

Recenzované výzkumné články

Studium vnitřních necelistvostí a napět'ových stavů během odlévání a tuhnutí těžkého kruhového ocelového ingotu pomocí numerických simulací v softwaru Magma 5 a Forge NxT 2.1

Study of Internal Discontinuities and Stress States during Casting and Solidification of Heavy Circular Steel Ingot by Using Numerical Simulations in Magma 5 and Forge NxT 2.1 software

Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.; Mgr. Marek Vindyš; 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

V průběhu odlévání těžkých ocelových ingotů dochází při tuhnutí vlivem smrštění kovu ke vzniku vnitřní pórovitosti. Pórovitost, nebo-li místa nezaplňená kovem, uvnitř velkých ingotů nabývá rozměrů až několik centimetrů. Předkládaná práce se zabývá studiem fyzikálně-metalurgických parametrů odlévání těžkého kruhového ingotu, vedoucích k eliminaci pórovitosti. Toto studium bylo prováděno pomocí numerického softwaru Magma 5.4. Za účelem nalezení nejvhodnějších podmínek odlévání byla také částečně využita metoda plánovaného experimentu. Pozornost byla zaměřena především na ověření vlivu rychlosti a teploty odlévání na vnitřní kvalitu ingotu. Pro základní variantu modelovanou v softwaru Magma 5.4 bylo následně provedeno i počáteční šetření teplotního pole a napět'ového stavu v průběhu chlazení ingotu v numerickém softwaru Forge NxT 2.1.

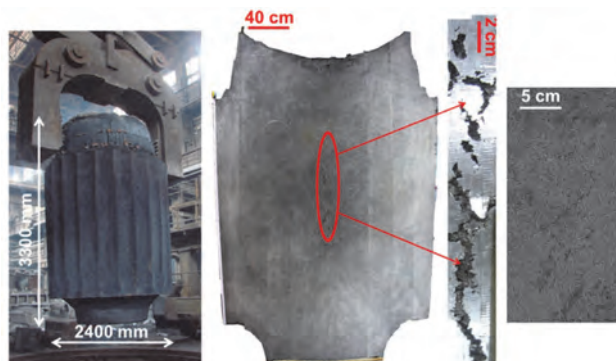
Klíčová slova: numerická simulace; odlévání oceli; tuhnutí oceli; software Magma

During the casting of heavy ingots, internal porosity occurs during solidification due to shrinkage of the cast metal. Porosity, or sites not filled with metal, are long up to several centimeters inside large ingots. The present work deals with the study of physical-metallurgical parameters of casting a large circular ingot, leading to an elimination of porosity. This was done using the numeric software Magma 5.4. In order to find the most suitable casting conditions, the planned experiment method was also partially used. The focus was on casting speed with the investigation and finding of the most suitable casting temperature. For the basic variant cast in the Magma software, an initial investigation of the temperature field and stress state during the ingot cooling in the numerical software Forge NxT 2.1 was performed. A total of 12 numerical simulations of casting and solidification of a round 12 t ingot were performed. From the point of view of reduction of microporosity, the most suitable numerical simulation, N.3, was chosen from the first 5 numerical simulations, at the selected casting temperature of 1520°C, which was the first proposed. A change in the casting speed of the ingot body than the head piece showed a greater effect on microporosity. To find out if it was really the best option, it was investigated around N.3 with a reduction and increase of casting speed in the ingot body by 10%. In this way it was found that at the same head casting speed it was preferable to cast the ingot by a 10% slower speed (version labelled T90H100.11) than the original design N.3. For this version of T90H100.11, the most suitable casting temperature was 1520°C. The initial investigation of the numerical simulation of the temperature field and the stress state in a cold ingot in Forge software suggests that these simulations are possible in Forge software. However, they require to enter simulation, calculation and evaluation. For this reason, the works at the time of writing this paper are in the development phase.

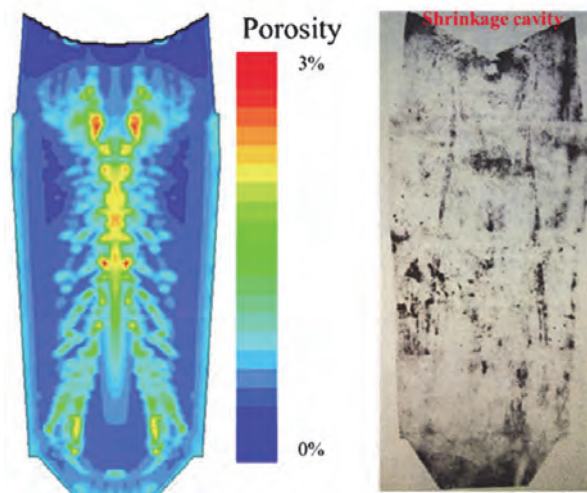
Key words: numerical simulation; casting of steel; solidification of steel; Magma software

Při odlévání těžkých ingotů, řádově nad 10 t, dochází vlivem smrštění materiálu ke vzniku vnitřní pórovitosti. Pórovitost, neboli místa nezaplňená kovem, uvnitř velkých ingotů nabývá rozměrů až několik centimetrů [1]

(obr. 1 a 2). Pórovitost je možné odstranit či eliminovat několika způsoby, a to zejména úpravou tvaru kokily, úpravou tvaru hlavového nástavce či jeho skladbou a případně rychlostí a teplotou odlévání.



