Hutnické listy č. 3/2016, roč. LXIX
ISSN 0018-8069

Recenzované výzkumné články

Vývoj technologie výroby oceli pro energetický průmysl

Development of Technology of Steel Production for the Power Industry

Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.; **Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D.**

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

Práce prezentuje ocelárenský výzkum, jeho možnosti výzkumu, vývoje a následně také výroby a metalurgické agregáty, na kterých společnost MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. provádí jak experimentální tavby, tak i výrobu komerčních zakázek či komerčních výzkumů. Příspěvek prezentuje návrh technologie výroby materiálu pro energetický průmysl pomocí numerického software Magma 5 pro odlévání a tuhnutí kovových materiálů. Následně je technologie ověřována a modifikována na poloprovozním zařízení Vakuová a přetlaková indukční tavící pec, včetně fáze odlévání oceli do kokilové sestavy.

Klíčová slova: *numerická simulace; energetika; odlévání a tuhnutí; segregace; technologie výroby*

The paper presents steelmaking research, its potential for research, development and, consequently, production and metallurgical units, for which the Company MATERIAL AND METALLURGICAL RESEARCH Ltd. performs experimental heats and research based on commercial contracts. The paper also presents design technology using numerical software Magma 5 for casting and solidification of materials for the power industry. Consequently, this technology is verified and modified on the metallurgical unit using vacuum and pressurized induction melting furnace with subsequent verification of the casting into an ingot-mould. On the basis of experiments it seems the best to manufacture the material by the refining process VOD - Vacuum Oxygen Decarburization at atmospheric pressure and then under the pressure of 10 kPa. This is followed by casting into ingot-mould set of the type OK075. Modification of the technology continues to reduce primarily the N content to the required level.

Key words: *numerical simulation; engineering industry; casting and solidification; segregation; production technology*

Práce prezentuje vývoj technologie výroby oceli pro energetický průmysl.

Útvar Ocelárenský výzkum, společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM, s.r.o. (MMV) se zabývá výzkumem a vývojem v oblasti:

- návrhů a ověření technologií výroby vysoce jakostních materiálů,
- metalurgie tavení, rafinace a odlévání kovových materiálů v podmínkách atmosférických, ve vakuu nebo s přetlakem argonu či dusíku,
- technologie odstranění plynů (vodík, kyslík) a nadusičení na vysoké obsahy u různých typů tavenin,
- metalurgických pochodů na zařízeních primární a sekundární metalurgie, zahrnujících také elektrostruskové přetavování,
- odlévání a krystalizace v numerickém software Magma 5.

Na základě navržených technologií se v poloprovozních podmínkách společnosti MMV odlévají ingoty a dle požadavků zákazníků se tyto ingoty externě zpracovávají do podoby výkovků. Kovové taveniny se odlévají do kokil kovárenských, kruhových, bramových, dále se dolévají předlitky pro válcování a pro elektrostruskové přetavování (ESP). Kokové taveniny se také odlévají do jednoduchých pískových forem vyrobených v MMV či složitých forem dodaných zákazníkem. Tyto práce společnosti MMV se zaměřují na nízko, středně a vysoce legované oceli, nízko až vysoce legované litiny, popř. o jiné kovové materiály podle přání zákazníka.

Pro výzkum, vývoj a výrobu útvar Ocelárenský výzkum využívá tyto metalurgické agregáty s uvedenou nominální hmotností vsázky:

- vakuová a přetlaková indukční tavicí pec 1 750 kg (VPIM),
- numerický software Magma 5 pro odlévání a tuhnutí,
- atmosférické indukční tavicí pece 1 750, 350, a 40 kg,
- vakuová indukční tavicí pec 1,5 kg s možností mikrovlnného ohřevu strusky,
- elektrostruskové přetavování oceli 2 000 kg.

Definice zkoumaného problému

Návrh výroby materiálů pro energetický průmysl začíná návrhem chemického složení, od něhož se po výrobě očekávají žádané mechanické, strukturní a creepové vlastnosti. Chemické složení zkoumaného materiálu (dále jen materiálu) je uvedeno v tab. 1. Z ní je patrný velmi úzký rozsah v obsahu prvků a také velmi nízký obsah dusíku a křemíku, což je požadováno u materiálů pro náročné energetické díly.

Tato práce popisuje návrh technologie výroby materiálu pro energetický průmysl v podmínkách společnosti MMV.

K tomuto společnost MMV využívá software Magma 5 pro numerickou simulaci odlévání a tuhnutí (dále jen Magma 5). Pomocí tohoto software byla na podmínky MMV navržena a následně také prakticky ověřena technologie výroby.

