

Recenzované vědecké články

Numerické modelování jako účinný nástroj predikce kvalitativních parametrů plynule litých ocelových předlitků

Numerical Modelling as an Effective Tool for Prediction of Qualitative Parameters of Continuously Cast Steel Billets

doc. Ing. Markéta Tkadlečková, Ph.D.^{1,2}; prof. Ing. Karel Michalek, CSc.^{1,2}; doc. Ing. Karel Gryc, Ph.D.^{1,2}; doc. Ing. Ladislav Socha, Ph.D.^{1,2}

¹ VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra metalurgie a slévárenství, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika

² VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Regionální materiálově technologické výzkumné centrum, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika

Zvládnutí technologie plynulého odlévání ocelových předlitků bez vnitřních vad a nehomogenit, jako je porozita, trhliny či praskliny, je obvykle podmíněno znalostí a optimalizací teplotního pole předlitku, metalurgickou délkou, délkou dvoufázového pásma, makrosegregací a napěťových stavů, ke kterým dochází v průběhu tuhnutí a chlazení předlitku. Jednou z metod, která dnes bývá k verifikaci poznatků o procesu uplatňována, je metoda numerického modelování v komerčně dostupných softwarech. Simulačních softwarů je dnes ale na trhu celá řada a ne vždy je snadné pro uživatele se zorientovat, který z nabízených programů je nejvhodnější právě pro verifikaci poznatků a optimalizaci jeho procesu. Příspěvek proto prezentuje aktuální výpočetní možnosti a zkušenosti získané při ověřování kvalitativních parametrů plynule litých ocelových předlitků v softwaru ProCAST, který je využíván na katedře metalurgie a slévárenství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství pod záštitou Regionálního materiálově technologického výzkumného centra Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava pro řešení projektů s průmyslovými partnery. Pozornost je zaměřena především na přehled základních požadovaných výsledků u radiálního plynulého odlévání ocelových předlitků, tomu zvolený způsob výpočtu, problematiku identifikace vstupních parametrů numerického modelu a interpretaci získaných výsledků.

Klíčová slova: ocel; plynulé odlévání; numerické modelování; porozita; trhliny

The mastery of the technology of continuous casting of steel billets without internal defects and non-homogeneity, such as porosity, cracks and tears, is usually based on the knowledge of the temperature field, metallurgical length, length of the two phase zone, macrosegregation and stresses, which can occur during solidification and cooling of the steel billet. One of the ways how to monitor and optimize the processing parameters of the continuous casting technology, or of the temperature profile of the cast strand and the quality of the semi-finished products is the application of numerical modelling, in which numerical methods are used for solving mathematical equations of the mass transfer, movement and energy. Currently, many types of simulation software exist and for users it is very complicated to choose the best one for optimization of specific process. Therefore, the paper presents the actual computational possibilities and experiences of the modelling of the qualitative parameters of the continuously cast steel billets in ProCAST simulation software achieved during the solving of research projects with industrial partners. The ProCAST simulation programme is a part of the equipment of the “Laboratory of modelling of processes in liquid and solid phases” of the “Regional Materials Science and Technology Centre” at the Faculty of Metallurgy and Materials Engineering at the VŠB – Technical University of Ostrava. In the paper, the list of the required results is reported. Based on the required results for radial continuous casting of steel billets, the most suitable way of the definition of the numerical model and computation are described. The paper describes the pre-processing, processing and post-processing phases of numerical modelling. Also, the problems with determination of the thermodynamic properties of materials and the heat transfer between the individual parts of the casting system, including the definition of the heat losses along the casting strand in the primary and secondary cooling, are discussed.

Key words: steel; continuous casting; numerical modelling; porosity; cracks

Plynulé odlévání oceli představuje v současnosti hlavní metodu výroby sochorů, bram i bloků. Během plynulého odlévání je tavenina oceli řízeně transformována na tuhý stav požadovaného rozměru a tvaru předlitku určeného k následnému tváření. V oblasti výroby plynule odlévané oceli je prioritou každého výrobního podniku zvýšení bezpečnosti výroby, výrobnosti a kvality vyráběné oceli za současné minimalizace ekologické zátěže. Zvýšení výrobnosti znamená nárůst počtu taveb odlitých v jedné sekvenci bez přerušování lité a následných restartů. Na druhou stranu odlévání různých jakostí oceli v řadě za sebou vyžaduje individuální nastavení parametrů lité. Zvýšení bezpečnosti a zejména zabránění nežádoucím průvalům předpokládá znalost tloušťky licí kůry předlitku nejen na konci krystalizátoru, ale v případě radiálního odlévání i v místě nejvýraznějšího zakřivení oblouku včetně znalosti tlakových poměrů tekuté fáze v tuhoucím předlitku při zvolené licí rychlosti, licí teplotě a režimu chlazení [1].

