

Recenzované výzkumné články

Vliv výšky licího kůlu na porozitu a segregace odlitého ingotu

The Effect of the Height of Casting Pole on Porosity and Segregations of the Cast Ingot

Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.; Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D.

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Regionální materiálově technologické výzkumné centrum Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

Předkládaná práce obsahuje návrh a také ověření vlivu výšky licího kůlu na průběh tuhnutí velkého 5 t ingotu. K ověření bylo využito numerické simulace odlévání a tuhnutí v software Magma 5. Práce byly provedeny pro reálné podmínky velké hutní společnosti. Studium obsahuje vliv tří parametrů na vnitřní homogenitu ingotu, zde reprezentovanou pouze mikroporovitostí, a to změny výšky licího kůlu, rychlosti odlévání a teploty odlévání. Mikroporovitost je totiž při výrobě velkých ingotů zásadní. Bylo zjištěno, že jakýkoli zásah do již vypracované technologie, a to i sebemenšího charakteru, má vliv na vnitřní jakost ingotu. Z tohoto důvodu se doporučuje, aby při změnách parametrů výroby byly pomocí numerického software odlévání a tuhnutí znovu ověřeny a přezkoušeny všechny požadované výstupy.

Klíčová slova: ocel; ingot; odlévání; tuhnutí; porozita

Nowadays, there is a great deal of pressure to increase the quality of cast ingots, as a result of efforts to increase the yield and to minimize the energy intensity of production. For this reason, the metallurgical company has decided new process of casting ingots and by this change to increase the yield and quality of cast ingots. The influence of the change of the height of the casting poles on the internal quality parameters of the cast ingot was determined in MATERIAL AND METALLURGICAL RESEARCH Ltd. (MMV) with the use of Magma 5 software, which used the Finite Differential Method (FDM) principle. The work focused mainly on the change of porosity of the cast ingot and also on finding the most suitable metallurgical parameters for casting. The cast grade of steel is marked as CrC steel. The work was divided into two phases, where in the first phase we compared approx. of ingots 5 t poured through a standard high casting pole (we will refer to it as "lower" pole) with ingots also cast by bottom casting but using a casting pole higher by 285 mm (we will refer to it as "higher" pole). The number of ingots on the casting plate was 8, and due to the speed of the calculation, we numerically simulated the casting and solidification of a symmetric 1/4 mold assembly. The liquidus temperature of the cast melt was 1453°C, the solidus temperature was 1326°C, and the melt temperature at the ingress of the mold was 1485°C. Based on the numerical casting and solidification simulations performed with the use of the Magma 5 software, from the point of view of micro-porosity, the lowest porosity content was reached by a numerical simulation with a lower casting inlet of Lower pole_2.5 / 0.5_1485 and, on the other hand, the worst porosity was achieved with a higher casting inlet, Higher pole_05_1485 at the same casting speed and temperature. Thus, when changing one parameter (height of casting inlet), other parameters (casting speed and/or casting temperature) need to be changed. We have to remind again that changing the height of the casting poles has less influence on the internal quality of the ingot than the casting speed or temperature, but with a strict view only on the micro-porosity in the casting process, this parameter also plays its role. If we evaluate the numerical simulations performed only for the higher casting pole, only from the point of view of micro-porosity, we assume that the smallest micro-porosity was shown by a numerical simulation called Higher pole.

Keywords: steel; ingot; casting; solidification; porosity

V dnešní době je velký tlak na zvyšování jakostních parametrů odlitých ingotů s cílem zvýšení výtěžnosti a minimalizace energetické náročnosti výroby. Z tohoto důvodu se hutní společnost rozhodla zvýšit licí kůl u odlévaných ingotů a touto změnou zvýšit výtěžnost a kvalitu odlévaných ingotů. Vliv změny výšky licího kůlu na vnitřní jakostní parametry odlévaného ingotu byly zjišťovány ve společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ

VÝZKUM s.r.o. (dále jen MMV) na numerickém software Magma 5, který využívá princip metody konečných diferencí (FDM). Práce se zaměřila především na změnu porozity odlitého ingotu a také na vyhledání nejvhodnějších metalurgických parametrů pro odlévání. Odlévaná jakost nese označení CrC ocel, jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 1.

