost“ se směrem nahoru „snižuje“. Ukázka detailu výpočetní sítě modelu ZPO v řezu je uvedena na **obr. 5**.



Obr. 4 Příklad 3D geometrie vybrané části ZPO
Fig. 4 Example of 3D geometry of selected part of CCM



Obr. 5 Ukázka detailu výpočetní sítě v řezu
Fig. 5 Example of a computational mesh in cross section

4.3 Definice parametrů výpočtu

Jakmile je hotova geometrie a výpočetní síť modelu pro simulaci procesu plynulého odlévání oceli, je třeba definovat parametry výpočtu. Pokud je geometrie a síť vytvořena správně, software automaticky předpřipraví platformu pro zadávání všech relevantních veličin a kontroluje i vzájemnou provázanost hodnot veličin či matematických funkcí, jimiž je hodnota počítána. V případě nesouladu definice veličiny se objeví v příkazovém řádku varování i se stručným popisem problému. Protože parametrů, které je potřeba stanovit, je velké množství, je tato automatická kontrola velkým pomocníkem.

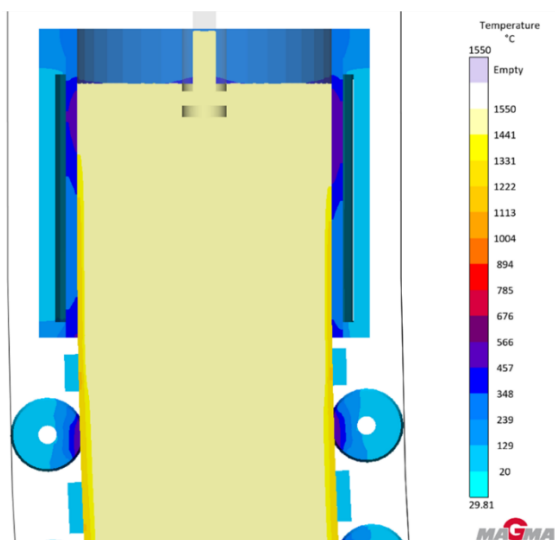
Mezi nezbytné parametry modelu obvykle patří:

- termodynamické a termo-fyzikální vlastnosti materiálů komponent modelu
- přestupy/odvody tepla na rozhraní krystalizátor – předlitek, předlitek – ostříky, předlitek – válečky, chlazení krystalizátoru, chlazení válečků
- okrajové podmínky, jako je lící teplota a lící rychlost
- operační podmínky (gravitace, operační tlak, teplota okolí atd.)

Termofyzikální vlastnosti konkrétních kovových materiálů lze do SW importovat z výpočtu v SW JatMatPro. Nicméně SW MAGMASOFT disponuje už i tak základní rozsáhlou nejen materiálovou databází, ale i databází funkcí např. pro výpočet přestupu tepla. Také okrajové podmínky, jako je např. lící rychlost, je možné definovat jako časově závislou proměnnou a nikoli jen jako konstantu. Variabilita definice parametrů výpočtu je tak široká, ale je třeba mít na paměti, že volba způsobu definice způsobu výpočtu parametrů už závisí především na zkušenostech a znalostech uživatele.

5. Výsledky výpočtu

Numerickou simulací je získávána informace o rozložení rychlostního a teplotního pole po délce plynule litého předlitku, charakteru proudění při použití různých typů ponorných výlevek a elektromagnetického míchání, tloušťce licí kůry na konci krystalizátoru, metalurgické délce, ale také napěťových stavech, které mohou ovlivňovat konečnou kvalitu plynule odléváných ocelových předlitků. Příklady výsledků jsou uvedeny na **obr. 6 a obr. 7**.



Obr. 6 Vlevo: Příklad teplotního pole v oblasti krystalizátoru, Vpravo: Ukázka stanovení tloušťky licí kůry na konci krystalizátoru