Je tedy patrné, že plynulé odlévání oceli představuje komplexní technologický proces, který je doprovázen řadou fyzikálně-chemických dějů zahrnujících např. multifázové proudění oceli v krystalizátoru, chemické reakce (procesy probíhající mezi licím práškem a taveninou v krystalizátoru) či vlastní tuhnutí. Častým problémem při výrobě oceli je pak právě správné nastavení podmínek odlévání a tuhnutí oceli. Porozumění těmto mechanismům vyžaduje znalosti z oblasti technologie výroby oceli, metalurgické termodynamiky a kinetiky. Dalšími dvěma vzájemně závislými požadavky, které pomáhají porozumět výrobě oceli, jsou experimentální měření a modelování procesů. Modelování je proces, při kterém se zkoumanému systému, označovanému jako dílo, přiřazuje podle určitých pravidel jiný systém nazývaný model. Při řešení díla nahrazujeme modelem takovým způsobem, že výsledky zkoumání na modelu přináší nové informace o díle. Má-li model stejnou fyzikální podstatu jako dílo, hovoříme o fyzikálním modelování [2]. Druhou metodou je matematické, resp. numerické modelování (při řešení matematického modelu jsou využity numerické metody) [3, 4]. Při matematickém modelování má model, na rozdíl od fyzikálního modelování, jinou fyzikální podstatu než dílo. Podmínkou sestavení analytického matematického modelu je znalost probíhajících přírodních procesů a znalost zařízení, ve kterých procesy probíhají.

Díky numerickému modelování lze dnes již předpovídat chování tuhajícího předlitku v závislosti na okrajových podmínkách odlévání a určit např. teplotní pole předlitku, resp. tloušťku licí kůry na konci krystalizátoru, metalurgickou délku, velikost středové porozity či nebezpečí vzniku trhlin a prasklin [5 – 9]. Ale například možnost predikce uvedených objemových vad za současné aktivace elektromagnetického míchání zůstává i přes soustavný vývoj v oblasti výpočetních metod velkou výzvou. Obvykle lze predikovat pouze vliv elektromagnetického míchání na charakter proudění oceli v krystalizátoru [10] a nelze uvažovat se souběžným vznikem pevné frakce, která je přirozenou součástí procesu.

Omezíme-li se na software ProCAST, uvedený v abstraktu, je možné predikovat všechny zmíněné parametry předlitků, avšak za předpokladu vhodně zvoleného způsobu výpočtu. Dalším nezbytným předpokladem je správná konfigurace programu, zkušenosti výzkumných pracovníků a přirozeně definice výpočtu. Nemalou měrou se na kvalitě výsledků podílí i jejich správná interpretace a možnost verifikace dle provozně dostupných údajů, např. teplot na povrchu předlitku naměřených pyrometry.

1. Metody výpočtu

Podmínkou výpočtu teplotního pole, respektive metalurgické délky, tloušťky licí kůry či porozity a napětí, je vybavenost softwaru příslušnými moduly. Při definici výpočtu lze pak volit ze dvou přístupů (metod výpočtu):

- Výpočet za tepelně ustálených podmínek – tzv. Steady State Thermal Conditions (SSTC)
- Výpočet technikou cestující okrajové podmínky – tzv. Traveling Boundary Conditions (TBC)

U výpočtu technikou SSTC, kdy výsledky ukazují tzv. ustálený stav, nás zajímá poslední uložený krok výpočtu. U výpočtu TBC lze vývoj výpočtu tuhnutí předlitku sledovat průběžně již při každém uloženém kroku. Výsledky obou výpočtových způsobů se však k sobě musí co nejvíce blížit. Rozdíl mezi výpočty tkví v přípravě geometrie modelované oblasti a algoritmu výpočtu.

Společnými rysy obou výpočtových metod je následná nutnost definice termo-fyzikálních vlastností odlévané oceli (specifikace materiálu), nastavení okrajových podmínek odlévání (jako je licí teplota, licí rychlost či odvod tepla v primární a sekundární zóně chlazení) a parametrů výpočtu, resp. kritérií konvergence a ukončení výpočtu.

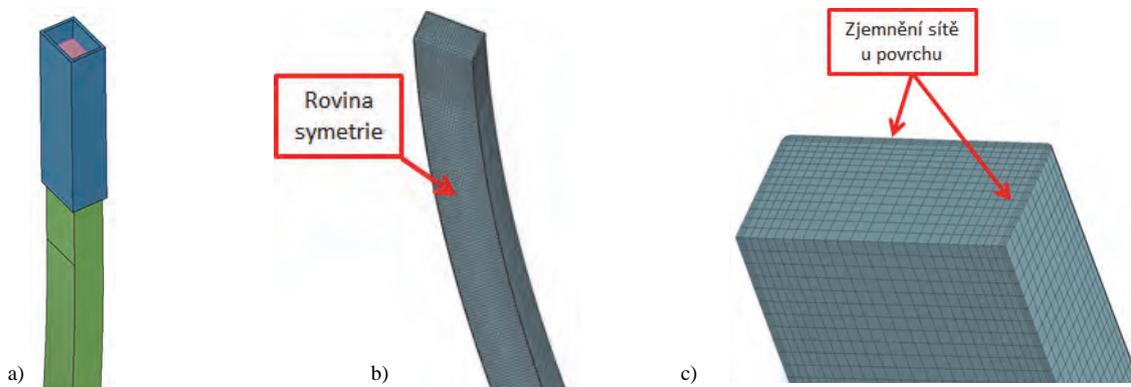
1.1 Výpočet metodou Steady State Thermal Conditions