Tab. 1 Chemické složení materiálu, dle požadavku, pro výrobu a pro Magma 5 (hm. %)
Tab. 1 Chemical composition of the material as required, for the manufacture and for Magma 5 (wt.%)

		C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Co	Ni	B	N	Ti	V	Nb
Požadavek	**min**	0,13	0,05	0,05	11,00	0,6	1,9	3	0,12	0,008	-	0,016	0,07	0,05
	max	0,15	0,07	0,15	12,00	0,8	2,1	4	0,22	0,009	0,005	0,018	0,17	0,06
Požadované hodnoty pro výrobu		0,14	0,06	0,10	11,50	0,7	2,0	3,5	0,17	0,0085	0,0045	0,019	0,12	0,055
Výpočtové hodnoty podle Magma 5		0,14	0,06	0,10	11,50	0,7	2,0	3,5	0,17	-	-	0,017	0,12	-

Numerická simulace odlévání oceli do kokily

Pro potřeby návrhu technologie výroby pomocí Magma 5, bylo provedeno generování materiálu o chemickém složení uvedeném v tab. 2, a to pomocí software JMatPro, který počítá se širokou škálou vlastností materiálů: stabilní a metastabilní fázová rovnováha, fyzikálně-metalurgické děje v materiálu při tuhnutí, mechanické vlastnosti materiálu, thermo-fyzikální a fyzikální vlastnosti, fázové přeměny a chemické vlastnosti.

Vzhledem k době odlévání 240 s pro jeden ingot v zařízení VPIM ve společnosti MMV je možno korigovat pouze teplotu lití. Z důvodu malé hmotnosti taveniny ve VPIM se tyto materiály odlévají vysoko nad teplotu likvidu. Byly provedeny čtyři varianty numerické simulace odlévání a tuhnutí s licími teplotami d1 při teplotě 1 500 °C, d2 při teplotě 1 550 °C, d3 při teplotě 1 600 °C a d4 při teplotě 1 650 °C. Varianty byly vyhodnoceny s ohledem na vliv teploty lití na kvalitativní parametry odlitého ingotu.

V tab. 2 jsou porovnány čtyři varianty simulace s rozdílnými teplotami odlévání ve vztahu k rychlosti tuhnutí: je ukázán podíl tuhé fáze vznikající průběžném čase od počátku lití. U varianty s nižší teplotou odlévání vzniká srovnávaný podíl tuhé fáze dříve než oproti variantám s vyšší teplotou odlévání. Časy mezi jednotlivými verzemi se při vzniklém podílu tuhé fáze 10 % liší až o 99 s a při podílu tuhé fáze 95 % až o 316 s. Snížením teploty odlévání o 150 °C se zrychlí doba tuhnutí o 5,2 minut, což je zkrácení z celkové doby tuhnutí (při teplotě 1 500 °C a době lití 4 270 s) o cca 7,4 %.

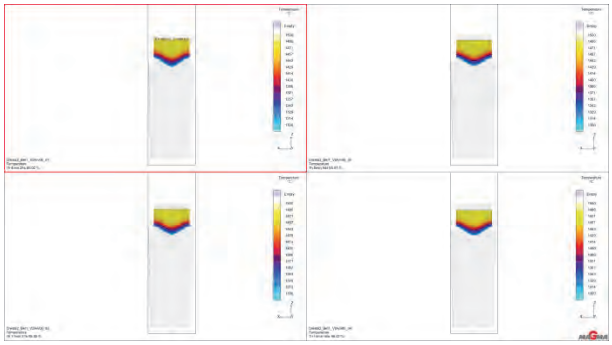
Tab. 2 Podíl tuhé fáze pro jednotlivé teploty odlévání a doby lití
Tab. 2 The proportion of the solid phase for each casting temperature and the time of casting

	Jednotky	**Podíl tuhé fáze**	**Čas od počátku lití pro jednotlivé verze licích teplot (s)**			
			d1	**d2**	**d3**	**d4**
Podíl tuhé fáze v jednotlivých verzích licích teplot v závislosti na čase	(%)	10	249	269	300	348
		20	288	331	362	411
		30	368	425	455	517
		40	488	550	591	658
		50	644	707	753	836
		60	839	905	963	1 051
		70	1 090	1 163	1 225	1 325
		80	1 429	1 508	1 575	1 689
		90	1 929	2 010	2 090	2 208
		95	2 298	2 385	2 468	2 614
		100	4 270	4 456	4 697	5 033
Teplota likvidu	(°C)		1 483			
Teplota lití			1 500	1 550	1 600	1 650
Doba lití celého ingotu	(s)		240			