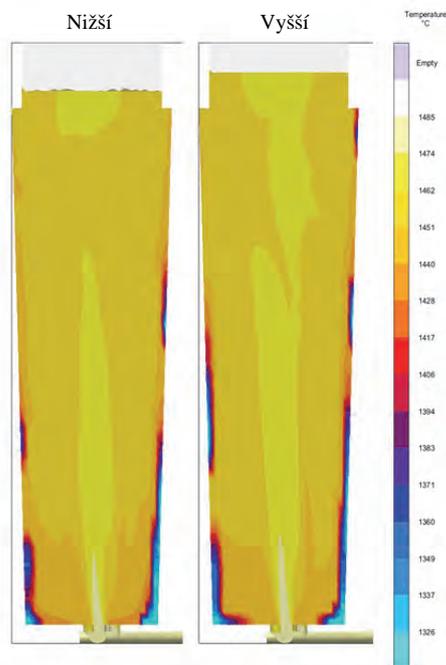
Tab. 1 Chemické složení uhlíkové CrC oceli (hm. %)
Tab. 1 The chemical composition of the CrC steel (wt. %)

C	Si	Mn	Cr	Ni
1,00	0,25	0,35	1,50	0,05

1. Numerické simulace odlévání a tuhnutí

Práce byla rozdělena do dvou fází, kdy v první fázi byly porovnávány cca 5tunové ingoty spodem odlévané přes standardně vysoký licí kůl (označen jako „nižší“) s ingoty taktéž spodem odlévanými, ale přes licí kůl vyšší o 285 mm (označen jako „vyšší“). Na licí desce bylo umístěno osm kokil. Z důvodu urychlení výpočtu byla provedena numerická simulace lití a tuhnutí symetrické čtvrtiny kokilové sestavy. Teplota likvidu odlévané taveniny činila 1453 °C, teplota solidu byla 1326 °C a teplota taveniny při vstupu do kokilové sestavy činila 1485 °C. Obě kokilové sestavy byly plněny rychlostí 3,4 t·min⁻¹ pro tělo ingotu a 0,73 t·min⁻¹ pro hlavový nástavec.

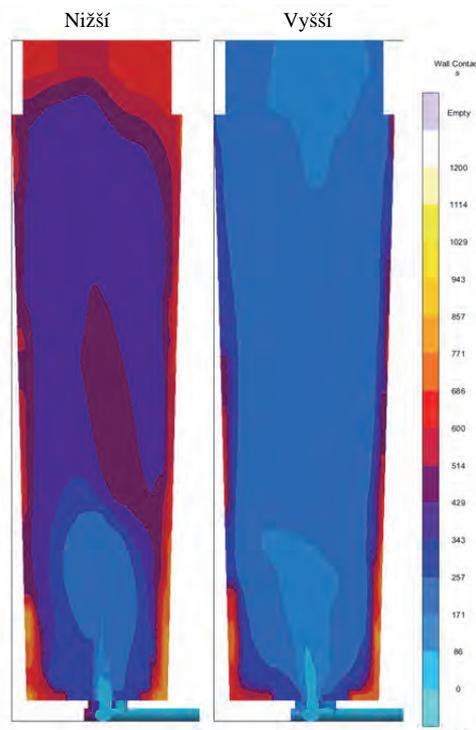
Po provedení numerických simulací bylo provedeno hodnocení změny vnitřních jakostí u ingotů odlévaných přes vyšší licí kůl oproti ingotům odlévaným přes nižší licí kůl. Porovnání bylo zaměřeno především na mikropórovitost, ale i na další jakostní parametry. V software Magma 5 je mikropórovitost vlastností Niyamova kritéria, které se hodnotilo podle autora [1]. Vliv teploty odlévané taveniny či chemického složení autoři článku již dříve prezentovali v [2, 3].