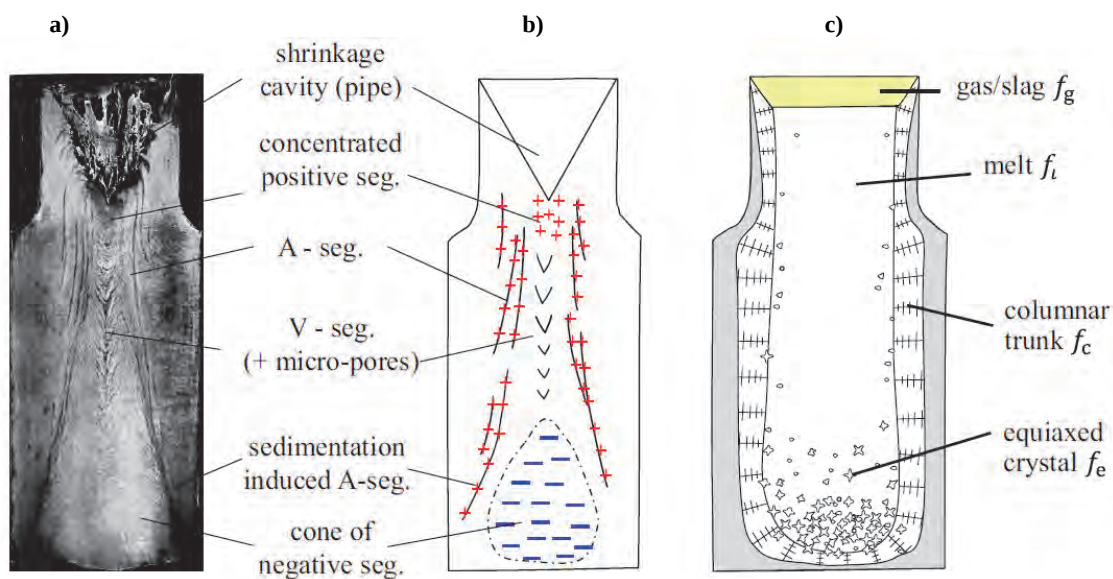
Obr. 1 Pórovitost uvnitř velkého kovárenského ingotu z oceli značky 30Cr2Ni4MoV [1]
Fig. 1 Porosity inside a heavy forging ingot made of steel grade 30Cr2Ni4MoV [1]



Obr. 2 Pórovitost uvnitř velkého kovárenského ingotu z oceli s 3,3 hm. % C [2]
Fig. 2 Porosity inside a large forging ingot made of steel with 3.3 wt. % C [2]

V ocelovém ingotu mohou vznikat tři typy pórovitosti. První typ představuje mikropórovitost (nebo též póry), která vzniká ve středové části ingotu v důsledku nedostatečného dosazování tekutého kovu z hlavového nástavce do těla ingotu. Druhým typem jsou dutiny. Jako makropórovitost je pak označován stav, kdy se dutiny

zvětšují snižujícím se ferostatickým tlakem způsobeným smrštěním a vznikají v interdendrickém prostoru [3 – 5] (obr. 3). Uvedené pórovitosti se autoři [6] snažili úspěšně řešit řízeným odvodem tepla, což je ovšem zcela jiný způsob řešení dané problematiky.



Obr. 3 Schéma finální makrostruktury ocelového ingotu o hmotnosti 10,5 tuny s nominálním složením 0,30 hm. % C s typickými projevy makrosegregace a smrštění zobrazené pomocí: a) Baumanova otisku síry, (b) schématického popisu různých typů makrosegregačních vad a pórovitosti, c) typů krystalů a fází v průběhu tuhnutí
Fig. 3 Scheme of solidification process and accompanying phenomena of macro segregation and shrinkage, steel ingot weighing 10.5 t with nominal composition 0.30 wt. % C. a) Bauman's sulfur impression, b) schematic description of different types of macrosegregation and shrinkage defects, c) solidification process diagram and formation of appropriate phases

