

Stanovení intenzity chlazení během semikontinuálního odlévání hliníkových slitin

Determination of Cooling Intensity During the Semi-continuous Casting Process of Aluminum Alloys

Ing. Michal Guzej¹, prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.¹

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

Při odlévání ingotů z hliníkových slitin je velký důraz kladen na dosažení výrobků bez vad. Hlavní vliv na tvorbu defektů má množství tepla, které je odebráno z odlévaného kovu pomocí vodního proudu stékajícího z krystalizátoru po povrchu ingotu. Lící proces má dvě hlavní části. Počáteční fázi, kdy je tekutý kov nalitý do prostoru mezi krystalizátory, a ustálenou fázi, kdy je již vytvořena počáteční část ingotu a parametry liti jsou již neměnné (lící rychlost, průtok chladicí vody krystalizátorem, počáteční teplota atd.). Na tvorbu trhlin má zásadní vliv počáteční fáze, kde jsou podmínky liti velice proměnné, a proto zde dochází k velkému vnitřnímu prnutí v materiálu. Řešením je využití pulzního chlazení, které umožňuje vhodným nastavením délky pulzů snížit intenzitu chlazení. Zároveň umožňuje udržení průtoku krystalizátorem nad minimální doporučenou hodnotou, čímž nedojde k nehomogennímu chlazení po obvodu ingotu. Tento článek porovnává vliv dvou různých typů chlazení (pulzního a kontinuálního) na výslednou intenzitu chlazení, kterou reprezentuje součinitel přestupu tepla α v závislosti na povrchové teplotě ingotu. Pro účely těchto měření bylo zkonstruováno speciální měřicí zařízení, které bylo vybaveno vzorkem se zabudovanými termočlánky. Záznam teplot z experimentu byl za pomoci vyvinutého softwaru pracujícího na principu inverzního výpočtu přepočítán na povrchové teploty a odpovídající součinitel přestupu tepla α , které se dají použít jako okrajové podmínky do numerických simulací. Tím se dají přesně modelovat reálné procesy chlazení.

Klíčová slova: odlévání hliníkových slitin; součinitel přestupu tepla; experiment; inverzní výpočty

One of the most important considerations during the aluminum casting process is the capability of attaining defect-free ingots. A superheat extraction from the incoming liquid metal by the secondary water-cooling system has the major influence on defect generation due to direct water impingement on the ingot surface. The casting process has two distinct stages – start-up, when the liquid metal is filled between the molds, and steady state, when casting parameters do not change. Considerable attention should be paid to the initial start-up stage, where defects are most likely to be initiated. A solution is to use a pulse cooling, which reduces the cooling intensity, but keeps water flow rate above the minimum value. No available function exists, which accurately describes the cooling intensity using all of the aforementioned parameters, and so real measurement is the only way to determinate the cooling intensity. This paper deals with experimental investigation of the cooling intensity, which is described by a heat transfer coefficient dependence on the surface temperature during the casting process of ingots and which compares different cooling modes - continuous and pulse one. For measurement a special experimental device was designed and a sample with built-in thermocouples. Temperature history from the experiment is used as an input for mathematical software, which is based on inverse computation. Results of this program are surface temperature and heat transfer coefficient, which can be used as boundary conditions for a numerical model, which can simulate temperature distribution inside the ingot during the cooling process. Computed results showed that reduction of the water flow rate during continuous cooling by 62% brought approx. 45 % reduction of average heat transfer coefficient. If this is not enough, the pulse cooling is approx. 50 % less intensive than continuous cooling for the same water flow rate.