Geometrie modelované oblasti je tvořena zjednodušeným krystalizátorem a předlitkem, který obvykle představuje celý radiální úsek a část přímého výběhového úseku. Ukázka části (detailu) geometrie předlitku radiálního plynulého odlévání je zachycena na obr. 1a. Nezahrneme-li do výpočtu proudění, pak je možné zanedbat i výlevku zasahující do taveniny oceli v krystalizátoru. Podstatným zjednodušením výpočtu je úprava geometrie pouze na jednu symetrickou polovinu (obr. 1b), čímž se výrazně omezí doba výpočtu díky polovičnímu počtu následně vytvořených výpočetních buněk.

Jak již předchozí věta naznačuje, dalším krokem při numerickém modelování je příprava **výpočetní sítě**. Software ProCAST využívá k řešení parciálních diferenciálních rovnic numerickou metodu konečných prvků. Při přípravě výpočetní sítě je třeba přihlídnout

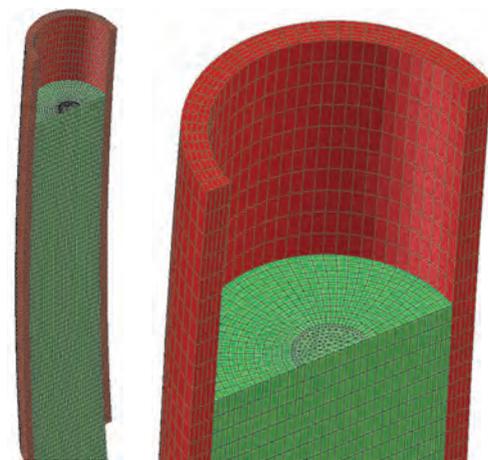
k velikosti modelované oblasti a očekávaným výsledkům. Zajímá-li nás např. velikost tloušťky licí kůry na konci krystalizátoru, pak je vhodné provést zjemnění sítě v blízkosti povrchu předlitku (obr. 1c). Taktéž ve středové části předlitku, kde očekáváme např. vznik

středové porozity (výskyt ředin – provozně lunkrů), je vhodné zvolit jemnější rozložení buněk (obr. 2). Každé zjemnění výpočetní sítě ale představuje nárůst počtu výpočetních buněk, a tedy prodloužení doby výpočtu.



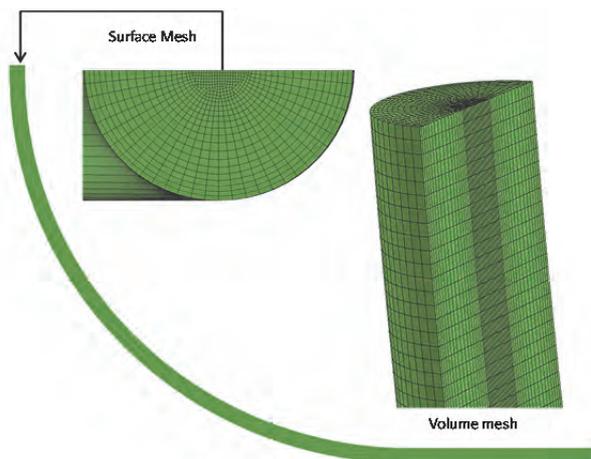
Obr. 1 Příklady přípravy geometrie a výpočetní sítě pro výpočet za tzv. Steady State Thermal Conditions (a) zjednodušená geometrie předlitku a krystalizátoru (b) omezení geometrie na symetrickou polovinu a vyznačení roviny symetrie (c) detail síťování v blízkosti povrchu k detekci tloušťky licí kůry

Fig. 1 Examples of geometry and computational mesh for computation under Steady State Thermal Conditions (a) simplified geometry of billet and mould (b) simplified symmetrical geometry of the billet with symmetry plane (c) detail of mesh near the surface of the billet for detection of the shell thickness



Obr. 2 Přiblížený pohled na výpočetní síť předlitku určenou k predikci středové porozity

Fig. 2 Detail view on the computational mesh of the billet for prediction of the central porosity



Obr. 3 Geometrie a výpočetní síť kruhového plynule odlévaného předlitku připravená pro výpočet tuhnutí technikou TBC

Fig. 3 Geometry and computational mesh of the round continuously cast billet for computation by TBC method

1.2 Výpočet metodou Traveling Boundary Conditions

Výpočet tuhnutí plynule litého předlitku metodou TBC je, jak již bylo v úvodu kap. 1. zmíněno, zajímavý už proto, že lze vývoj tuhnutí předlitku sledovat průběžně. Druhým kladným aspektem je zjednodušení přípravy geometrie a výpočetní sítě, která je omezena pouze na vlastní předlitek (obr. 3). Taktéž u této metody výpočtu je nutné přihlídnout při následné tvorbě výpočetní sítě k požadovaným výsledkům a provést zjemnění sítě v oblasti blízko povrchu a středu předlitku.