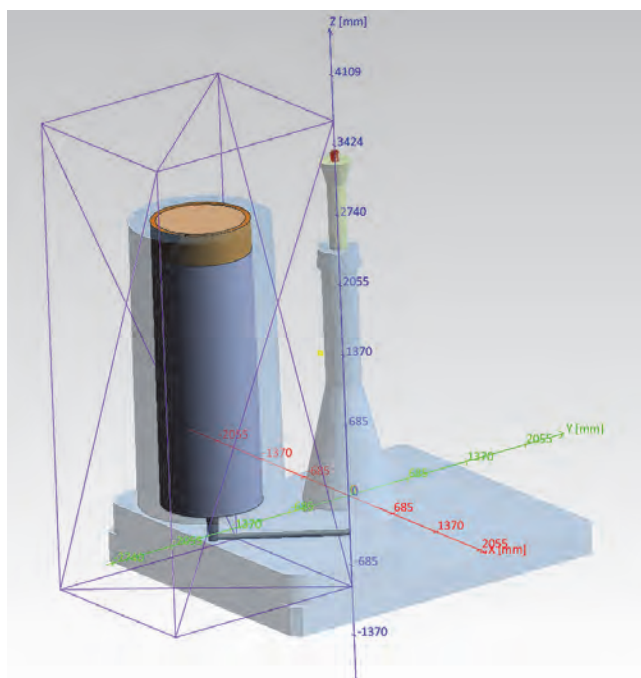
1. Studium odlévání

Byl proveden rozbor odlévání kruhového ingotu typu A o hmotnosti 12 t, s obsahem 1 % C, 0,8 % Mn a 0,4 % C

s teplotou solidu 1326 °C a likvidu 1488 °C, v numerickém softwaru Magma. Numerické šetření bylo prováděno na lící sestavě se 4 ingoty, kde hmotnost každého ingotu byla 12 tun. Simulace byly prováděny pro ¼ lící

sestavy, tedy jednoho ingotu (obr. 4). Na geometrii lící sestavy ingotu byla následně vytvořena výpočetní síť tvořená hexaelementy (obr. 5). Výpočet odlévání a tuh-

nutí ocelového ingotu byl numericky řešen metodou konečných diferencí. Na obr. 6 je zachycena vypočítaná porozita pro jednotlivé simulované varianty.



Obr. 4 Geometrie lící sestavy kruhového 12 tunového ocelového ingotu podrobeného numerické simulaci

Fig. 4 The geometric shape of the ingot, which was subsequently subjected to numerical simulation



Obr. 5 Výpočetní síť modelované geometrie kruhového těžkého kovářského ingotu

Fig. 5 An ingot converted to elements that were subsequently numerically simulated

Jako první byl analyzován vliv rychlosti odlévání na výslednou pórovitost. Následně byla zvolena nejvhodnější rychlost odlévání, pro kterou byla nalezena nejvhodnější teplota odlévání. Nejprve byla navržena teplota odlévání 1520 °C a zvolena základní doba odlévání. Numerická simulace provedená tímto způsobem byla proto základní a označená jako N.3.

Tab. 1 Označení variant a velikost jejich změn rychlosti odlévání oproti základní variantě N.3

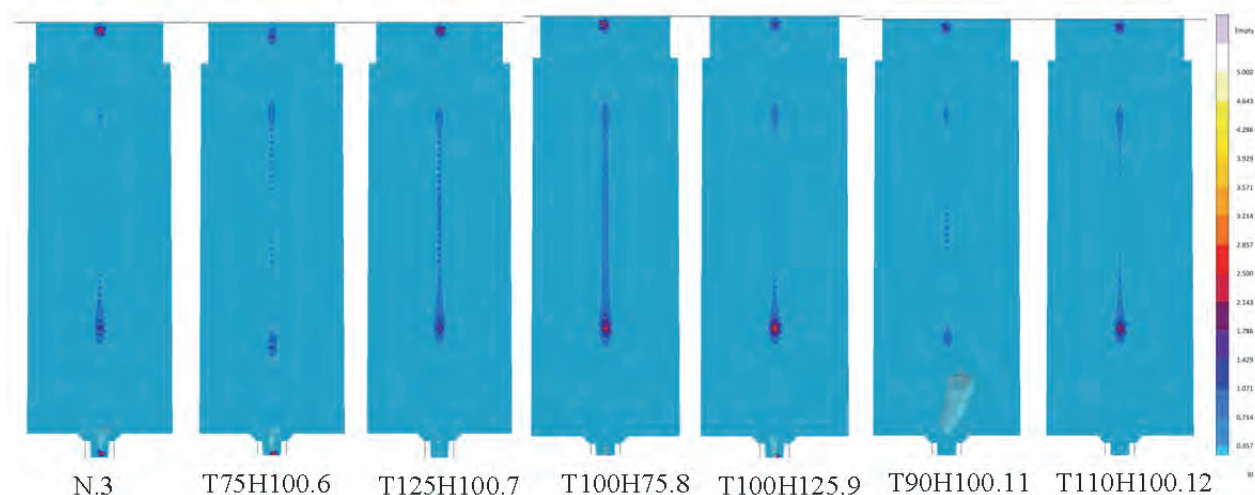
Table 1 Indication of variation and magnitude of their variation in casting speed of rapid basic variation N.3