Key words: casting process of aluminium alloys; heat transfer coefficient; experiment; inverse task

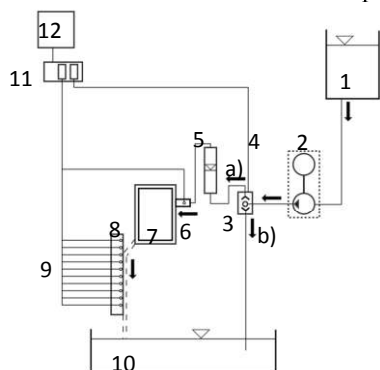
Chlazení vodním proudem se používá v mnoha průmyslových aplikacích, jednou z typických aplikací je chlazení během odlévání hliníkových slitin [1, 2]. Pro predikci tepelného pole během chlazení ingotů se dají použít komerční softwary (ANSYS, COMSOL atd.). Největší problém nastává u zjištění přesných okrajových podmínek, které jsou rozhodující pro reálnost

dosažených výsledků [3]. Zatím neexistuje funkce, kterou by se dalo přesně popsat chlazení na základě lících parametrů. Je tedy nutné využít dat naměřených z experimentů, které se co nejvíce přibližují reálným podmínkám [4]. Proto byla v Laboratoři přenosu tepla a proudění VUT v Brně vyvinuta speciální metodika, která na základě naměřených teplot v materiálu dokáže

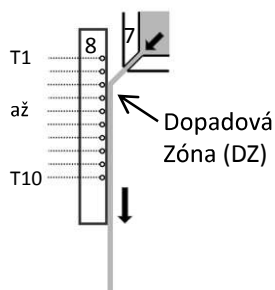
vypočítat relativní součinitel přestupu tepla na chlazeném povrchu.

1. Popis experimentů

Cílem měření bylo za pomoci experimentů přesně zreprodukovat podmínky, které nastávají v reálném provozu při lití hliníkových slitin a zjistit vliv důležitých parametrů na intenzitu chlazení (množství chladicí vody, typ chlazení a on/off čas pulzů pro pulzní chlazení). Měřicí obvod (obr. 1) se skládá z testovaného hliníkového vzorku se zabudovanými termočlánky, který je ohřát v peci na 475 °C. Následné chlazení je prováděno pomocí krystalizátoru se systémem kanálků vyúsťujících otvory na povrch vzorku. Průtok chladicí vody lze nastavit na požadovanou hodnotu v rozsahu od 5 do 15 l·min⁻¹. Pulzace jsou vyvolány za pomoci trojcestného ventilu (obr. 1, popis 3), který slouží ke střídavému přepínání mezi větvemi a) a b). Všechny pulzy mají periodu 1,5 s a změny jsou prováděny přes počítač. Data z termočlánku jsou zaznamenávána vzorkovací frekvencí 100 Hz a ukládána do počítače.



Obr. 1 Schéma měřicího obvodu
Fig. 1 Diagram of measuring circuit



Obr. 2 Pozice termočlánků vzhledem k DZ
Fig. 2 Position of the thermocouple in respect to the impact zone

V obr. 1 představuje: 1 – nádrž s chladicí vodou, 2 – čerpadlo, 3 – trojcestný ventil (zajišťuje pulzace), 4 – kabel pro ovládání a nastavování pulzací, 5 – průtokoměr, 6 – termočlánek pro měření teploty chladicí vody, 7 – krystalizátor, 8 – testovací vzorek, 9 – termočlánky pro záznam chlazení, 10 – nádrž pro použitou vodu, 11 – systém pro záznam dat, 12 – počítač.

Tab. 1 Experimenty – kontinuální chlazení
Tab. 1 Experiments setup - continuous cooling

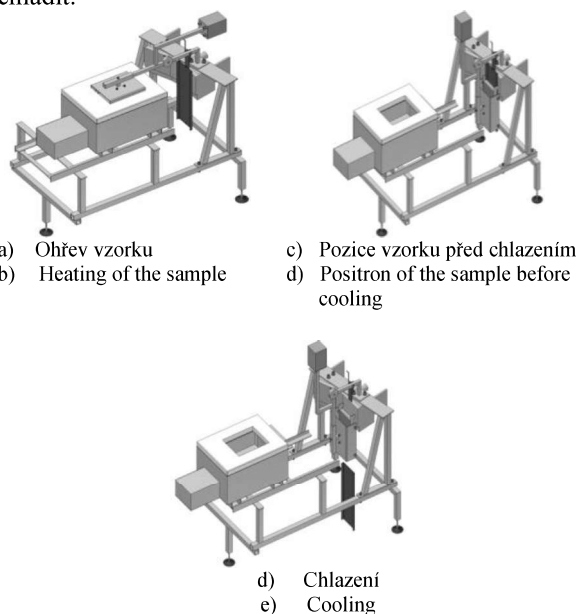
Experiment	Průtok [l·min ⁻¹]
C1	5,79
C2	6,42
C3	10,7
C4	14,98