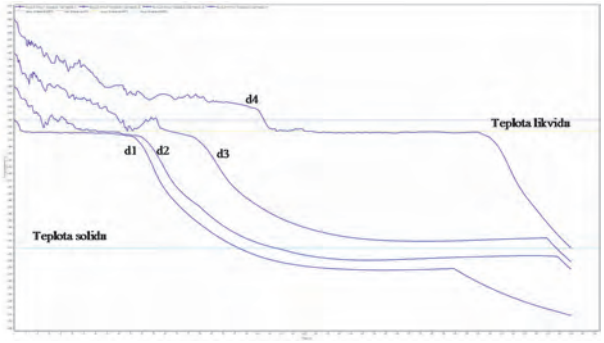
Hutnické listy č. 3/2016, roč. LXIX
ISSN 0018-8069

Jak je patrné z obr. 1, doby tuhnutí ingotu jsou ovlivněny tuhnutím taveniny v hlavovém nástavci. Snížení licí teploty snižuje i minimální a střední teplotu v litém materiálu (obr. 2 a 3) a s malými rozdíly také teplotu při tuhnutí (obr. 4 a 5).

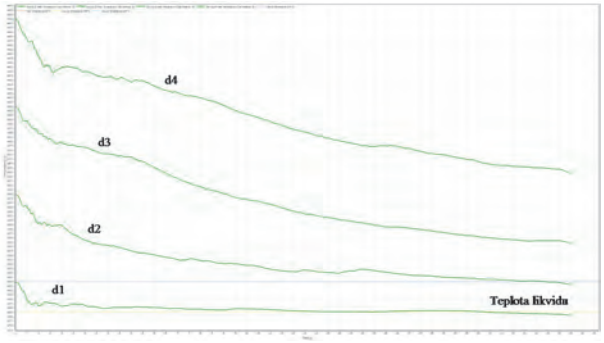
Ukazuje se zákonitý trend, že se ve sníženém rozsahu Niyamova kritéria při zvolené době lití 240 s snižuje hodnota tohoto kritéria při vyšší teplotě lití (obr. 6). To dokládá i nižší výskyt mikroporezity (obr. 7) a také vyšší rychlost chladnutí (obr. 8).



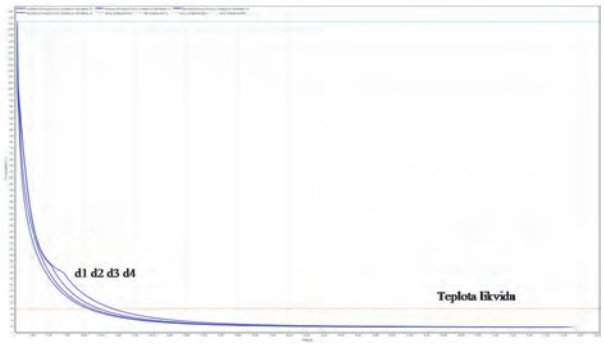
Obr. 1 Teplotní pole, oblast taveniny s teplotou nad teplotou solidu při podílu tuhé fáze 95 %
Fig. 1 Temperature field, area of the melt with the temperature above the solidus temperature at a proportion of solids of 95 %



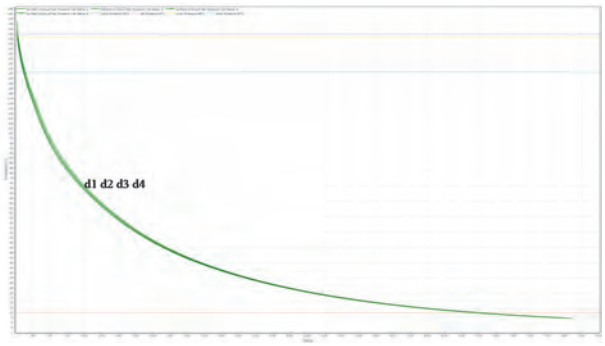
Obr. 2 Průběh minimálních teplot během odlévání u všech čtyř variant numerické simulace
Fig. 2 Evolution of the maximum temperatures during casting in all four variants of numerical simulations



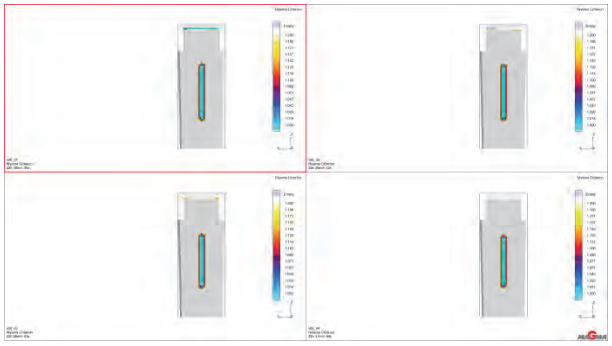
Obr. 3 Průběh středních teplot během odlévání u všech čtyř variant numerické simulace
Fig. 3 Evolution of the medium temperatures during casting in all four variants of numerical simulations