Označení varianty	Změna rychlosti liti oproti variantě N.3	
	těla ingotu	hlavového nástavce
N.3	0 %	0 %
T75H100.6	- 25 %	0 %
T125H100.7	+ 25 %	0 %
T100H75.8	0 %	- 25 %
T100H125.9	0 %	+ 25 %

Po provedení numerické simulace N.3 následovala šetření odchylující se od této varianty změnou rychlosti odlévání těla ingotu a hlavového nástavce, viz tab. 1.

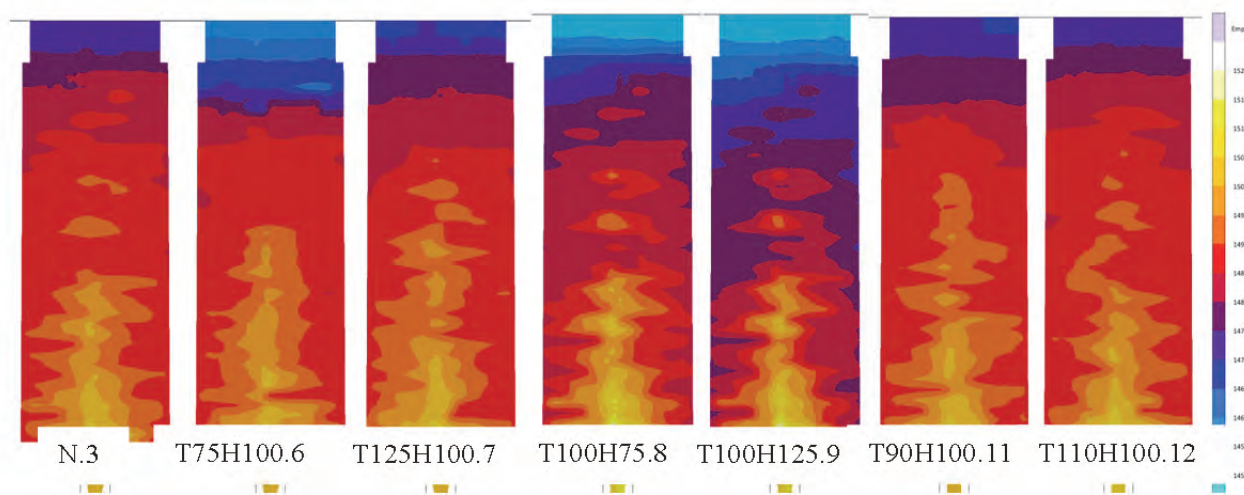
Z provedených numerických simulací vyplynulo, že varianta N.3 má nejnižší mikropórovitost. Varianta s 25 % snížením rychlosti odlévání těla ingotu označená T75H100 se z pohledu hodnocení mikroporozity umístila na druhém místě, viz obr. 6. Obr. 7 ukazuje, že obě varianty mají také nejvyšší teplotu při prvním zaplnění prostoru v kokile. Z provedených simulací se z obr. 6 a 7 může vyvodit, že velký vliv na mikropórovitost při stejné lící teplotě má změna rychlosti odlévání těla ingotu. Pro nalezenou variantu s nejnižší pórovitostí, označenou N.3, bylo provedeno další šetření zahrnující provedení dvou numerických simulací se změnou rychlosti odlévání těla ingotu, která se od varianty N.3 lišila následovně:

- T90H100.11 – tělo lité o 10 % pomaleji a hlavový nástavec odléván stejnou rychlostí
- T110H100.12 – tělo lité o 10 % rychleji a hlavový nástavec odléván stejnou rychlostí.



Obr. 6 Mikropórovitosť v ingotu po utužnutí, objemové rozmezí 0 – 5 %

Fig. 6 Microporosity in ingot after solidification, volume range 0 – 5%



Obr. 7 Teplota taveniny při prvním vstupu do daného místa, teplotní rozmezí 1450 – 1520 °C