Tab. 2 Experimenty – pulzní chlazení
Tab. 2 Experiments setup - pulse cooling

Experiment	Průtok [l·min ⁻¹]	ON čas [sek]	OFF čas [sek]
P5	5,94	0,6	0,9
P6	5,94	0,9	0,6
P7	6,42	0,9	0,6
P8	6,38	1,35	0,15

1.1 Měřicí zařízení

Hlavním úkolem měřicího zařízení je docílit, aby pozice vzorku a krystalizátoru byla stejná jako při reálném provozu. Konstrukce uchycení vzorku umožňuje měnit jeho vertikální pozici, a tím měnit místo dopadové zóny. Postup experimentu je znázorněn na obr. 3. Vzorek se umístí do pece a ohřeje na 475 °C. Následně se nastaví požadovaný průtok (pokud je experiment s pulzním chlazením, nastaví se i pulzace), zapne se nahrávání dat a vzorek se umístí do pracovní pozice. Nakonec se odstraní deflektor a vzorek se začne chladit.



Obr. 3 Měřicí zařízení se vzorkem
Fig. 3 Experimental device and testing sample

1.2 Testovací vzorek

Vzorek ze slitiny hliníku s hladkým povrchem má rozměry: výška 200 mm a šířka 20 mm. Do vzorku je z boku v horizontálním směru vyvrtáno 10 děr o průměru 1 mm ve vzdálenosti 3 mm od chlazeného povrchu. Do děr jsou umístěny neuzemněné termočlánky typu K. Vzdálenost mezi jednotlivými termočlánky je 10 mm. První dva jsou umístěny nad dopadovou zónou, osa třetího se nachází v dopadové zóně (DZ) a zbytek je pod DZ (obr. 2).

1.3 Výpočet okrajových podmínek

Naměřená data (teplota v závislosti na čase) jsou použita jako vstupní hodnoty pro kalkulaci teplotně závislé okrajové podmínky (závislost součinitele přestupu tepla α na povrchové teplotě). Inverzní výpočet je založen na modifikované 2D metodě Bekova postupného hledání řešení. Dvourozměrný model byl použit z důvodu vysoké tepelné vodivosti hliníku, což generuje velké tepelné toky po výšce vzorku během chlazení. Základní myšlenkou postupu je řešit celý úkol krok po kroku v čase [5, 6]. Nejdříve se vypočítá suma čtverců chyb za použití f dopředných časových kroků, kdy se porovnávají změřené teploty T_i^* s vypočítanými teplotami T_i pro aktuální čas m .

$$SSE = \sum_{i=m+1}^{m+f} (T_i^* - T_i)^2 \quad (1)$$

Teploty T_i jsou vypočítané přímou úlohou pro konstantní tepelný tok. Tepelný tok na povrchu q v čase m lze vypočítat minimalizací rov. (1) za použití lineárních minimalizačních metod.

$$q_m = \frac{\sum_{i=m+1}^{m+f} (T_i^* - T_i|_{q^m=0}) \zeta_i}{\sum_{i=m+1}^{m+f} (\zeta_i)^2} \quad (2)$$

kde $T_i|_{q^m=0}$ jsou teploty v místě termočlánku, které byly vypočteny přímým výpočtem za použití dříve vypočtených tepelných toků bez q_m , parametr ζ_i je citlivost koeficientu v časovém indexu i na tepelný tok v čase m . Fyzikálně tento koeficient citlivosti značí zvýšení teploty v termočlánku na jednotku tepelného toku na povrchu. Koeficient citlivosti snímače je definován podle vztahu (3).