2. Parametry výpočtu

Jakmile je dokončena výpočetní síť, je nutné definovat **parametry výpočtu**, a to:

- termodynamické a termo-fyzikální vlastnosti materiálu (fyzikální vlastnosti materiálu závislé na teplotě),
- způsob výpočtu přestupu/odvodu tepla na rozhraní krystalizátor-předlitek,
- způsob výpočtu odvodu tepla z předlitku v oblasti sekundárního chlazení,
- okrajové podmínky, jako je licí teplota a licí rychlost oceli,

- operační podmínky, mezi něž patří směr působení gravitace, operační tlak, teplota okolí atd.

2.1 Termo-fyzikální vlastnosti oceli

V případě modelování tuhnutí oceli je nezbytné definovat termo-fyzikální vlastnosti oceli, jako je hustota, entalpie či tepelná kapacita, tepelná vodivost či viskozita oceli, a to jako závisle proměnné na teplotě. Ačkoli došlo v metodách pro stanovení materiálových vlastností k výraznému pokroku, je stále velice složité analyzovat hodnoty ve vysokoteplotní oblasti, zejména pak po překročení teploty solidu nebo likvidu. Rovněž identifikace i vlastních teplot fázových transformací je velice komplikovaná a časově náročná. Ještě komplikovanější je situace v případě stanovení napěťových vlastností oceli, které jsou podstatné pro výpočet predikce vzniku trhlin a prasklin v předlitcích. Obvykle máme k dispozici pouze konstantní hodnoty získané z měření za pokojových teplot přetvářených ocelí příslušných značek a druhů. Pro vlastní výpočet napětí během odlévání a tuhnutí je však potřeba znát změnu napěťových parametrů oceli v závislosti na teplotě, a to nejlépe u primární lité struktury. Jak tedy postupovat při identifikaci termo-fyzikálních vlastností? V současné době se uplatňují zejména následující metody identifikace vlastností:

- experimentální metody, mezi něž lze zařadit termickou analýzu, dilatometrii apod.,
- výpočet pomocí empiricky stanovených rovnic z měření příslušných parametrů,
- Neumann-Koppovo pravidlo k určení změny tepelné kapacity materiálu v závislosti na jeho chemickém složení a teplotě,
- termodynamické databáze, typu IDS, ThermoCalc, Dictra, Pandat či CompuTherm a další,
- použití dostupných a relevantních literárních údajů, pokud vycházejí ze srovnatelných počátečních podmínek.

Problematika náročnosti a složitosti identifikace materiálových vlastností termickou analýzou byla již publikována např. v [11], kde lze dohledat i přehled některých empiricky stanovených rovnic používaných zejména pro stanovení teplot fázových transformací, jako je teplota likvidu a solidu oceli v závislosti na chemickém složení. Dalším ze zmíněných postupů může být například stanovení termo-fyzikálních vlastností oceli za použití pseudobinárního fázového diagramu Fe-C, uvedeného v lit. [12], nebo výpočtem pomocí Neumann-Koppova pravidla [13]. Neméně časté je použití komerčních termodynamických databází, které umožňují výpočet termo-fyzikálních vlastností na základě definovaného chemického složení [14]. Přehled napěťových charakteristik nezbytných pro numerické modelování tuhnutí oceli získaných výpočtem v termodynamické databázi CompuTherm je znázorněn na obr. 4.

Property	Type	Value	Value Unit	(F(T)) Unit
ThermalExpansion	Secant			
Secant	F(T)		1/K	C
Secant Ref. Temp	Const.	36.24	C	
Type	Elasto-Plastic			
Young's Modulus	F(T)		MPa	C
Poisson's Ratio	F(T)			C
Yield Stress	F(T)		MPa	C
Hardening	Isotropic			
Isotropic	Linear			
Plastic Modulus	Const.	500	MPa	
Annealing Temperature				
Annealing Temperature	Const.		C	

Obr. 4 Panel materiálové databáze oceli s ukázkou napěťových vlastností nezbytných k výpočtu s modulem Stress a HCS

Fig. 4 Panel of the material database of steel with illustration of the stress properties necessary for computation with Stress and HCS module

2.2 Definice odvodu tepla z povrchu předlitku

Je-li do tvorby geometrie, resp. metody výpočtu, zahrnut i krystalizátor, lze odvod tepla z krystalizátoru definovat pomocí vodního chlazení (Water Cooling) a chlazení vzduchem (Air Cooling), které jsou dostupné v nabídce okrajových podmínek softwaru.