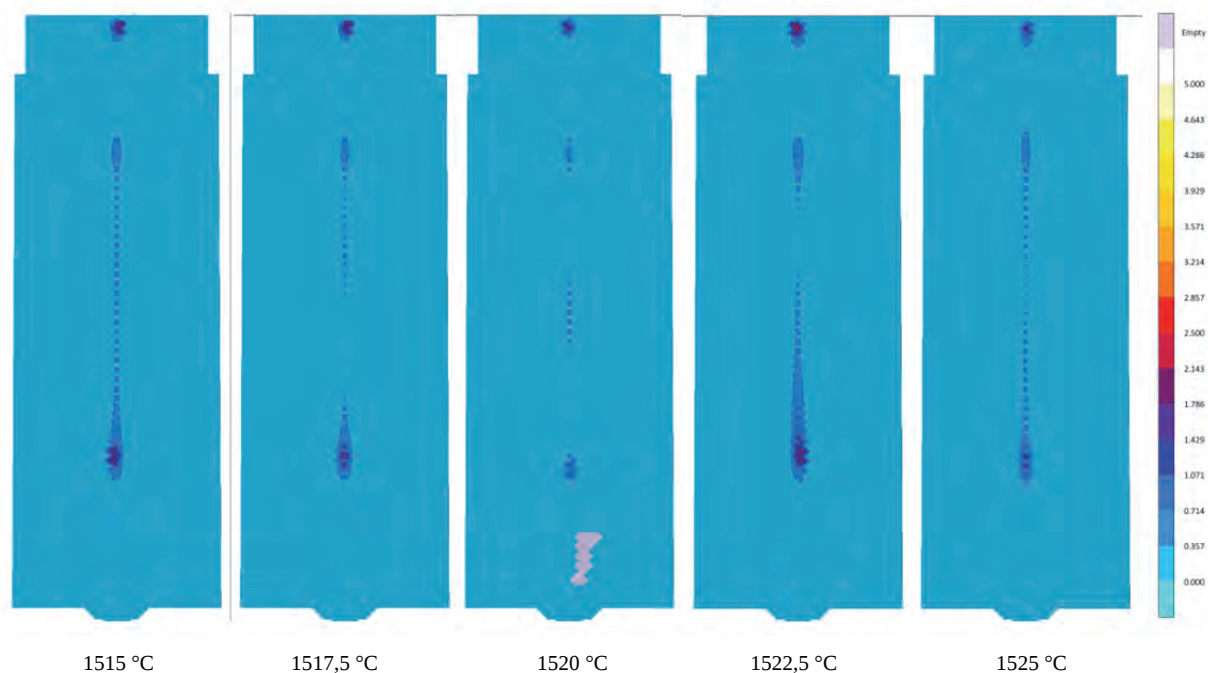
Fig. 7 Melt temperature at the first entry to the given site, temperature range 1450 – 1520°C

Výše uvedené numerické simulace byly podrobeny zkoumání a porovnání s výsledky numerické simulace N.3. Na základě hodnocení mikropórovitosti vychází nejlépe numerická simulace označená T90H100.11. Pro podmínky odlévání uvedené v numerické simulaci T90H100.11 byla hledána nejvhodnější teplota odlévání v rozmezí 1515 – 1525 °C, a to při stejné rychlosti odlévání.

Výsledky provedených numerických simulací byly v této práci vyhodnoceny především s ohledem na

mikropórovitosť pro verzi T90H100.11 u lících teplot 1515 – 1525 °C (obr. 8).

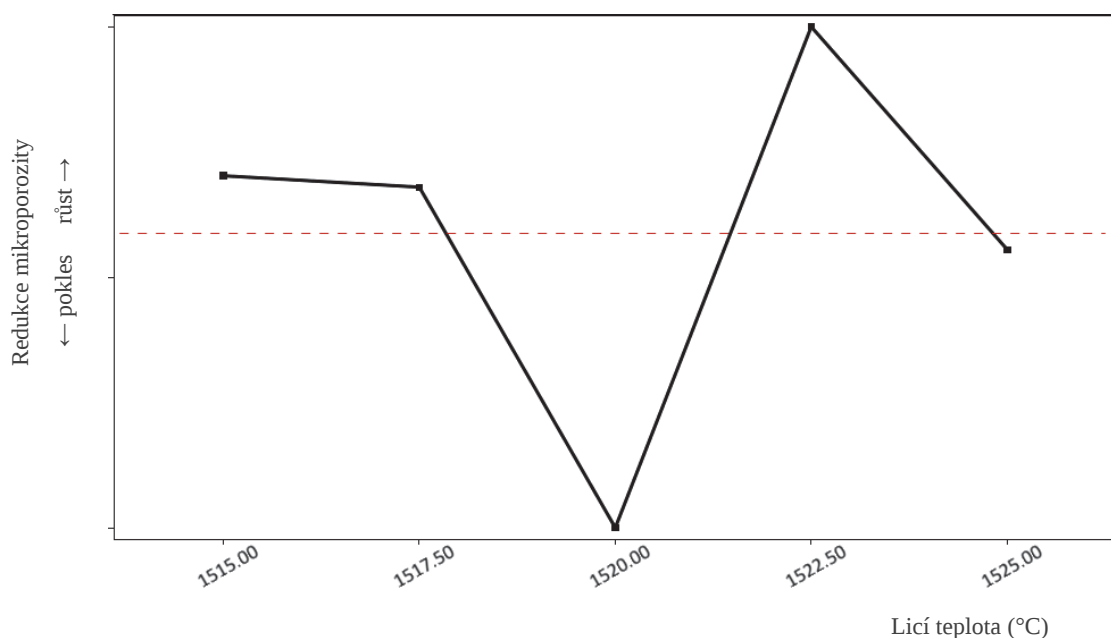
Z mikropórovitosti na obr. 8 vyplývá, že nejvhodnější lící teplota je 1520 °C, neboť vykazuje nejvyšší podíl mikropórovitosti uvnitř těla ingotu. Toto zjištění potvrzuje také vyhodnocení numerických simulací pomocí softwaru Magma, kde je na obr. 9 patrné, že snížení mikropórovitosti je nejvyšší u teploty 1520 °C. Dále byly numerické simulace hodnoceny podle průběhu doby tuhnutí.