$$\zeta_i = \frac{\partial T_i}{\partial q^m} \quad (3)$$

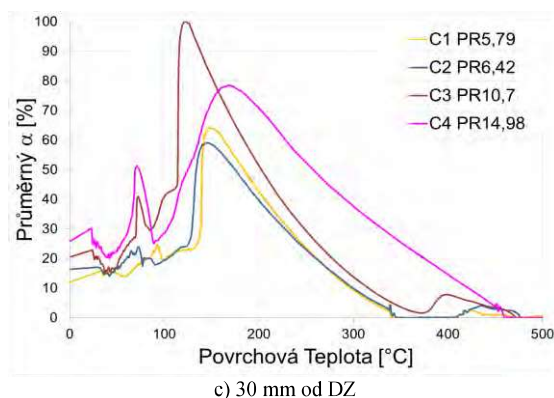
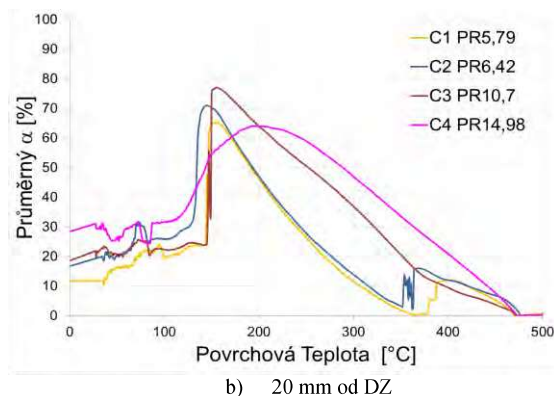
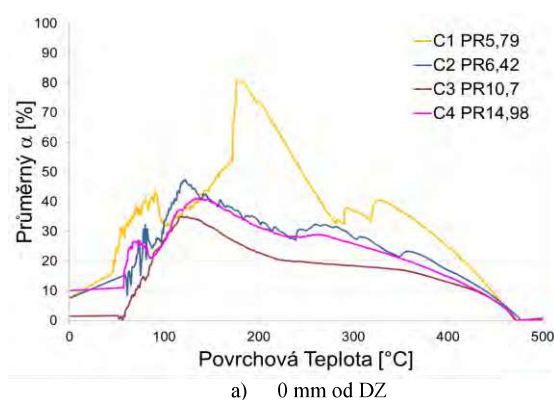
Součinitel přestupu tepla α lze vypočítat z povrchové teploty T_0^m a tepelného toku s povrchu q_m

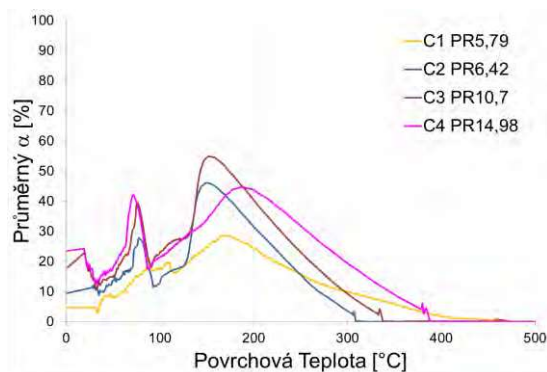
$$\alpha_m = \frac{q_m}{T_\infty^m - (T_0^m + T_0^{m-1})/2} \quad (4)$$

T_∞^m je teplota okolí.