Obr. 1 Teplota taveniny během odlévání, v čase 734 s od začátku odlévání, tj. na začátku odlévání hlavy, teplota 1326 – 1485 °C
Fig. 1 Melt temperature during casting at the time 734 s from the beginning of casting, on the start of casting of the head, temperature of 1,326 – 1,485 °C)

Při porovnání teploty taveniny v ingotu odlévaného přes nižší a vyšší licí kůl (obr. 1) je patrné, že u vyššího licího kůlu dochází k proudění teplejší taveniny až k hlavovému

nástavci. Vyšší licí kůl způsobuje také intenzivnější míchání v kokile, a tedy i kratší dobu kontaktu taveniny se stěnou kokily, než je tomu v případě použití nižšího licího kůlu (obr. 2).



Obr. 2 Doba kontaktu taveniny se stěnou kokily, časové rozmezí 0 – 1200 s

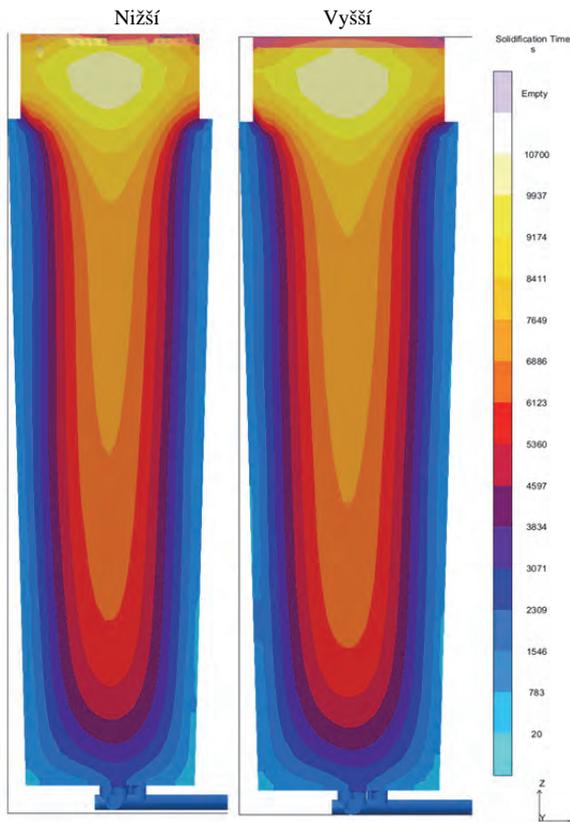
Fig. 2 Time of the melt contact with the mold wall, time range of 0 – 1,200 s

Doby tuhnutí u porovnávaných taveb se dvěma typy licích kůlů byly zhruba shodné. Ingoty odlévané přes nižší licí kůl tuhly 2:55:07 h:min:s a přes vyšší licí kůl 2:57:30 h:min:s. Při hodnocení tuhnutí byly využívány zdroje autora [4, 5].

Mírně delší doba tuhnutí z teploty likvidu na teplotu solidu u vyššího licího kůlu oproti nižšímu licímu kůlu, projevující se hlouběji směrem do těla ingotu (obr. 3), má za následek taktéž protažení oblasti s výskytem mikropórovitosti hlouběji do těla ingotu a snížení mikropórovitosti v horní části ingotu (obr. 4). Zvýšení licího kůlu má také za následek velmi malou změnu odmíšení prvků. Odmíšení uhlíku (obr. 5) a chromu 0 je větší u licí sestavy s vyšším licím kůlem.