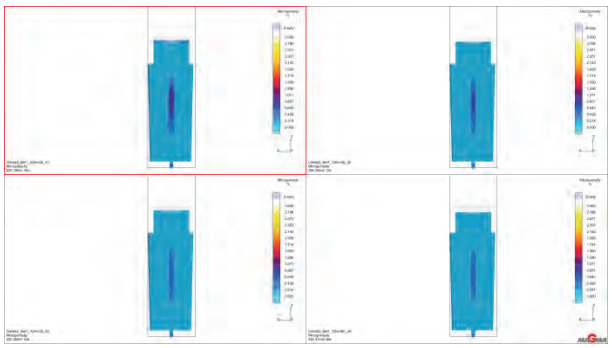
Obr. 4 Průběh minimálních teplot v ingotu během tuhnutí u všech čtyř variant numerické simulace
Fig. 4 Evolution of the maximum temperatures during ingot solidification for all four variants of numerical simulation



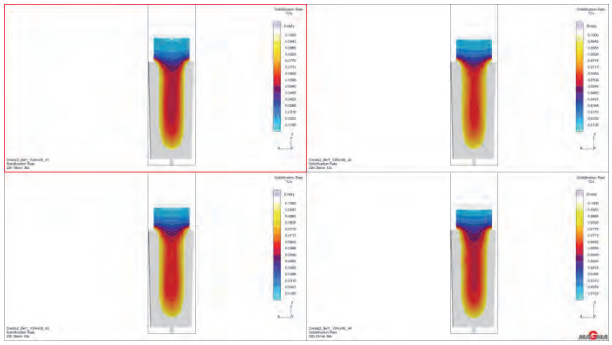
Obr. 5 Průběh středních teplot v ingotu během tuhnutí u všech čtyř variant numerické simulace
Fig 5 Evolution of the medium temperatures in the ingot during solidification for all four variants of numerical simulation



Obr. 6 Niyamovo kritérium v utuhlém ingotu s rozsahem 1,0 – 1,2
Fig. 6 Niyama criterion in the solidified ingot with a range from 1.0 to 1.2



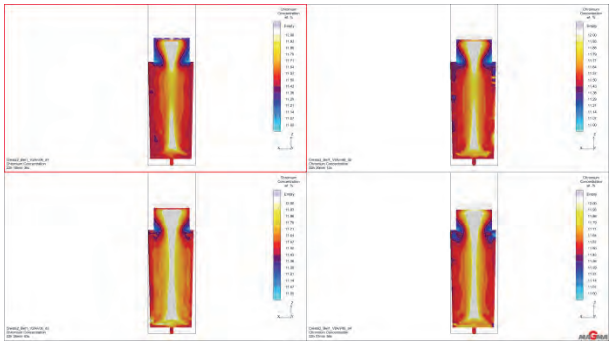
Obr. 7 Mikroporezita v ingotu s rozsahem 0 – 3 %
Fig. 7 Microporosity in the ingot with a range from 0 to 3 %



Obr. 8 Rychlost chladnutí ingotů, rozsah prezentované rychlosti je 0,02 – 0,10 °C·s^{-1}

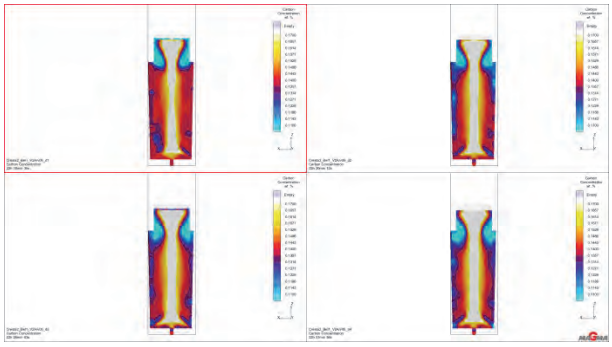
Fig. 8 The rate of cooling of ingots, with a range from 0.02 to 0.10 °C·s^{-1}

Na druhé straně z pohledu je odmíšení nižší u variant s nižší teplotou odlévání, a to především u prvků náchylných k odměšování, jako je chrom (obr. 9) a uhlík (obr. 10). Menší odmíšení je naopak u kobaltu (obr. 11), manganu (obr. 12), molybdenu (obr. 13), niklu (obr. 14), křemíku (obr. 15), titanu (obr. 16), wolframu (obr. 17) a vanadu (obr. 18). Z numerické simulace vyplývá, že za účelem snížení porozity je vhodnější odlévat ingot při vyšší teplotě a za účelem snížení segregací při nižší teplotě.