2. Výsledky z experimentů

Následné grafy byly vypočítány pomocí modelu, který je popsán v předešlé kapitole. Veškeré vypočítané výsledky byly verifikovány pomocí komerčního softwaru ANSYS 15.0. Tak byly získány křivky, které byly použity jako okrajové podmínky při termálních simulacích chlazení. Rozdíly mezi naměřenými teplotami a teplotami získanými ze simulací ve stejných místech jsou v přijatelných mezích (maximální odchylka do 15 % od naměřených dat).





d) 50 mm od DZ

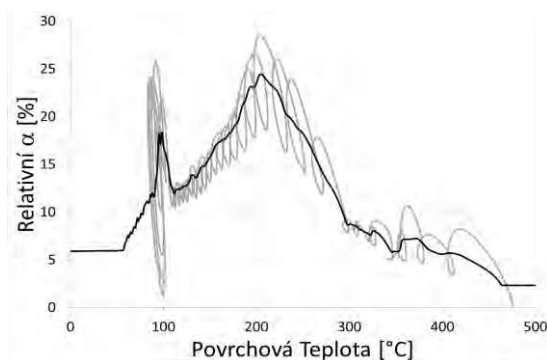
Obr. 4 Vliv vzdálenosti termočlánku od DZ na křivky α [%] – kontinuální chlazení

Fig. 4 Distance influence of the thermocouple from the impact zone on the α [%] curves - continuous cooling

Vlivem pulzního chlazení (přepínáním mezi okamžiky, kdy se chladí a kdy ne) se tvoří na křivkách smyčky. Tyto smyčky nelze popsat matematicky. Proto jsou vypočítané průběhy relativního α nahrazeny průměrnými hodnotami podle následující rov. (5). Hodnota relativního α v následujících čtyřech grafech (obr. 6) je průměrná hodnota a příklad je uveden v obr. 5.

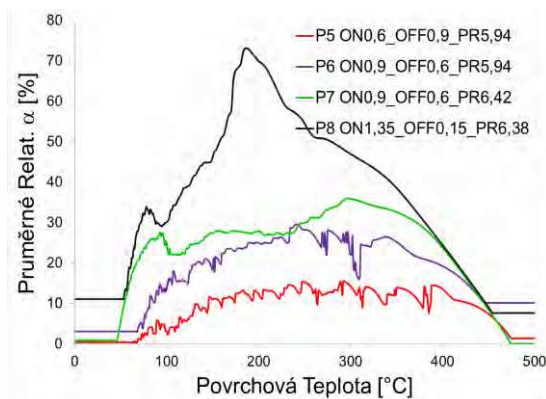
$$\alpha_{pr \bar{r}} = \frac{\sum_{i=t}^{t+n} \alpha_i}{n}, \quad (5)$$

kde t je index času pro začátek pulzu a n je počet datových vzorků během jednoho pulzu. Perioda pro každý pulz je 1,5 sek a vzorkovací frekvence je 100 Hz, jak bylo popsáno na začátku kapitoly 1.

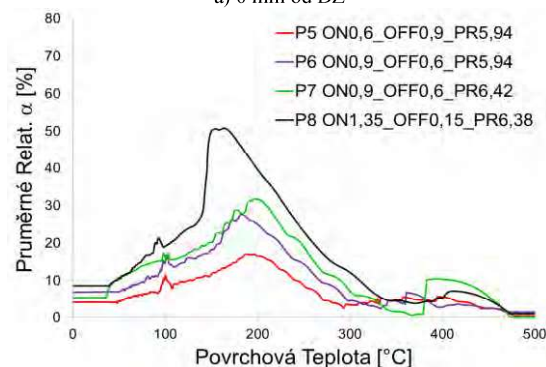


Obr. 5 Příklad zprůměrování α [%] pro pulzní chlazení

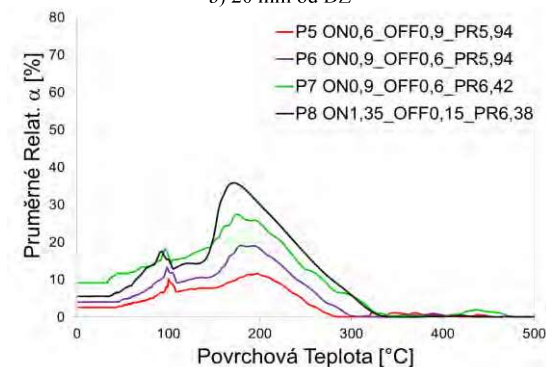
Fig. 5 Example of obtaining the average α [%] curve for pulse cooling