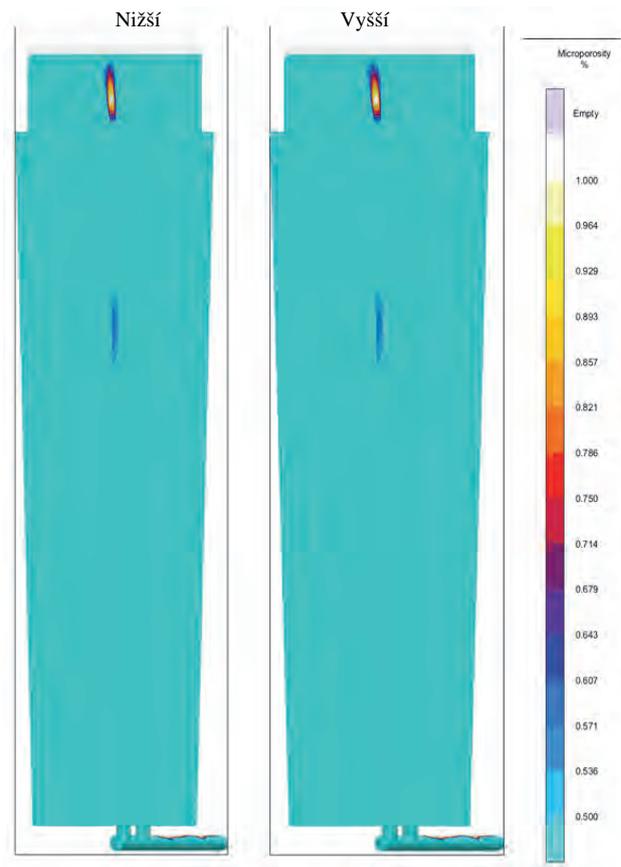
Numerická simulace odlévání taveniny do kokil přes vyšší licí kůl oproti odlévání přes nižší licí kůl má za následek mírné zvýšení teploty taveniny v kokile až k hlavovému nástavci, prodloužení doby tuhnutí o 2 min a 23 s, velmi mírné protažení oblasti s výskytem mikropórovitosti hlouběji do těla ingotu, naproti tomu velmi mírné zmenšení mikropórovitosti v horní části těla ingotu, mírné zvýšení segregace prvků C a Cr v dolní části ingotu.

Změna objemu s porozitou v těle ingotu se ukázala jako zásadní jakostní ukazatel při výrobě ingotů. Z toho důvodu se zkoumal vliv teploty a rychlosti odlévání na porozitu v ingotech odlévaných přes nižší a vyšší licí kůl.



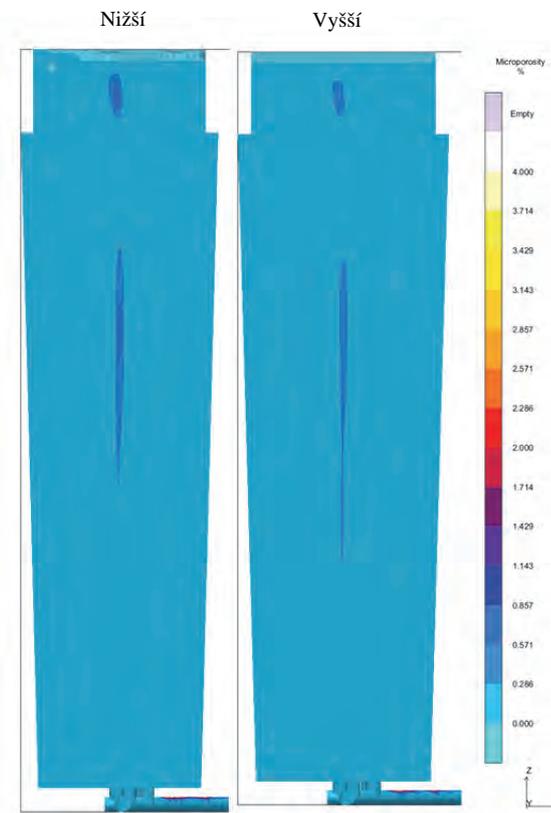
Obr. 3 Průběh doby tuhnutí ingotu z teploty lité na teplotu solidu, časový rozsah 20 – 9500 s