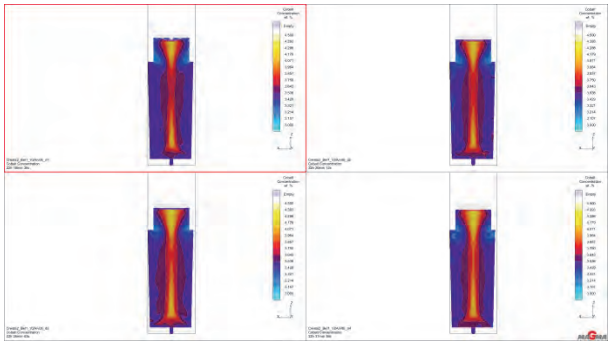
Obr. 9 Koncentrace chrómu po průřezu ingotu v rozsahu 11 – 12 %

Fig. 9 Chromium concentration over the cross section of the ingot in the range from 11 to 12 %



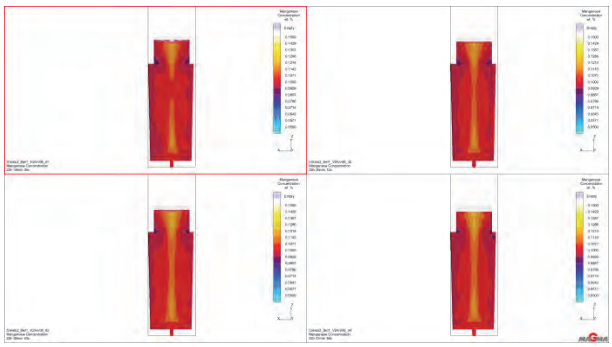
Obr. 10 Koncentrace uhlíku po průřezu ingotu v rozsahu 0,11 – 0,17 %

Fig. 10 The Carbon concentration over the cross section of the ingot in the range from 0.11 to 0.17 %



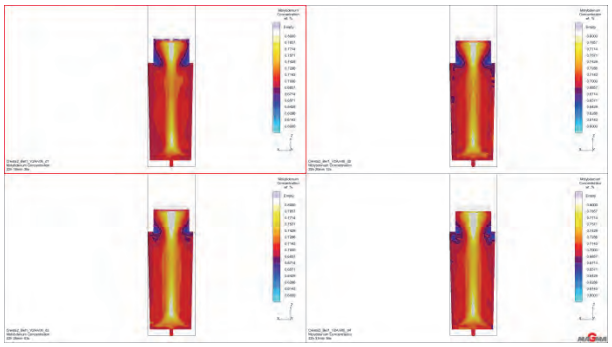
Obr. 11 Koncentrace kobaltu po průřezu ingotu v rozsahu 3,0 – 4,5 %

Fig. 11 The cobalt concentration over the cross section of the ingot in the range from 3.0 to 4.5 %



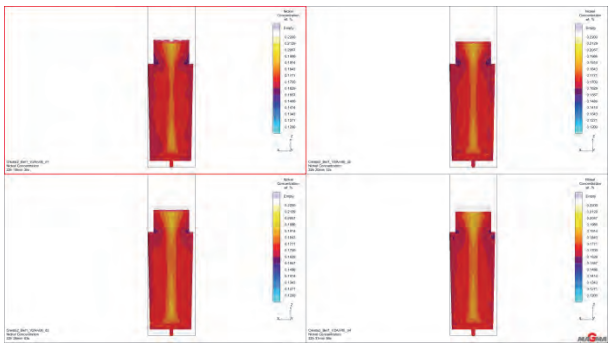
Obr. 12 Koncentrace manganu po průřezu ingotu v rozsahu 0,05 – 0,15 %

Fig. 12 The manganese concentration over the cross section of the ingot in the range from 0.05 to 0.15 %



Obr. 13 Koncentrace molybdenu po průřezu ingotu v rozsahu 0,6 – 0,8 %

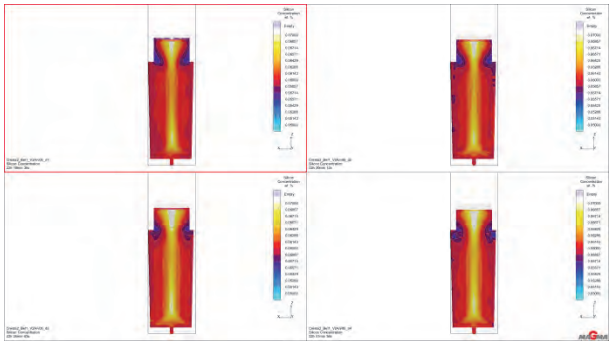
Fig. 13 The concentration of molybdenum over the cross section of the ingot in the range from 0.6 to 0.8 %



Obr. 14 Koncentrace niklu po průřezu ingotu v rozsahu 0,12 – 0,22 %

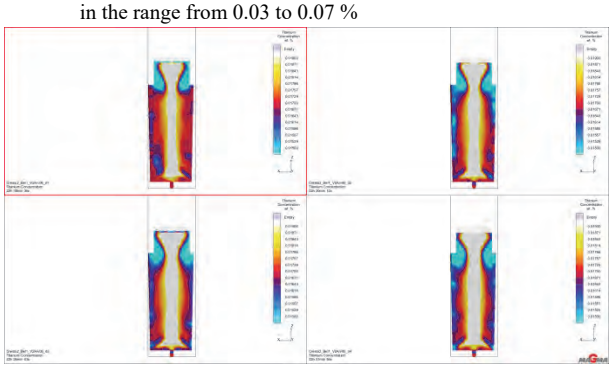
Fig. 14 The concentration of nickel over the cross section of the ingot in the range from 0.12 to 0.22 %