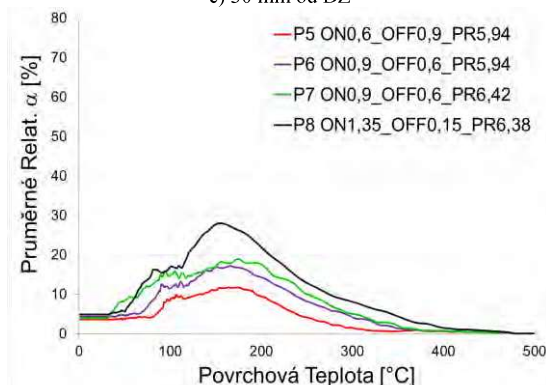
a) 0 mm od DZ



b) 20 mm od DZ



c) 30 mm od DZ



d) 50 mm od DZ

Obr. 6 Vliv vzdálenosti termočlánku od DZ na křivky α [%] – pulzní chlazení

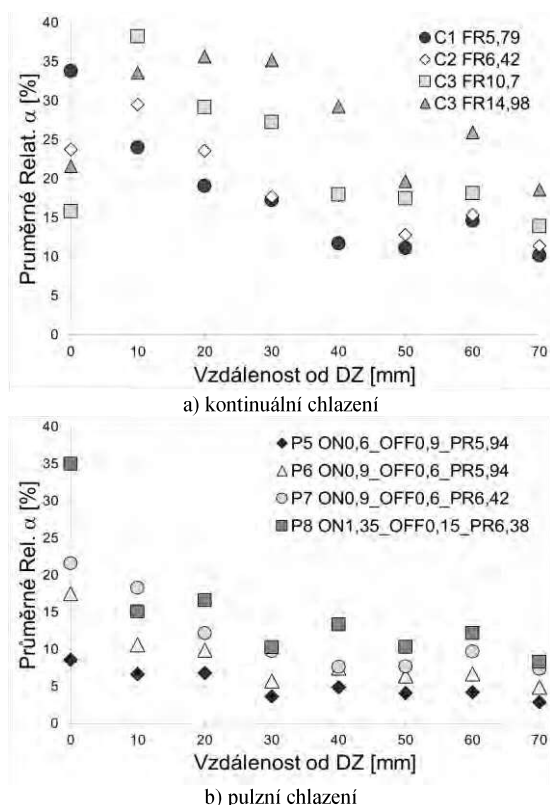
Fig. 6 Distance influence of the thermocouple from the impact zone on the α [%] curves – pulse cooling

3. Analýza výsledků

Jedna z důležitých vlastností hliníku a jeho slitin pro chlazení je vysoká tepelná vodivost. Vzhledem k tomu má schopnost dodávat do povrchové vrstvy dostatečné množství tepelné energie. Proto se může udržet parní vrstva na povrchu mnohem déle, než např. u oceli.

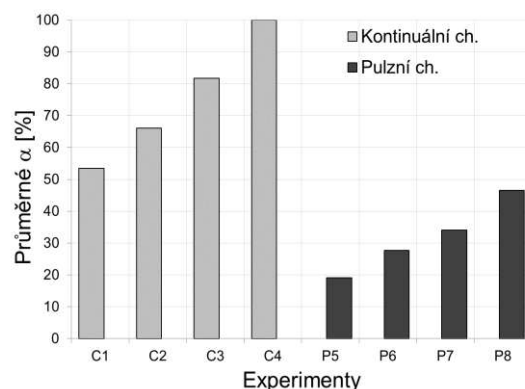
Obr. 4 a 5 ukazují, že křivky α mají dva různé režimy. V prvním režimu (vzdálenost termočlánků od dopadové zóny 20 mm, obr. 4a, 4b, 6a a 6b) – není patrný Leidenfrostův efekt ani blánový var. Kinetická energie vodního proudu je natolik vysoká, že chladicí paprsek prorazí parní vrstvu okamžitě po kontaktu s povrchem vzorku. Naproti tomu ve druhém režimu (vzdálenost termočlánků od dopadové zóny 30 mm, obr. 4c, 4d, 6c a 6d) je tekoucí voda oddělena od povrchu parní vrstvou, která se vzhledem k chlazení chová jako tepelná izolace. Nad Leidenfrostovou teplotou (cca 320 °C) má α velmi nízkou hodnotu v porovnání s maximem.