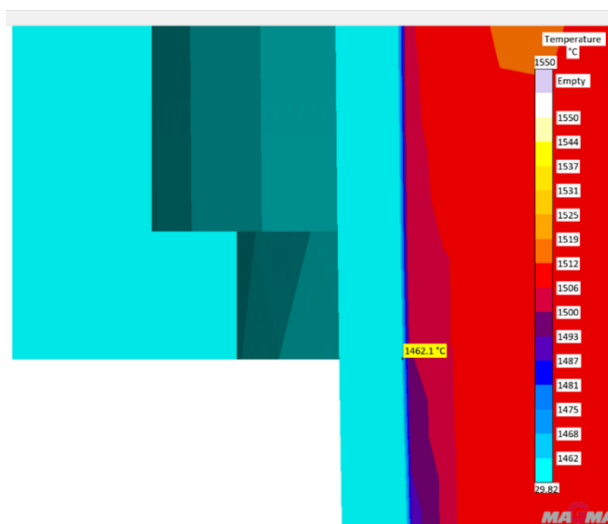
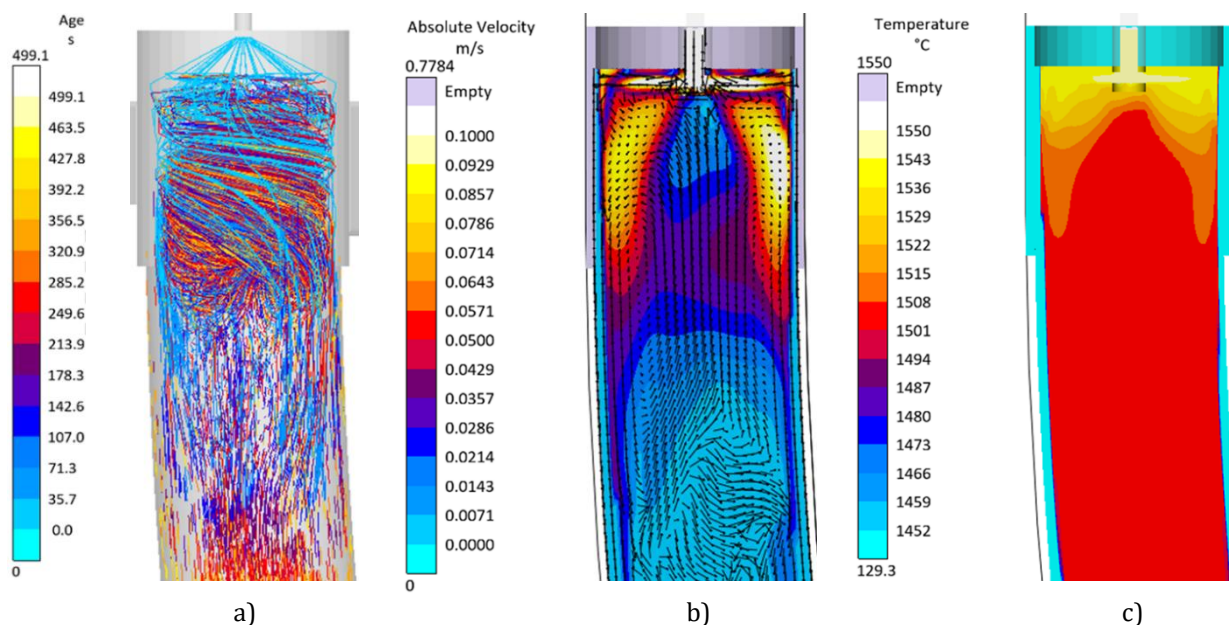


Fig. 6 Left: Example of temperature field in the mould area, Right: Example of determining the thickness of the casting shell at the end of the mould



Obr. 7 Ukázka výsledků simulací dějů v oblasti krystalizátoru a) proudění při použití M-EMS b) profil rychlosti v řezu středem výlevky c) profil teplotního pole v řezu středem výlevky

Fig. 7 Example of simulation results in the mould area a) steel flow when using M-EMS b) velocity profile in a section through the centre of the nozzle c) temperature field profile in a cross section through the SEN

6. Závěr

Předkládaný příspěvek stručně shrnuje poznatky autorů s využíváním software MAGMASOFT® při studiu plynulého odlévání ocelových předlitků v podmínkách TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN, a.s. Výsledky simulací jsou kontrolovány v provozních podmínkách např. pomocí termovizního měření či makrolepty příčných řezů, kde je možné odečíst šířku krystalizačních pásem v závislosti na změně intenzity chlazení. Díky komplexnímu výzkumu a hodnocení procesu plynulého odlévání oceli se daří v podmínkách TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN, a.s. optimalizovat podmínky výroby oceli a udržet tak trvale kvalitní výrobu.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl vypracován za podpory projektu TŽ - TT/TTw/2/TVP-507.