V opačném případě je nutné odvod tepla z povrchu předlitku definovat uživatelskou funkcí. Základní šablony uživatelských funkcí tepelného toku v krystalizátoru a změny koeficientů přestupu tepla v sekundární zóně chlazení lze najít v databázi simulačního softwaru pod názvy `heatflux.c`, a `convehtransfer.c`. Jak již koncovky funkcí napovídají, funkce jsou definovány v programovacím jazyce C++. Šablony však pouze uvádějí základní seznam veličin nezbytných k zadání okrajové podmínky. Volba způsobu výpočtu okrajové podmínky (např. změna tepelného toku po výšce krystalizátoru včetně vlivu vzniku plynové mezery) je již pouze na uživateli. Bližší informace k výpočtu odvodu tepla po délce předlitku byly zveřejněny např. v [15].

3. Predikce porozity

Výpočet porozity je vhodné realizovat až po odladění teplotního pole. Porozita může být počítána jak metodou SSTC, tak TBC. Podmínkou numerické predikce porozity u plynule odlévaných ocelových předlitků je vybavenost softwaru tzv. APM modulem (Advanced Porosity Module). Porozita je u výsledků numerické simulace představována podílem nezaplňných elementů. Větší podíl nezaplňných elementů představuje větší porozitu. To znamená, že nezobrazujeme porozitu jako takovou, ale pouze lokalizujeme místo s pravděpodobným výskytem porozity. Zobrazení porozity se tedy bude v závislosti na velikosti výpočetních buněk jevit u výsledků numerické simulace větší, než tomu bude ve skutečnosti. Abychom docílili co nejpřesnějšího vizuálního i objemového srovnání, je vhodné mít při výpočtu tuhnutí jemnější síť s menší velikostí výpočetních buněk.

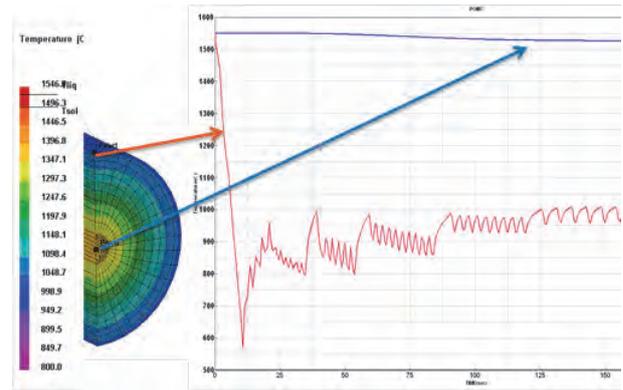
4. Predikce napětí, trhlin a prasklin

Před zahájením výpočtu napětí platí stejné pravidlo jako u výpočtu porozity – měli bychom mít již korektně nastavený výpočet teplotního pole. Další nezbytnou podmínkou je doplnění termodynamických vlastností oceli o napěťové charakteristiky (obr. 4).

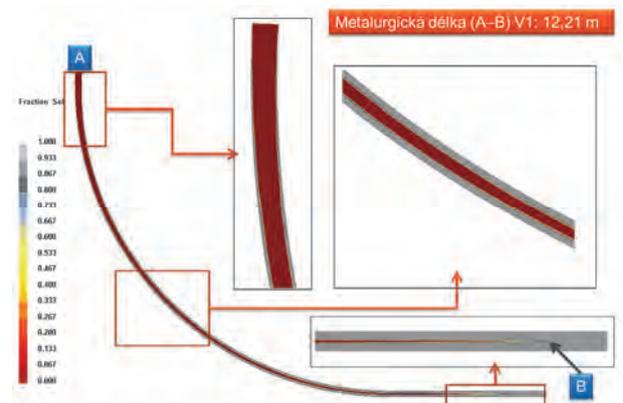
Predikci napětí v plynule litém předlitku, a tedy nebezpečí vzniku trhlin a prasklin, lze opět stanovit s využitím modulu Stress a HCS (Hot Cracking Sensitivity). Pro predikci nebezpečí vzniku trhlin v podpovrchových oblastech je vhodnější napěťový výpočet pomocí modulu Stress. Výsledkem jsou pak normálová a tahová napětí v mezním stavu při vyčerpání plasticity materiálu a tzv. kritérium Hot Tearing Indicator (predikce trhlin za tepla). Pro predikci středových trhlin je vhodnější použití výpočtu pomocí HCS kritéria. Toto kritérium zakládá detekci porušení materiálu na empirických vztazích, které berou do úvahy teplotní gradienty, rychlost ochlazování a velikost dvoufázového pásma [16].