Během experimentů bylo rovněž pozorováno na začátku chlazení po velmi krátký časový okamžik nestabilní chování vodního proudu tekoucího po povrchu vzorku. Tento jev se projevoval pouze v momentě dopadu proudu vody na vzorek, což má za následek náhodné umístění maximálního průměrného α (obr. 7) mezi vzdálenostmi termočlánku od dopadové zóny 0 až 20 mm. Při použití pulzního chlazení klesne intenzita chlazení o cca 50 % (obr. 8).



Obr. 7 Průměrné relativní α [%] pro různé vzdálenosti od DZ a pro různé typy chlazení

Fig. 7 Variation of average α [%] for different distances from the impact zone and for different types of cooling



Obr. 8 Průměrné relativní α [%] pro kontinuální a pulzní chlazení
Fig. 8 Variation of average α [%] for continuous and pulse cooling

Závěr

Tento článek shrnuje výsledky z experimentálního stanovení intenzity chlazení (relativní součinitel přestupu tepla α v závislosti na povrchové teplotě) pro dva způsoby chlazení (pulzní a kontinuální). Výsledky experimentálního měření prokázaly, že pokud je nutné prudce snížit intenzitu chlazení, je vhodné využít pulzní chlazení. Snižování průtoku u kontinuálního chlazení nemá tak silný vliv na snížení hodnot součinitele přestupu tepla α . Při snížení průtoku vody o 62 % je dosaženo redukce chlazení o 40 %. Pokud je nutné dále redukovat chlazení, je nutné použít pulzní chlazení, které je v porovnání s kontinuálním chlazením méně intenzivní. Detailní rozbor je uveden v tab. 3, která obsahuje dvojice experimentů se stejným průtokem, ale různým typem chlazení. Další výhodou je větší možnost regulace pomocí vhodného nastavení pulzů – časů, kdy se chladí a nechladí. V této části výzkumu byl prokázán vliv typu chlazení na hodnoty součinitele přestupu tepla α . Součástí dalšího řešení bude nalezení optimálního nastavení chladicích parametrů vhodných pro počáteční fázi semikontinuálního lití ingotů s cílem omezení tvorby

Tab. 3 Porovnání průměrného rel. α získaného z celého experimentu pro pulzní a kontinuální chlazení

Tab. 3 Comparison of average rel. α obtained from full experiment for pulse and continuous cooling

C1	P5	C2	P7
53 %	19 %	66 %	34 %

Poděkování

Výsledky tohoto projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) byly získány za finančního přispění MŠMT v rámci účelové podpory programu "Národní program udržitelnosti I".

Literatura

- [1] LAROUCHE, A., CARON, Y., KOCAEFE, D. Impact of water heat extraction and casting conditions on ingot thermal response during D.C. casting (1998) *Light Metals: Proceedings of Sessions, TMS Annual Meeting* (Warrendale, Pennsylvania), pp. 1059-1064