Fig. 3 The casting time of the ingot from the casting temperature to the solidus temperature, time range of 20 – 9,500 s



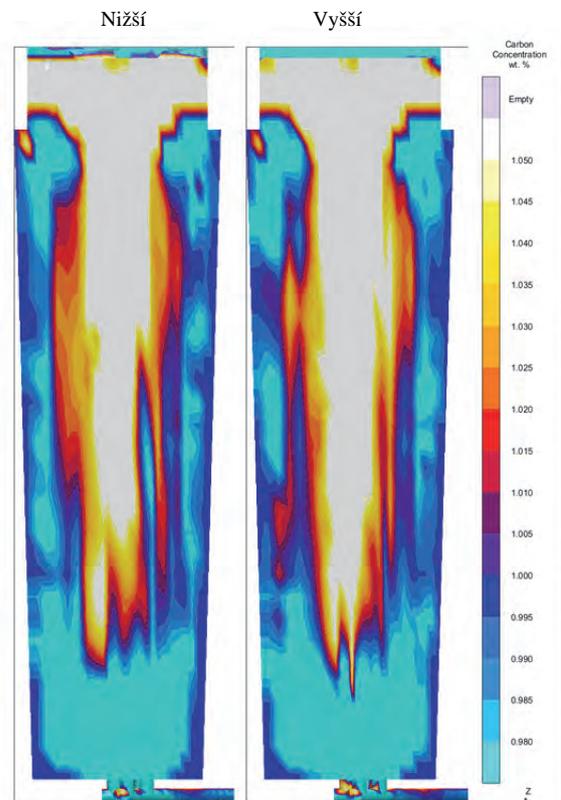
Obr. 5 Mikroporozita, rozsah 0,0 – 4,0 %

Fig. 5 Micro-porosity, range 0.0 – 4.0 %



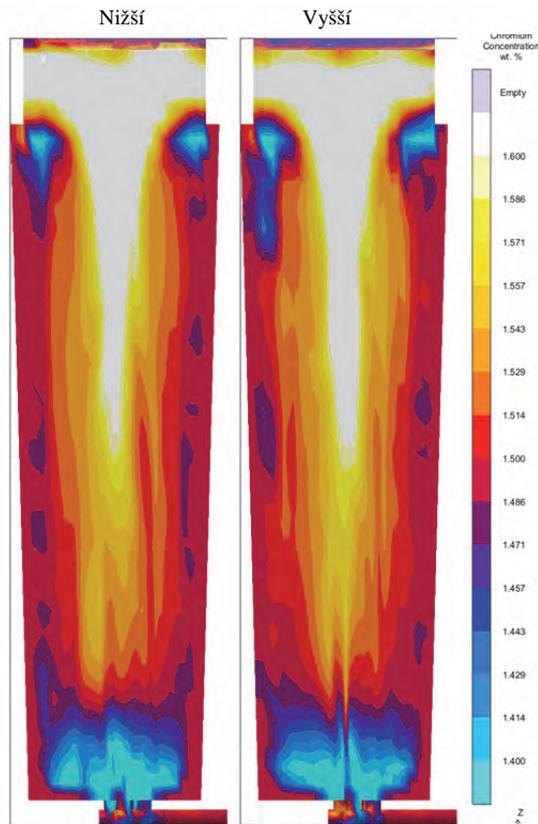
Obr. 4 Mikroporozita, rozsah 0,0 – 4,0 %

Fig. 4 Micro-porosity, range 0.0 – 4.0 %



Obr. 6 Distribuce uhlíku v utuhlém ingotu, rozsah obsahu C 0,98 – 1,05 hm. %

Fig. 6 Distribution of carbon in a solidified ingot, the range of carbon content 0.98 – 1.05 wt. %



Obr. 7 Distribuce chromu v utuřeném ingotu, rozsah obsahu Cr 1,4 – 1,6 hm. %
Fig. 7 Distribution of chromium in a solidified ingot, the range of chromium content 1.4 – 1.6 wt. %

2. Porovnání vlivu rychlosti a teplot odlévání

Pro porovnání vlivu zvýšení licího kůlu na porozitu ingotu byly provedeny stejné numerické simulace odlévání a tuhnutí ingotů jak pro nižší, tak i pro vyšší licí kůl s rozdílnými rychlostmi a teplotami odlévání.