Hutnické listy č. 3/2016, roč. LXIX
ISSN 0018-8069



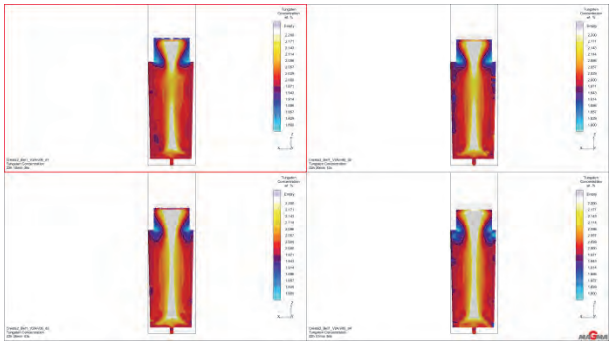
Obr. 15 Koncentrace křemíku v ingotu po průřezu ingotu v rozsahu 0,03 – 0,07 %

Fig. 15 The silicon concentration over the cross section of the ingot in the range from 0.03 to 0.07 %



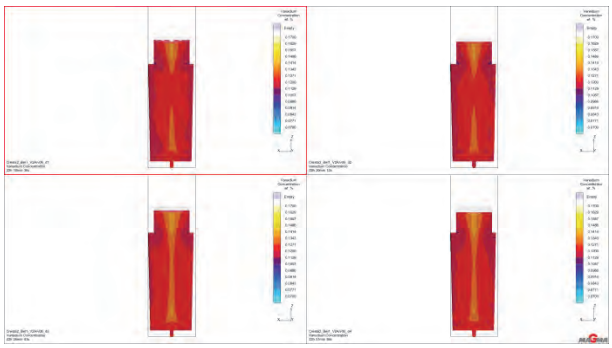
Obr. 16 Koncentrace titanu po průřezu ingotu v rozsahu 0,015 – 0,019 %

Fig. 16 The concentration of titanium over the cross section of the ingot in the range from 0.015 to 0.019 %



Obr. 17 Koncentrace wolframu v ingotu po průřezu ingotu v rozsahu 1,8 – 2,2 %

Fig. 17 The concentration of tungsten over the cross section of the ingot in the range from 1.8 to 2.2 %



Obr. 18 Koncentrace vanadu v ingotu po průřezu ingotu v rozsahu 0,07 – 0,17 %

Fig. 18 The concentration of vanadium over the cross section of the ingot in the range from 0.07 to 0.17 %

Toto jsou protichůdné vlivy, ale dosažené snížení porozity vlivem vyšší teploty odlévání s přihlédnutím k technologickým možnostem výroby ingotů v MMV dovolilo navrhnout provádění fyzikálních experimentů při výrobě ingotů při optimální licí teplotě 1 650 °C.

Návrh technologie výroby oceli

Na základě provedených numerických simulací odlévání a tuhnutí v Magma 5, byl vypracován návrh technologie výroby a odlévání materiálu specifikovaného v tab. 1. Základní parametry, technologie výroby jsou následující:

- tavit pod argonem při tlaku 20 kPa,
- po roztavení kovu provést na základě odběru vzorku na chemickou analýzu, dolegování a dosazení,
- procesem VOD snížit obsah N a Si na minimální úroveň, při hmotnosti taveniny 1 300 kg; kontrolovat proces snižování N a Si pomocí odběru a chemického rozboru vzorků kovu a průběžně stahovat strusku,
- odlévat taveninu při otevřeném kesonu z VPIM do licí pánve, a to po dosažení požadovaného obsahu dusíku, kontrole chemického složení kovu a zahřátí taveniny na teplotu 1 650 °C,
- na atmosférickém licím poli odlít taveninu, pod ochrannou atmosférou argonu, spodem do předem připravené a vyhřáté kokilové sestavy.