- [2] JENSEN, E.K.: *Light Metals 1980*, TMS, Warrendale, PA, 1980, pp. 631-42
- [3] SENGUPTA, J., THOMAS, B.G., WELLS, M.A. The use of water cooling during the continuous casting of steel and aluminum alloys (2005) *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 36 A (1), pp. 187-204
- [4] CHABIČOVSKÝ, M., RAUDENSKÝ, M.: Experimental Investigation of the Heat Transfer Coefficient. *Materiali in tehnologije*, 47 (2013), p. 395
- [5] M. RAUDENSKÝ, Heat transfer coefficient estimation by inverse conduction algorithm. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow* 3 (1993), p. 257
- [6] M. POHANKA and K. A. WOODBURY, A Downhill Simplex method for computation of interfacial heat transfer coefficients in alloy casting. *Inverse Problems in Engineering* 11 (2003), p. 409

Zotavení ocelářského průmyslu na pevnějším základu

Stahl Aktuell

21. 5. 2015

Růst investic v Evropě se bude v roce 2015 upevňovat. Z toho vychází evropský ocelářský svaz Eurofer ve svém výhledu. Výsledky za první měsíce letošního roku vypadají pozitivně. Roli hnacího kola přitom převezme soukromá spotřeba. Nízké ceny energie, nízká inflace, klesající počty nezaměstnaných a stoupající mzdová úroveň povzbuzují chuť soukromých domácností utrácet. Robustní růst předpovídají hospodářští analytici zejména pro Španělsko, Velkou Británii a Německo. Aktivita v sektorech, zpracovávajících ocel, která v roce 2014 stoupla o 2,2 %, by se měla v roce 2015 udržet na úrovni předcházejícího roku. Pro rok 2016 je prognostikován silnější růst, který by měl být hnán především investicemi. Vítr do zad by měly ocelářskému průmyslu poskytnout také stoupající exporty. Slabost eura má pro těžce vyždímaný ocelářský průmysl „starého kontinentu“ nakonec své výhody – povzbuzuje export. Jako nejvíce znejistující faktor pro ocelářskou branži označuje Eurofer vývoj u importů ze třetích zemí. Podle Euroferu naznačují první čísla za rok 2015, že se importy oceli do EU udržují stále na vysoké úrovni.

Tvrdá cesta před koncernem Salzgitter

Börsen-Zeitung

29. 5. 2015

Druhý největší výrobce oceli v Německu Salzgitter si i přes solidní čísla netroufá být víc než opatrně optimistický. Je před ním ještě „obtížná a tvrdá cesta ve směru k uspokojivé ekonomické a výrobní efektivnosti“, řekl Heinz Jörg Fuhrmann na Valné hromadě akcionářů v Braunschweigu. Šéf dozorčí rady Rainer Thieme doplnil, že ještě dlouho nebude důvod k domýšlivosti. Fuhrmann poukázal na nadbytečné kapacity v některých výrobních segmentech ocelářského odvětví v EU a v Číně. Přesto optimisticky poznamenal, že celkově se konjunkturální situace oproti uplynulému roku trochu zlepšila. V současném roce koncern počítá se stagnujícím obrátem s výsledky před zdaněním v nízké až střední dvoumístné milionové oblasti. V roce 2014 skončil koncern v minusu 32 milionů €. V prvních třech měsících tohoto roku vykázal koncern pod čarou zisk 32,7 milionů €, po ztrátě 13,3 € ve stejném období minulého roku.

Šéf Siemensu je našťvaný na Brusel

Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung

24. 5. 2015

Obvykle si firmy Siemens a ABB nic nedarují. Nyní ale oba šéfy představenstev spojuje společný protivník, a tím je Evropská komise, která v současné době chrání ocelářský průmysl EU importními cly. To ovšem škodí těm, kteří potřebují ocel pro své výrobky. Z tohoto důvodu si Siemens i ABB společně s množstvím různých menších firem stěžují v Bruselu na neoprávněně zvýšená cla na importovanou ocel. Konkrétně se teď jedná o speciální ocel, kterou potřebují výrobci transformátorů. Na tuto ocel nyní uvalila Evropská komise zvýšená cla ve výši 35,9 procent, což ovšem masivně poškozuje podniky, vyrábějící transformátory.