Simulované rychlosti odlévání:

- těla $2,5 \text{ t} \cdot \text{min}^{-1} = 16,8 \text{ min}$ a hlavového nástavce $0,5 \text{ t} \cdot \text{min}^{-1} = 9,4 \text{ min}$, $\Sigma 26,2 \text{ min}$,
- těla $3,5 \text{ t} \cdot \text{min}^{-1} = 12,0 \text{ min}$ a hlavového nástavce $1,0 \text{ t} \cdot \text{min}^{-1} = 4,7 \text{ min}$, $\Sigma 16,7 \text{ min}$.

Simulované teploty odlévání:

- $1470 \text{ }^\circ\text{C}$,
- $1485 \text{ }^\circ\text{C}$.

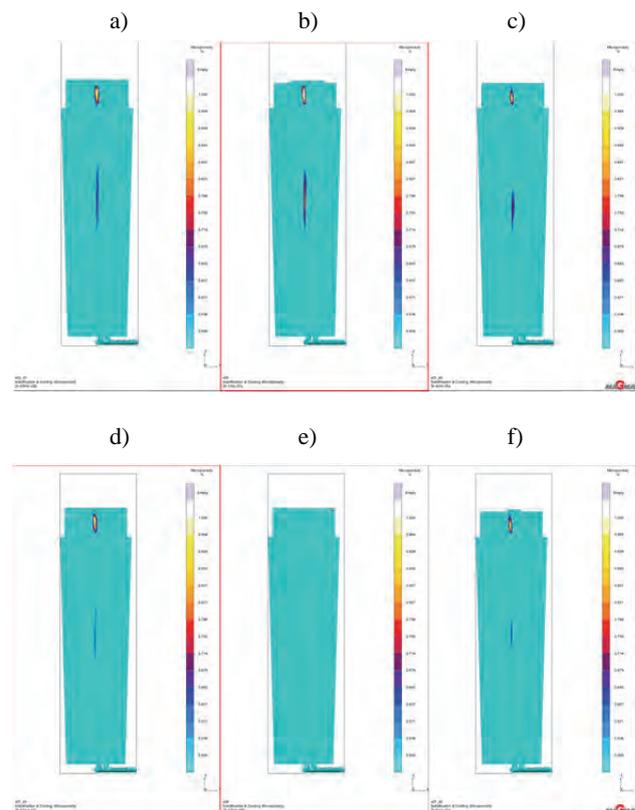
Hodnocené numerické simulace a jejich značení

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| a) Nižší_2,5/0,5_1470 | g) vyšší_2,5/0,5_1470 |
| b) Nižší_2,5/0,5_1485 | h) Vyšší_2,5/0,5_1485 |
| c) Nižší_2,5/0,5_1505 | i) Vyšší_2,5/0,5_1505 |
| d) Nižší_3,5/1_1470 | j) Vyšší_3,5/1_1470 |
| e) Nižší_3,5/1_1485 | k) Vyšší_3,5/1_1485 |
| f) Nižší_3,5/1_1505 | l) Vyšší_3,5/1_1505 |

Zde číslo před lomítkem značí rychlost odlévání těla ingotu, číslo za lomítkem značí rychlost odlévání hlavového nástavce a číslo za dolní pomlčkou značí teplotu tavy.

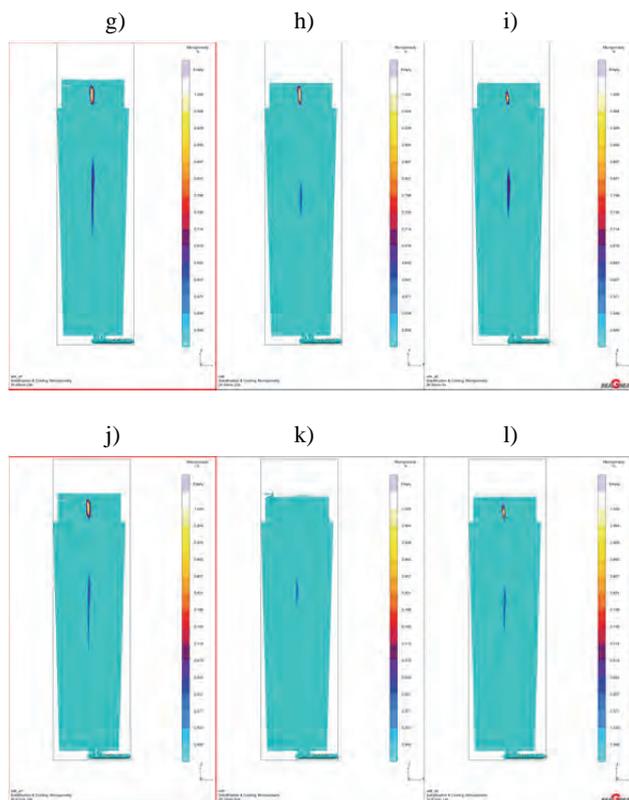
Celkem bylo provedeno a porovnáno 12 numerických simulací odlévání a tuhnutí ingotových sestav s osmi kokilami a s dvěma různými výškami licích kůlů. Rozbor numerických simulací je zaměřen pouze na vyhodnocení mikropórovitosti. Numerické simulace z pohledu mikropórovitosti v celkovém rozsahu 0,0 – 1,0 % vykazují jen velmi malé rozdíly. Při zobrazení pouze dolní meze porozity 0,0 – 0,5 % je porozita ve všech oblastech těla ingotu zhruba shodná, kdy při nízkých odlévacích teplotách je pro obě rychlosti a obě výšky licího kůlu protažena více k hlavě a k patě.

V numerických simulacích se hledala hranice, která jasně určila, jaká numerická simulace je z pohledu mikropórovitosti nejvhodnější. Postup vycházel ze srovnání numerických simulací, kdy se postupně rozšiřovaly zobrazované meze mikropórovitosti, a to od horní meze, např. od 0,8 – 1,0 % až k mezi 0,5 – 1,0 % (obr. 8 a 9). Z obou obrázků je jasně patrné, že mikropórovitost nad 0,5 % neobsahuje numerická simulace označená Nižší_2,5/0,5_1485.



Obr. 8. Mikropórovitost, rozsah 0,5 – 1,0 %, rychlost odlévání $2,5 \text{ t} \cdot \text{min}^{-1}$ tělo a $0,5 \text{ t} \cdot \text{min}^{-1}$ hlavový nástavec

Fig. 8 Micro-porosity, range 0.5 – 1.0 %, casting rate $2.5 \text{ t} \cdot \text{min}^{-1}$ for the body and $0.5 \text{ t} \cdot \text{min}^{-1}$ for the top of the ingot



Obr. 9 Mikropórovitost, rozsah 0,5-1,0 %, rychlost odlévání 3,5 t·min⁻¹ tělo a 1,0 t·min⁻¹ hlavový nástavec

Fig. 9 Micro-porosity, range 0.5 – 1.0 %, casting rate 3.5 t·min⁻¹ for the body and 1.0 t·min⁻¹ for the top of the ingot