LITERATURA

- [1] © TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY – MORAVIA STEEL. *Polotovary*. Online. [2024]. Dostupné z: <https://www.trz.cz/produkty/polotovary/>. [citováno 2024-04-12].
- [2] TKADLEČKOVÁ, M.: *Numerické modelování metalurgických procesů*. Habilitační práce. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Katedra metalurgie a slévárenství, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2013.
- [3] DOLEJŠÍ, Zdeněk. *Plynulé odlévání oceli: tepelné technické poměry při plynulém odlévání oceli*. Poradenská příručka, č. 42. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [4] DOLEJŠÍ, Zdeněk. *Plynulé odlévání oceli*. 2. díl, Nové systémy v technologii plynulého odlévání oceli. Poradenská příručka, č. 42/2. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988.
- [5] BÖHM, Zdeněk. *Plynulé odlévání oceli*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 80-03-00661-9.
- [6] BHATTACHARY, A. K.; DEBJANI, S.; ROYCHOWDHURY, A.; DAS, J. Optimization of Continuous Casting Mould Oscillation Parameters in Steel Manufacturing Process Using Genetic Algorithms. In: *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. New York City, USA: IEEE, 2007, pp. 3998-4004. ISBN 14-244-1339-7.
- [7] CIBULKA, J.; PINDOR, L.; CUPEK, J.; KUFA, J.; KAWA, F. První zkušenosti s provozováním hydraulické oscilace na sochorovém zařízení plynulého odlévání v TŽ, a. s. In: *Iron and Steelmaking*. Horní Bečva, Česká republika, 2011.
- [8] LIU, Z., LI, B. Effect of vertical length on asymmetric flow and inclusion transport in vertical-bending continuous caster. Online. *Powder Technology*. 2018, vol. 33, pp. 403-415. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.10.034>. [citováno 2024-04-12].
- [9] PŘÍHODA, M.; BAŽAN, J.; DOBROVSKÁ, J.; JELÍNEK, P.; JONŠTA, Z.; VROŽINA, M. *Nové poznatky z výzkumu plynulého odlévání oceli*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2001. ISBN 80-248-0037-3.
- [10] CUPEK, J.: *Vliv technologických parametrů plynulého odlévání oceli na makro a mikrostrukturu ocelí určených ke kování*. Disertační práce. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2017.
- [11] BRIDGE, M. R.; ROGERS, G. D.: Structural effects and band segregate formation during the electromagnetic stirring of strand-cast steel. *Metallurgical and Materials Transactions*. 1984, vol. 15, no. 3, pp. 581-589. ISSN 1073-5615.
- [12] DOMANSKI, D.; KIM, K. S. et al.: Optimized electromagnetic stirring for continuous casting of steel billets and blooms. *SEAIQ Quarterly Journal*. 2010, vol. 39, no. 2, pp. 46-52. ISSN 0129-5721.
- [13] HOU, Z.; CHENG, G.: Characteristics and a novel quantitative model of macrosegregation in continuously cast high-carbon billets. In: *AISTech Proceedings*. Atlanta, 2012, pp. 1229-1238. ISBN 978-1-935117-24-7.
- [14] CIBULKA, J.: *Studium tvorby segregací v podmínkách sochorového zařízení plynulého odlévání oceli*. Disertační práce. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2015.
- [15] Yang, X. G.; Xu, Q. T.; Wu, C. L.; Chen, Y. S. (2017). Experimental study of the continuous casting slab solidification microstructure by the dendrite etching method. Online. *Materials Science and Engineering*(283). Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/283/1/012017>. [citováno 2024-04-12].
- [16] Sun, T.; Yue, F.; Wu, H.-J.; Guo, C.; Li, Y.; Ma, Z.-C. (2016). Solidification Structure of Continuous Casting Large Round Billets under Mold Electromagnetic Stirring. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 23(4).
- [17] KOZUBKOVÁ, M.; DRÁBKOVÁ, S. Numerické modelování proudění - FLUENT I. Online. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2003. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>. [citováno 2024-04-12].
- [18] TKADLEČKOVÁ, M.; MICHALEK, K.; SVIŽELOVÁ, J.; WALEK, J.; STROUHALOVÁ, M. Termodynamické, termochemické a numerické výpočty v metalurgii a jejich využití při optimalizaci technologie výroby oceli. In: *Oceláři: 35. ročník konference o teorii a praxi výroby a zpracování oceli: sborník konference: 4.-5. 4. 2019, Rožnov p. Radhoštěm, Česká republika*. CD-ROM. Ostrava: TANGER spol. s r.o., 2019, s. 93-100, ISBN 978-80-87294-90-1.
- [19] MAGMA Gießereitechnologie GmbH. *Modul CC*, software MAGMASOFT. Dostupné z: <https://www.magma-soft.de/cs/reseni/continuous-casting/strangguss-steel/>. [citováno 2024-04-12]