5. Výsledky modelování

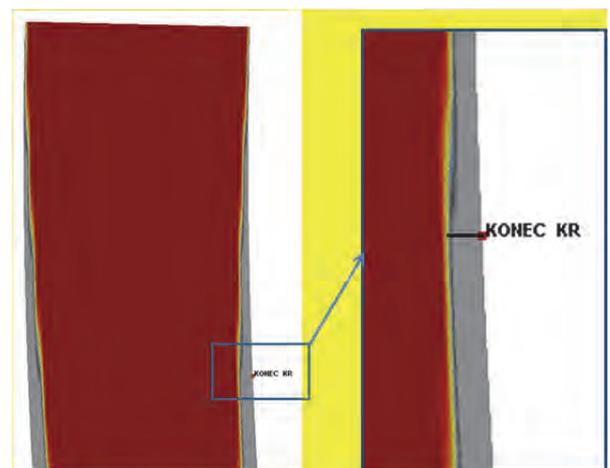
Výsledky modelování, které lze získat výše uvedenými výpočetními metodami, jsou v grafické podobě uvedeny na obr. 5a až 5g. Postprocesor ProCASTu, tzv. Visual Viewer, umožňuje zobrazení jak profilů teplot, tlaků, podílu utuhlé frakce, porozity, napětí atd., tak průběh změny např. teploty v čase po délce předlitku pomocí grafů. Základním výsledkem, který nás zajímá u výsledků modelování tuhnutí plynule litého předlitku, je teplotní pole, a to jak na povrchu předlitku, tak ve středu předlitku. Ukázka teplotního pole na povrchu předlitku je uvedena na obr. 5a. Příklad průběhu změny teploty na povrchu a ve středu předlitku v čase je uvádí graf na obr. 5b. Metalurgická délka a tloušťka licí kůry na konci krystalizátoru je zobrazena na obr. 5c a 5d. Finální porozita indikovaná ve středu předlitku APM modulem je zobrazena na obr. 5e. Predikce podpovrchových trhlin pomocí Hot Tearing Indicator je uvedena na obr. 5f a predikci středových trhlin pomocí HCS kritéria uvádí obr. 5g.



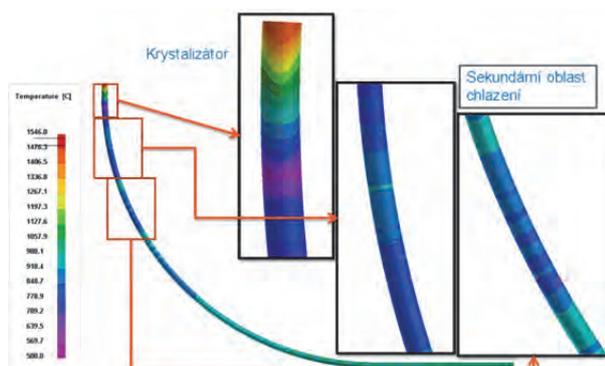
(b) změna průběhu teploty v čase po délce předlitku
(b) change of the temperature along the casting strand and depending on time



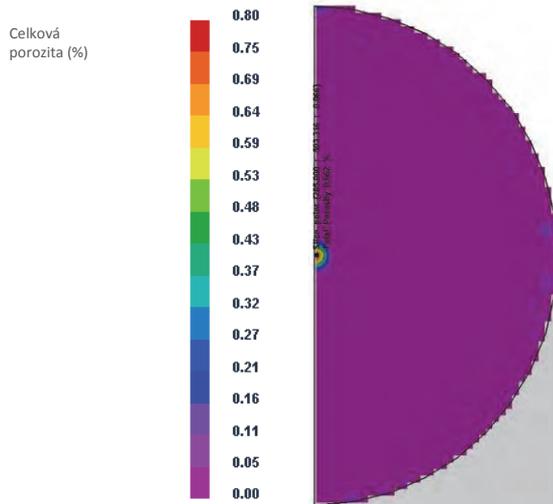
(c) metalurgická délka
(c) metallurgical length



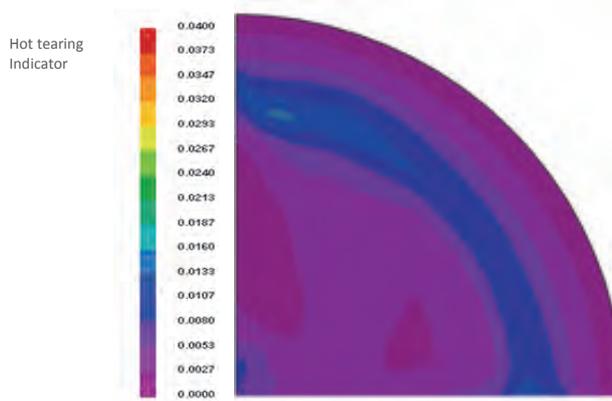
(d) tloušťka licí kůry na konci krystalizátoru
(d) shell thickness at the end of the mould



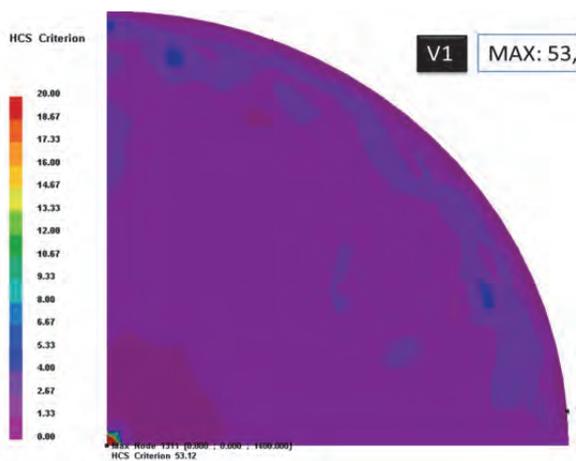
(a) teplotní pole na povrchu předlitku
(a) temperature field on the surface of the billet