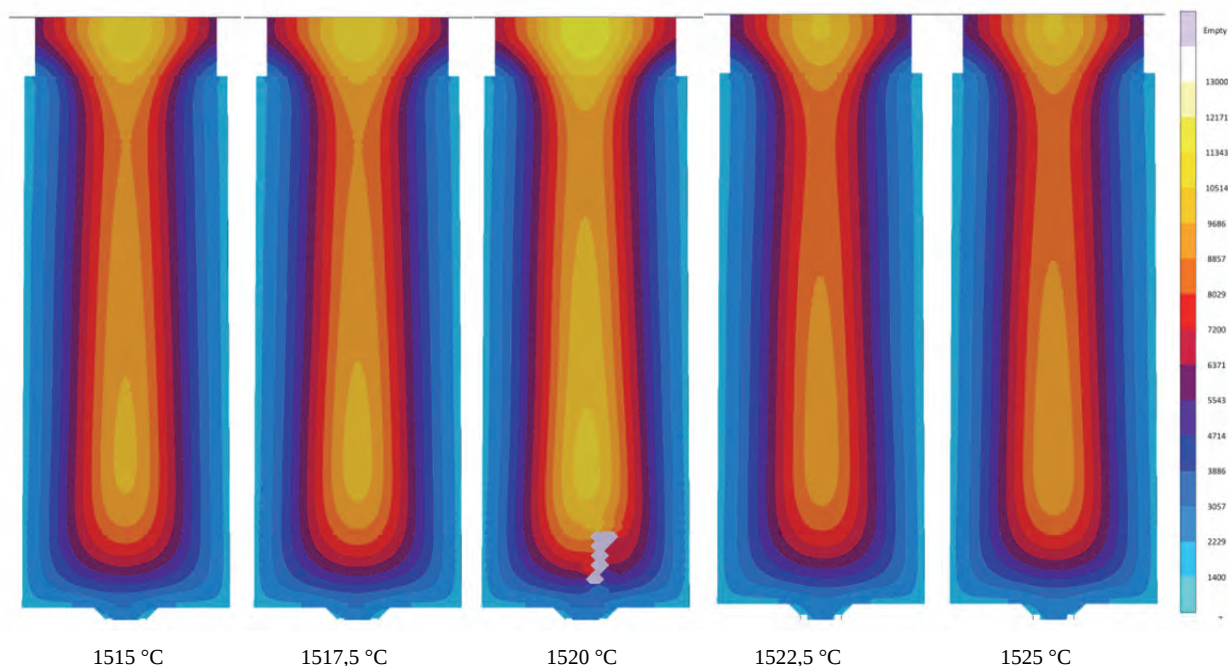
Obr. 8 Mikropórovitost v ingotech podle numerické simulace T90H100.11 s licími teplotami 1515 – 1525 °C, objemové rozmezí 0 – 5 %
Fig. 8 Microporosity in T90H100.11 numerical simulation ingots with casting temperatures 1515 – 1525°C, volume range 0 – 5 %

Z obrázku 10 je patrné, že z hodnocených numerických simulací je, při licí teplotě 1520 °C, nejnižší gradient teplotního pole mezi tělem ingotu a hlavovým nástavcem. Tato skutečnost poukazuje na možnost maximálního

dosazování tekutého kovu z hlavového nástavce a také, že v ingotu se nebude vyskytovat mikropórovitost v tak vysoké míře jako u ostatních ingotů.