Experimentální tavby

Na základě navržené technologie výroby byly provedeny experimentální tavby. Chemické složení odlévané taveniny prezentuje tab. 3. Technologie výroby byla po provedených experimentech modifikována, a to pouze v procesu odlévání, kdy:

- 1. a 2. tavba byly odlévány v kesonu VPIM, a to z indukční tavicí pece přímo do mezipánve, z níž byla spodem plněna kokilová sestava typu V2A. Kokilovou sestavu po odlévání prezentuje obr. 19 a 20.
- 3., 4. a 5. tavba byly neúspěšné experimenty, které musely být předčasně ukončeny z důvodu technicko-technologických příčin daných vysokou náročností technologie výroby. Tavby jsou v tabulce označeny (N).
- 6. experimentální tavba byla rafinována procesem VOD – Vacuum Oxygen Decarburization (obr. 21), a to jak při atmoférickém tlaku, tak při sníženém tlaku 10 kPa. Následně byla tato tavba odlévána z VPIM do licí pánve a na atmosférickém licím poli a spodem do kokilové sestavy OK075.

Jak je patrné z provedených experimentálních taveb, je velmi problematické dosáhnout požadovaného chemic-

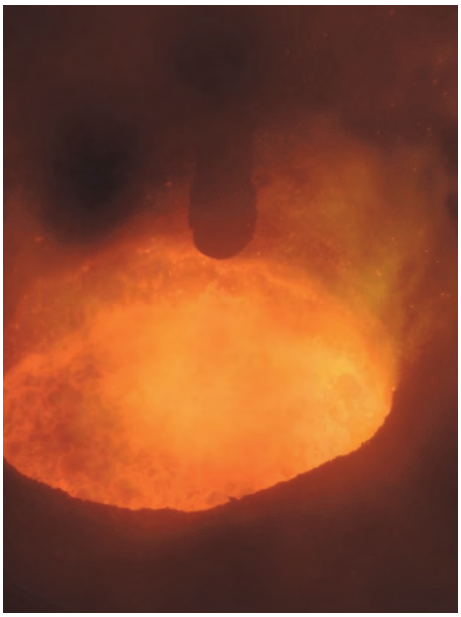
kého složení, a to především nízkého obsahu Si, který se ve VPIM velmi těžko snižuje, a také nízkého obsahu N. V poslední 6. experimentální tavbě bylo dosaženo požadovaného chemického složení, vyjma obsahu N. Práce na modifikaci technologie výroby tohoto materiálu pokračují.

Tab. 3 Chemické složení materiálu dle požadavku, ve vakuové a přetlakové indukční tavicí peci (VPIM) a v licí pánvi (LP), pro jednotlivé experimentální tavby (hm. %)
Tab. 3 Chemical composition of the material as required, in vacuum and pressurized induction melting furnace (VPIM) or in a ladle (LP) for each of the individual experimental melts (wt. %)

Požadavek / místo odběru vzorku kovu na chem. an.		**C**	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Mo**	**W**	**Co**	**Ni**	**B**	**N**	**Ti**	**V**	**Nb**
Požadavek	min	0,13	0,05	0,05	11,00	0,6	1,9	3,0	0,12	0,008	-	0,016	0,07	0,05
	max	0,15	0,07	0,15	12,00	0,8	2,1	4,0	0,22	0,009	0,0050	0,018	0,17	0,06
1. tavba / VPIM		0,15	0,09	0,12	11,65	0,66	2,0	3,4	0,17	0,0086	0,0140	0,014	0,10	0,06
2. tavba / VPIM		0,13	0,13	0,12	11,19	0,66	1,9	3,7	0,16	0,0085	0,0134	0,021	0,11	0,06
3. tavba / VPIM (N)		0,05	0,14	0,10	19,97	1,09	3,39	5,4	0,04	0,0018	0,0380	0,004	0,026	0,023
4. tavba / LP (N)		0,04	0,12	0,23	18,42	1,05	2,82	4,6	0,32	0,0025	0,0460	0,004	0,08	0,023
5. tavba / LP (N)		0,07	0,09	0,09	11,57	0,67	2,09	3,5	0,22	0,0079	0,0170	0,004	0,09	0,050
6. tavba / Ingot		0,15	0,06	0,05	11,05	0,64	1,96	3,0	0,22	-	0,0093	0,021	0,09	0,050

Obr. 19 Kokilová sestava z 1. experimentu, hodinu po odlití, vytažená z kesonu VPIM
Fig. 19 Ingot mould set from the 1st experiment, one hour after casting, pulled out from the caisson of the VPIM

Obr. 20 Odlitá kokilová sestava s mezipánví v kesonu VPIM u 2. tavby
Fig. 20 The cast ingot-mold set with tundish in the caisson of the VPIM at the 2nd heat



Obr. 21 Proces VOD při tlaku 10 kPa, u 6. experimentální tavby
Fig. 21 VOD process at the pressure of 10 kPa, at the 6th experimental heat

Závěr

Příspěvek ve svém začátku prezentuje Ocelárenský výzkum společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., jeho možnosti výzkumu, vývoje a následně také výroby. Dále specifikuje metalurgické agregáty, na kterých se provádějí jak experimentální tavby, tak i výroba komerčních zakázek či komerční výzkum.

Na příkladu materiálu pro energetický průmysl práce prezentuje návrh technologie výroby pomocí numerického software Magma 5 pro odlévání a tuhnutí. Tato technologie je ověřována a modifikována na zařízení Vakuová a přetlaková indukční tavící pec. Na základě

Hutnické listy č. 3/2016, roč. LXIX
ISSN 0018-8069

provedených experimentů se jeví jako nejvýhodnější vyrábět materiál rafinací procesem VOD – Vacuum Oxygen Decarburization při atmosférickém a následně sníženém tlaku na hodnotu 10 kPa. Poté následuje odlití do kokilové sestavy OK075.

Modifikace technologie stále pokračuje s cílem snížit především obsah N na požadovanou úroveň.

Poděkování

Výsledek výzkumu, vývoje a inovací byl dosažen s využitím institucionální podpory na rozvoj výzkumné organizace poskytované „Ministerstvem průmyslu a obchodu“.

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

Ocelářský průmysl se obává plánů EU na změny obchodu s emisemi

Energie Informationsdienst *04.04.2016*

Současné předpisy pro obchod s emisemi platí ještě do roku 2020, poté by je měly nahradit nové směrnice pro roky 2021 až 2030. Ze zpřísnění mají obavy hlavně energeticky náročné obory, které doposud dostávaly emisní povolenky přidělovány zdarma. Hospodářské sdružení Ocel (WV Stahl) poukazuje v této souvislosti na prognostické šetření, které se zabývalo působením evropského obchodu s emisními právy na německý ocelářský průmysl, jakož i jeho řetězce tvorby hodnot. Zásadní výpověď zní, že investice v ocelářském průmyslu by s novými přísnějšími směrnicemi výrazně poklesly s následkem, že by výroba a zaměstnanost do roku 2030 oproti současné úrovni poklesly až o 60 %. Kromě toho by bylo ohroženo až 380 000 pracovních míst v souvisejících a navazujících oborech.

Boj proti kysličníku uhličitému

Handelsblatt *05.04.2016*

Pro jedny je to kletba, pro jiné požehnání: ceny za emisní certifikáty se již roky pohybují na nízké úrovni. V současné době stojí povolenka na emisi jedné tuny CO_2 zhruba 5 €, nejvyšší hodnota se kdysi pohybovala na 30 €, Francie chce dnes nařídit pro certifikáty minimální cenu. Je to vhodná příležitost – letos je v agendě tak jako reforma práv emisního obchodu. Kritici ovšem varují před následky. Francouzská vláda navrhuje cenu 10 €, která by měla do roku 2030 stoupnout na 30 €. Pracuje s argumentem, že vzhledem k dnešním nízkým cenám se firmám nevyplatí investovat do účinnějších agregátů. Francouzi sami by tímto návrhem poškozeni nebyli, jejich energetické zdroje spočívají především na jaderné energii, která žádné emise CO_2 neprodukuje. V Německu nacházejí francouzské návrhy přímluvce, například Institut pro výzkum klimatu v Postupimi nebo Spolkový svaz emisního obchodu a ochrany klimatu (BVEK). Průmysl to vidí samozřejmě jinak. „Koncepce obchodu s emisními právy předpokládá, že se ceny certifikátů budou tvořit na trhu. Tzv. minimální ceny by byly nepřípustným zásahem do tržních podmínek,“ říká Hans Jürgen Kerkhoff, prezident WV Stahl. Z hlediska průmyslu představují plány Evropské Unie tak jako tak explozivní směs, protože by mohly snížit konkurenceschopnost postiženého odvětví.

Dvousetmilionová zakázka pro stavitele zařízení SMS Group

Rheinische Post *08.04.2016*

Ocelářské veletrhy Wire a Tube v Düsseldorfu byly i přes přetrvávající krizi odvětví úspěchem. Nejvíce návštěvníků ze 130 zemí světa přijelo z Německa, Itálie, Turecka, Francie, Polska a Nizozemí. Podíl zahraničních návštěvníků s více než 65 % byl velmi vysoký, z toho asi třetina byla ze zámoří. 75 % návštěvníků byli vedoucí pracovníci s rozhodovacími kompetencemi. Celkově připravenost investovat na některém z těchto vedoucích světových veletrhů opět stoupla. 60 % návštěvníků uvedlo, že našlo nové dodavatele. Jeden z největších vystavovatelů, skupina SMS dokázala získat ve velmi obtížném tržním prostředí velkou zakázku. Italská firma Aferpi pověřila SMS stavbou ocelárny v italském Piombinu. Zakázka má hodnotu zhruba 200 milionů €. „Tavicí agregát bude nejefektivnější svého druhu na trhu,“ říká jednatel SMS Guido Kleinschmidt. Zařízení bude po svém dokončení vyrábět kolejnice. Mohla by to být na dlouhou dobu jedna z posledních velkých investic v Evropě.