(e) predikce porozity APM modulem
(e) prediction of porosity using the APM module



(f) predikce podpovrchových trhlin
(f) prediction of the subsurface hot tears



(g) predikce středových trhlin
(g) prediction of the central hot tears

Obr. 5 Příklady výsledků numerického modelování tuhnutí plynule litého ocelového předlitku

Fig. 5 Examples of the results of the numerical modelling of solidification of continuously cast steel billets

Závěr

Príspevok prezentuje aktuálnu zkušenosti autorů z numerického modelování tuhnutí plynule litého ocelového předlitku včetně predikce kvalitativních parametrů litého. Jsou zde uvedena doporučení pro nastavení numerického modelu určeného k získání konkrétního požadovaného výsledku. Bližší informace k problematice identifikace vstupních veličin, jako jsou termodynamické materiálové vlastnosti oceli či podmínky výpočtu odvodu tepla v oblasti primárního a sekundárního chlazení a jejich verifikace, jsou v příspěvku odkazovány na již publikovanou literaturu autorů. Na základě stávajících souhrnných znalostí o řešené problematice lze potvrdit, že numerické modelování je dobrou volbou pro optimalizaci procesu nejen plynulého odlévání, ale i odlévání ocelových ingotů či v oboru slévárenství. Využití numerického modelování je zvláště žádoucí při řízení metalurgických technologií výroby oceli v náročných provozních podmínkách, kdy lze jen velmi obtížně provádět nákladné fyzikální experimenty přímo v provozu, případně i v laboratoři.

Poděkování

Práce byla vytvořena za podpory projektu č. LO1203 "Regionální materiálové technologické výzkumné centrum - Program udržitelnosti" financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky a projektů Studentské grantové soutěže registračních čísel SP2016/89 a SP2016/103.

Literatura

- [1] GHOSH, A., CHATTERJEE, A. Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2008. 472 p. ISBN -978-81-203-3289-8.
- [2] PŘÍHODA, M., RÉDR, M. *Sdílení tepla a proudění*. 1. vyd., Ostrava, VŠB-TU Ostrava, 1998, s. 28. ISBN 80-7078-549-7.
- [3] ČARNOGURSKÁ, M. *Základy matematického a fyzikálního modelování v mechanice tekutin a termodynamice*. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2000, 176 s.
- [4] KOZUBKOVÁ, M., DRÁBKOVÁ, S. *Numerické modelování proudění - FLUENT I*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2003.
- [5] ŠTĚTINA, J. *Optimalizace parametrů lité sochorů pomocí modelu teplotního pole*. Habilitační práce. Ostrava: VŠB-TU OSTRAVA, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2008. <http://otp.fme.vutbr.cz/users/stetina/habilitace/index.htm>
- [6] GONZALEZ, M., GOLDSCHMIT, M. B., ASSANELLI, A. P., FERNÁNDEZ BERDAGUER, E., DVORKIN, E. N. Modeling of the Solidification Process in a Continuous Casting Installation for Steel Slabs. *Metallurgical and Materials Transaction B*, 34B, (2003), 455–473.
- [7] SISMANIS, P. *Modeling Solidification Phenomena in the Continuous Casting of Carbon Steels*. 2014. <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/20815.pdf>
- [8] DU, P. *Numerical modeling of porosity and macrosegregation in continuous casting of steel*. (PhD thesis) University of Iowa, USA, 2013. <http://ir.uiowa.edu/etd/2482>.
- [9] KORIC, S., HIBBELER, L. C., THOMAS, B. G. Explicit Coupled Thermo-Mechanical Finite-Element Model of Continuous Casting of Steel in Funnel Molds. In *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes XII*, Vancouver, Canada, June 7-14, 2009 Edited by S. Cockcroft et al. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).

- [10] MALDOVAN, M., PRÍNCIPE, J., SÁNCHEZ, G., PIGNOTTI, A., GOLDSCHMIT, M. Numerical Modelling of Continuous Casting of Rounds with Electromagnetic Stirring. In *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, ECCOMAS, Barcelona, 11.-14. Sept. 2000, <http://congress.cimne.com/eccomas/eccomas2000/pdf/476.pdf>
- [11] GRYC, K., SMETANA, B., ŽALUDOVÁ, M., MICHALEK, K., KLUS, P., TKADLEČKOVÁ, M., SOCHA, L., DOBROVSKÁ, J., MACHOVČÁK, P., VÁLEK, L., PACHLOPNÍK, R., CHMIEL, B. Determination of the Solidus and Liquidus Temperatures of the Real-steel Grades with Dynamic Thermal-Analysis Methods. *Materiali in Tehnologije*, 47 (2013) 5, 569–575. ISSN 1580-2949.
- [12] XIE, Y., YANG, J. Calculation of Solidification-related Thermophysical Properties of Steels Based on Fe-C Pseudobinary Phase Diagram. *Steel Research International*, 86 (2015) 7, 766–774. DOI: 10.1002/srin.201400191, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/srin.201400191/full>
- [13] ŽALUDOVÁ, M., SMETANA, B., ZLÁ, S., DOBROVSKÁ, J., ROSYPALOVÁ, S., KALUP, A., MICHALEK, K. Study of Heat Capacity of Real Steel Grade. In: *23rd Anniv. Intern. Conf. on Metall. and Mater. METAL 2014*. May 21-23, Brno: Tanger s.r.o., 2014. p. 559–563, ISBN 978-80-87294-54-3.
- [14] HAHN, S., SCHADEN, T. Dynaphase: Online Calculation of Thermodynamic Properties during Continuous Casting. *Berg – und Hüttenmännische Monatshefte*, 159 (2014)11, 438–446. DOI: 10.1007/s00501-014-0305-6. © Springer-Verlag Wien 2014.
- [15] TKADLEČKOVÁ, M., VÁLEK, L., SOCHA, L., SATERNUS, M., PIEPRZYCA, J., MERDER, T., MICHALEK, K., KOVÁČ, M. Study of Solidification of Continuously Cast Steel Round Billets Using Numerical Modeling. *Archives of Metallurgy and Materials*, 61 (2016) 1, 221–226. ISSN 1733-3490.
- [16] RAPPAZ, M., DREZET, J. M., GREMAUD, M. A New Hot Tearing Criterion. *Metallurgical Transaction*, 30A (1999), 449–455.

Ocelářský průmysl útočí na Čínu

Börsen-Zeitung

08.11.2016

Po tlaku evropských výrobců oceli zostřila Evropská komise antidumpingová opatření. Jenže roste obava, že problémy nemohou být vyřešeny ani z dlouhodobého hlediska. Na světových ocelářských trzích vládne obrovský přebytek nabídky, který přichází především z Číny, kde stojí 2/3 celosvětových přebytečných kapacit – kolem 390 mil. tun. „Na Čínu připadá 75 % celkových celosvětově vybudovaných kapacit od roku 2011,“ konstatoval prezident Hospodářského sdružení Ocel (WV Stahl) Hans Jürgen Kerkhoff na ocelářském summitu v Düsseldorfu. Kromě toho každá třetí vyexportovaná tuna oceli pochází z Číny, ta je noční můrou pro manažery hutního průmyslu. Evropská komise již před řadou měsíců zostřila svá antidumpingová pravidla a prakticky každý týden uvaluje na levné importy především z Asie vysoká trestná cla. Již téměř 40 příslušných výnosů je již v platnosti, z toho 17 jen proti Číně. Další budou následovat. Jenže budou tyto právní překážky stačit, aby se problém vyřešil? Mnozí ocelářští manažeři mají divný pocit: „Od trvalého řešení jsme na míle vzdáleni,“ říká Andreas Goss, šéf ocelářské divize ThyssenKrupp. Stále a celosvětově přibývající obchodní žaloby a zaváděná cla mu dělají starosti a říká: „Existuje nebezpečí, že to povede jen k roztrhání obchodních proudů“. I když přímé importy z Číny v posledních měsících v důsledku trestných cel lehce poklesly, tak Čína v důsledku toho exportuje víc do asijských zemí, které zase budou exportovat do Evropy ocel. Není to řešení. Mezitím pracuje Evropská komise na nových pravidlech, které umožní uplatňovat tvrdá antidumpingová opatření i po uznání Číny jako tržní ekonomiky. Otázka přebytečných výrobních kapacit není ale jediné nebezpečí, které evropský ocelářský průmysl ohrožuje. Velký tlak bude znamenat také připravovaná změna pravidel pro obchodování s certifikáty CO₂.

USA vyhlašuje na ocelářském trhu trestná cla

Handelsblatt

09.11.2016

V den, kdy celý svět napjatě čekal na výsledky volby amerického prezidenta, dostalo evropské ocelářské odvětví zcela osobní poselství z USA. Ministerstvo hospodářství USA uvalilo na některé ocelářské firmy, mimo jiné z Německa a Rakouska trestná cla. Ministerstvo těmto firmám předhazuje u některých výrobců dumping. Obviněny jsou mimo jiné VoestAlpine z Rakouska a Dillinger Hütte z Německa. Reakce ale nevypadá tak, jak si asi Američané představovali. Obě firmy ukázaly naprostý klid: „Celé to pro nás nepřichází nečekaně. Bereme předběžné závěry antidumpingového procesu na vědomí a budeme další postup sondovat s našimi zákazníky“. Jde hlavně o hrubé plechy, používané při stavbě lodí a ve stavebnictví. Pokud jde o objem dodávek, zaujímají USA pro Dillinger Hütte zcela zanedbatelnou roli. I pro VoestAlpine jsou faktické důsledky spíše minimální. Wolfgang Eder řekl, že se nejedná o nějaký masivní hospodářský výnos a skutečné ohrožení. Podle něho jde o okrajový aspekt ve velké hře. Výtka dumpingu proti firmám z Rakouska a Německa by měla být považována spíše jen za varovný výstřel.