Obr. 9 Vliv licí teploty na velikost pórovitosti pro variantu T90H100.11 s licími teplotami 1515 – 1525 °C
Fig. 9 Effect of casting temperature on the range of porosity for the variant T90H100.11 with casting temperatures 1515 – 1525°C



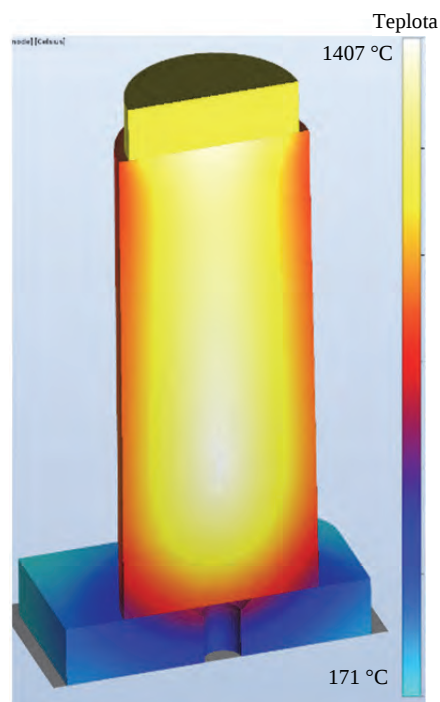
Obr. 10 Průběh doby tuhnutí v jednotlivých částech ingotu pro variantu T90H100.11 s lícími teplotami 1515 – 1525 °C, rozmezí doby lití 1400 – 13 000 s

Fig. 10 Solidification time in individual parts of ingot for the variant T90H100.11 with casting temperatures 1515 – 1525 °C, range of casting time 1400-13000 s

2. Studium tuhnutí

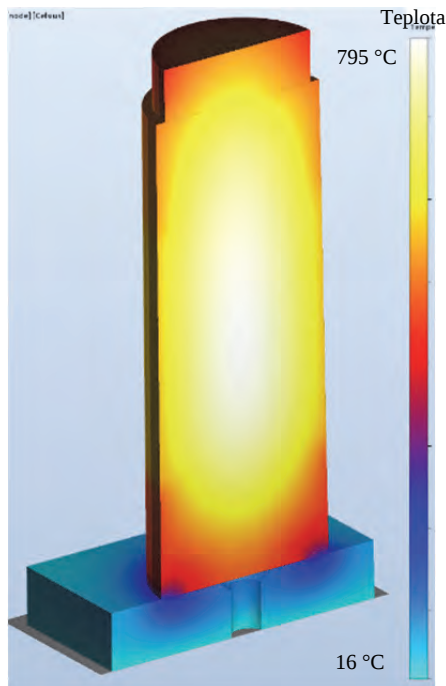
Současně s prováděním numerické simulace odlévání a tuhnutí v software Magma 5.4, bylo prováděno počáteční šetření teplotního pole a napětového stavu v průběhu chlazení ingotu v numerickém software Forge NxT 2.1. Šetření teplotního pole a napětového stavu bylo prováděno ve verzi N.3. Teplotní pole a sestava skládající se z ingotu, hlavového nástavce a lící podložky, určená pro simulaci, byla importována ze softwaru Magma ihned po utuhnutí celého ingotu, tedy po zchlazení celého ingotu na teplotu solidu. Nepřenesené součásti a součásti ze softwaru Magma (kokila, lící deska, hlavový nástavec s exotermickou vložkou a lícím práškem) byly definovány pomocí okrajových podmínek popisujících tepelný tok z ingotu do okolních prvků (kokily) a prostředí a dále pomocí okrajových podmínek zahrnujících gravitaci, tření a roztažnost.

Obrázek 11 prezentuje počáteční teplotní pole ingotu a lící podložky pro variantu N.3 v rozsahu teplot odlévání 171 – 1407 °C. Hlavový nástavec měl na počátku chlazení homogenní teplotní pole a teplota se pohybovala okolo hodnoty 1100 °C z důvodu porušení geometrie a to změnou velikosti hlavového nástavce úbytkem kovu, vlivem tuhnutí v softwaru Magma, které bylo v software Forge vyřešeno. Definování okrajových podmínek nahrazujících součásti kokilové sestavy si vyžádalo delší čas z důvodu naladění software Forge.