O numerické simulaci Nižší_2,5/0,5_1485 s nižším licím kulem tedy platí, že z hlediska mikropórovitosti má nastavené ideální podmínky pro odlévání. Z obr. 8 a 9 lze vyčíst, že na druhém místě ve velikosti mikropórovitosti jsou opět numerické simulace s nižším licím kulem označené Nižší_2,5/0,5_1505 a Nižší_3,5/1_1485 a těsně za nimi na třetím místě je s nejmenší mikropórovostí licí sestava s vyšším licím kulem označená Vyšší_3,5/1_1485. Při porovnání provedených numerických simulací dosahuje nejnižší porozitu numerická simulace s nižším licím kulem Nižší_2,5/0,5_1485, ale na druhé straně nejhorší mikropórovitost vykazuje numerická simulace s vyšším licím kulem, označená Vyšší_2,5/05_1485, odlévaná při stejné rychlosti i teplotě odlévání.

Změna jednoho parametru (zde výška licího kúlu) vyžaduje také změnu dalších parametrů (rychlosti nebo teploty odlévání, příp. obou parametrů). Změna výšky licího kúlu má o hodně menší vliv na mikropórovitost, než rychlost či teplota odlévání, ale při striktním pohledu pouze na mikropórovitost v procesu odlévání hraje i tento parametr svou roli.

Z hodnocení numerické simulace pro vyšší licí kúlu jen z pohledu mikropórovitosti vyplývá, že nejmenší mikropórovitost udává numerická simulace označená Vyšší_3,5/1_1485 (obr. 8 a 9).

Závěr

V této práci jsou simulovány tzv. okrajové rychlosti a teploty odlévání pro určení vlivu změny výšky licího kúlu, teploty odlévání a rychlosti odlévání na mikropórovitost. K tomu bylo využito numerických simulací v softwaru Magma 5.

Nejnižšího obsahu porozity dosahuje numerická simulace s nižším licím kulem při rychlosti odlévání těla ingotu 2,5 t·min⁻¹ a hlavového nástavce 0,5 t·min⁻¹ a při teplotě tavby 1485 °C. Nejvyšší porozity dosáhla numerická simulace s vyšším licím kulem, a to při stejné rychlosti a teplotě odlévání. Při změně jednoho parametru (výšky licího kúlu), je tedy zapotřebí také změnit další parametry (rychlost nebo teplotu odlévání, příp. oba parametry). Změna výšky licího kúlu má přitom menší vliv na vnitřní jakost ingotu, než rychlost či teplota odlévání, ale při striktním pohledu pouze na mikropórovitost v procesu odlévání hraje i tento parametr svou roli.

Z hodnocení numerické simulace pro vyšší licí kúlu jen z pohledu mikropórovitosti vyplývá, že nejmenší mikropórovitost vykazuje numerická simulace označená Vyšší.

Poděkování

Tato práce vznikla při řešení projektu č. LO1203 "Regionální materiálově technologické výzkumné centrum - program udržitelnosti" financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

References

- [1] LIOTTI, E., PREVITALI, B. Study of the Validity of the Niyama Criteria Function Applied to the Alloy AlSi7Mg. *La metallurgia italiana*, 9 (2006), 33–37 [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.aimnet.it/allpdf/pdf_pubbli/9_06/Liotti.pdf
- [2] PINDOR, J., KURKA, V., KOSŇOVSKÁ, J., ŠTEFANIŠINOVÁ, Š., SOCHA, L., PYSZKO, R. Effect of Cooling of the Ingot on its Macro-structural and Chemical Heterogeneity. *Hutnické listy*, 70 (2017) 3, 47–57. ISSN 0018-8069.
- [3] KURKA, V., PINDOR, J., KOSŇOVSKÁ, J., ADOLF, Z. Increasing Micro-purity and Determining the Effects of the Production with and without Vacuum Refining on the Qualitative Parameters of Forged-steel Pieces with a High Aluminium Content. *Materials and technology*, 50 (2016) 3, 419–426. ISSN 1580-2949.
- [4] ŠMRHA, L. *Tuhnutí a krystalizace ocelových ingotů*, 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 308 s.
- [5] CHVOJKA, J. *Vady ingotů*, 1. vyd. Praha: SNTL, 1968, 256 s.