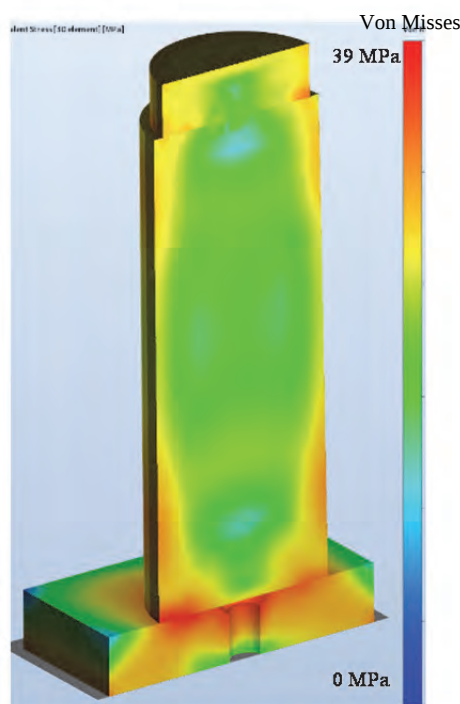
Obr. 11 Počáteční teplotní pole ingotu a lící podložky, varianta N.3, rozsah teplot 171 – 1407 °C

Fig. 11 Initial temperature field of the ingot and casting pad, version N.3, the range of temperature 171 – 1407 °C



Obr. 12 Teplotní pole ingotu a lící podložky po 5 hodinách chlazení, varianta N.3, rozsah teplot 16 – 795 °C

Fig. 12 Temperature field of ingot and casting pad after 5 hours of cooling, version N.3, the range of temperature 16 – 795 °C



Obr. 13 Rozložení efektivního napětí (von Mises) ingotu a lící podložky po 5 hodinách chlazení, varianta N.3, rozsah hydrostatického tlaku v logaritmické stupnici 0 – 39 MPa

Fig. 13 Effective stress distribution (von Mises) in the ingot and casting pad after 5 hours of cooling, version N.3, the range of hydrostatic pressure in logarithmic scale 0 – 39 MPa

Rozložení teplotního pole v ingotu po době 5 h v teplotním rozsahu 16 – 795 °C prezentuje obr. 12, ze kterého je patrné, že nejteplejší část ingotu v průběhu

tuhnutí je v jeho střední části. Pro stejnou dobu 5 h po utuhnutí je na obr. 13 zobrazeno rozložení efektivního napětí (von Mises), které charakterizuje intenzitu napětí. Z obr. 13 je patrné, že největší napětí v ingotu je v jeho povrchové vrstvě v patní části a těsně pod hlavovým nástavcem. Nejnižší napětí v ingotu se nachází v ose ingotu v patní části a těsně pod hlavovým nástavcem.

Závěr

Článek předkládá základní poznatky z oblasti odlévání těžkého kruhového ingotu získané pomocí numerického modelování v softwaru Magma 5.4. Pro plánování experimentálních prací a vyhodnocování výsledků byla využita metoda plánovaného experimentu. Pro základní variantu N.3 modelovanou v softwaru Magma 5.4 bylo provedeno i počáteční šetření teplotního pole a napětového stavu v průběhu chlazení ingotu v numerickém softwaru Forge NxT 2.1.

Celkem bylo provedeno 12 numerických simulací odlévání a tuhnutí kruhového ingotu o hmotnosti 12 t. Pro snížení mikroporovitosti byla z prvních 5 numerických simulací při zvolené teplotě odlévání 1520 °C, vybrána nejvhodnější numerická simulace označená N.3, což je prvotní navržená varianta. Prokázalo se, že větší vliv na mikroporovitost má změna rychlosti odlévání v těle ingotu než v hlavovém nástavci. Na základě tohoto zjištění bylo provedeno druhé šetření se dvěma dalšími numerickými simulacemi se zjištěním vlivu 10 % snížení a 10 % zvýšení lící rychlosti na mikroporovitost v těle ingotu. Z něj vyplynulo, že při stejné rychlosti lití hlavového nástavce je výhodnější odlévat tělo ingotu o 10 % pomaleji (varianta označená T90H100.11), než byl původní návrh N.3. Pro tuto variantu T90H100.11 byla stanovena nejvhodnější lící teplota, která činí 1520 °C.

Z provedeného prvotního šetření numerické simulace teplotního pole a napětového stavu v chladnoucím ingotu vyplývá, že v softwaru Forge jsou tyto simulace realizovatelné. Jsou ovšem náročné na specifikaci zadávacích podmínek, výpočet a vyhodnocení. Z primárních výsledků vyplývá, že během tuhnutí vzniká napětí zejména ve středu těla ingotu. Protože se jednalo o první numerické simulace s cílem prověření možností výpočtu napětových stavů na základě transferu teplotního pole z výpočtu tuhnutí v SW Magma, bude problematice nastavení okrajových a počátečních podmínek výpočtu v SW Forge věnována další pozornost

Poděkování

Tento článek byl vytvořen díky projektu č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008399 "Rozvoj mezisektorové spolupráce RMTVC s aplikační sférou v oblasti výzkumu progresivních a inovací klasických kovových materiálů a technologií s využitím metod modelování" z finančních fondů EU a ČR poskytovaných "Operačním programem Výzkum, vývoj a vzdělávání, Výzvy 02_17_049 Dlouhodobá mezisektorová spolupráce pro ITI, řídicí orgán: Česká republika – Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy".