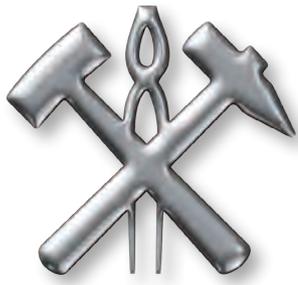


ROČNÍK/VOL. LXX  
ROK/YEAR 2017

3



# Hutnické listy

METALLURGICAL  
JOURNAL

ODBORNÝ ČASOPIS PRO METALURGIÍ A MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ  
PROFESSIONAL PERIODICAL FOR METALLURGY AND MATERIAL ENGINEERING

WWW.HUTNICKELISTY.CZ  
ISSN 0018-8069

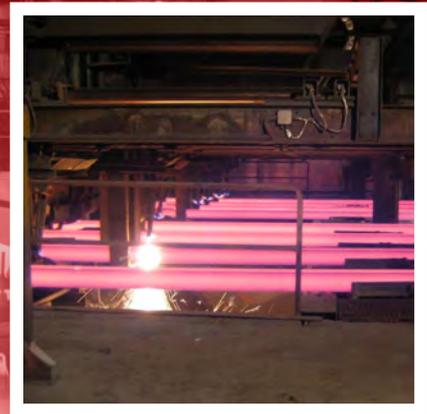


Foto © Viktor Mácha



T FME



Získej kvalitní  
technické vzdělání  
**STUDUJ NA  
FMMI**



#fmmiostrava



*Jdi za svým cílem...*

FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ,  
VŠB-TUO PRO AKADEMICKÝ ROK 2017/2018 NABÍZÍ STUDIUM  
V BAKALÁŘSKÝCH STUDIJNÍCH PROGRAMECH:

**METALURGICKÉ INŽENÝRSTVÍ**

- Moderní metalurgické technologie
- Tepelná technika a keramické materiály
- Umělecké slévárství

**MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ**

- Progresivní technické materiály
- Materiály a technologie pro automobilový průmysl
- Recyklace materiálů

**PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ**

- Procesní inženýrství a metody kontroly kvality
- Chemie a technologie ochrany životního prostředí

**EKONOMIKA A ŘÍZENÍ PRŮMYSLVÝCH SYSTÉMŮ**

- Ekonomika a management v průmyslu
- Automatizace a počítačová technika v průmyslu
- Management kvality

PRO AKADEMICKÝ ROK 2017/2018 NABÍZÍME ROVNĚŽ  
STUDIUM V MAGISTERSKÝCH NAVAZUJÍCÍCH  
STUDIJNÍCH PROGRAMECH:

**METALURGICKÉ INŽENÝRSTVÍ**

- Moderní metalurgické technologie
- Tepelná technika a keramické materiály

**MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ**

- Progresivní technické materiály
- Materiály a technologie pro automobilový průmysl
- Recyklace materiálů
- Biomechanické inženýrství

**PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ**

- Chemické a environmentální inženýrství

**EKONOMIKA A ŘÍZENÍ PRŮMYSLVÝCH SYSTÉMŮ**

- Ekonomika a management v průmyslu
- Automatizace a počítačová technika v průmyslových technologiích
- Management kvality

**ZAÚJALY VÁS STUDIJNÍ PROGRAMY NA FMMI?**

S podrobnou charakteristikou jednotlivých studijních programů a oborů se můžete seznámit na webu [www.fmmi.vsb.cz](http://www.fmmi.vsb.cz).  
Po úspěšném absolvování bakalářského studia lze pokračovat v magisterských navazujících studijních programech fakulty.  
Absolventi FMMI se uplatní v materiálových, metalurgických, chemických, ekonomických a ekologických oborech, ale také  
ve vědecko-výzkumných organizacích či organizacích státní správy.

**PŘIHLÁŠKU KE STUDIU** lze podat elektronickou formou prostřednictvím  
formulářů dostupných na [www.fmmi.vsb.cz](http://www.fmmi.vsb.cz) do **10. 8. 2017**.

17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava - Poruba, +420 597 325 552, [monika.barcova@vsb.cz](mailto:monika.barcova@vsb.cz)

[www.fmmi.vsb.cz](http://www.fmmi.vsb.cz)

Facebook, Instagram: fmmiostrava

Registrační číslo / Registration Number  
MK ČR E 18087Mezinárodní standardní číslo  
International Standard Serial Number  
ISSN 0018-8069**Vydavatel / Publisher**OCELOT s.r.o.  
Pohraniční 693/31, 706 02 Ostrava-Vítkovice  
IČ: 49245848, DIČ: CZ-49245848  
Registrace v obchodním rejstříku Krajského soudu v Ostravě, oddíl C, vložka 30879**Redakce / Editorial Office**OCELOT s.r.o.  
Redakce časopisu Hutnické listy  
Pohraniční 693/31, 706 02 Ostrava-Vítkovice  
Česká republika**Vedoucí redaktor / Chief Editor**Mgr. Šárka Seidlerová  
tel.: +420 731 181 238  
e-mail: seidlerovas@seznam.cz**Technický redaktor / Technical Editor**Ing. Jan Počta, CSc.  
tel.: +420 596 995 156  
e-mail: j.poceta@seznam.cz**Grafický redaktor / Graphic Editor**Ing. Dana Horáková  
tel.: +420 777 047 666  
e-mail: hutnicke.listy@seznam.cz**Tisk / Printing**Printo, spol. s r.o.  
Gen. Sochora 1379  
708 00 Ostrava-Poruba**Grafika titulní strany / Graphic design of the title page**

Miroslav Juřica, e-mail: grafik@konstrukce.cz

**Podkladová fotografie / Underlying photograph**

Mgr. Viktor Mácha, e-mail: viktor.macha@centrum.cz

**Redakční rada – Předseda / Editorial Board – Chairman**

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.

VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, Česká republika

**Členové / Members**Ing. Michal Baštinský  
Ing. Karel Hala  
prof. dr. hab. inž. Leszek Blacha  
prof. dr. hab. inž. Henryk Dyja  
prof. Ing. Vojtěch Hrubý, CSc.  
Ing. Henryk Huczala  
prof. Ing. František Kavička, CSc.  
Ing. Ludvík Martínek, Ph.D.  
prof. Ing. Karel Matocha, CSc.  
prof. Ing. Ludovít Parířák, CSc.  
Ing. Jiří Petřela, Ph.D.  
Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D.  
Ing. Vladimír Toman  
prof. Ing. Karel Tomášek, CSc.  
Ing. Zdeněk Vašek, Ph.D.EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s., Ostrava, Česká republika  
U. S. Steel Košice, s.r.o., Košice, Slovenská republika  
Politechnika Śląska, Katowice, Polsko  
Politechnika Częstochowska, Częstochowa, Polsko  
Univerzita obrany, Brno, Česká republika  
TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Třinec, Česká republika  
Vysoké učení technické v Brně, Brno, Česká republika  
ŽĐAS, a.s., Žďár nad Sázavou, Česká republika  
VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, Česká republika  
ŽP VVC s.r.o., Podbrezová, Slovenská republika  
VÍTKOVICE, a.s., Ostrava, Česká republika  
MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Ostrava, Česká republika  
Hutnictví železa, a.s., Praha, Česká republika  
Technická univerzita v Košiciach, Slovenská republika  
ArcelorMittal Ostrava, a.s., Ostrava, Česká republika

Abstrakty hlavních článků jsou publikovány v české, slovenské a anglické verzi na webových stránkách Hutnických listů.

Časopis vychází 6x ročně. Cena jednotlivého čísla 200 Kč. K ceně se připočítává DPH. Roční předplatné základní 1190 Kč, studentské 20 % sleva proti potvrzení o studiu. K předplatnému se připočítává poštovné vycházející z dodávek každému odběrateli. Po dohodě se zahraničními odběrateli je možno stanovit cenu v Euro (€) jako souhrnnou včetně poštovného. Předplatné se automaticky prodlužuje na další období, pokud je odběratel jeden měsíc před uplynutím abonentního období písemně nezruší prostřednictvím listinné nebo elektronické pošty. Objednávky na předplatné přijímá redakce nebo SEND Předplatné, spol. s r.o., Ve Žlíbku 1800/77, hala A3, 193 00 Praha 9-Horní Počernice, Česká republika (+420 225 985 225, send@send.cz). Informace o podmínkách publikace, inzerce a reklamy podává redakce.

Za původnost příspěvků, jejich věcnou a jazykovou správnost odpovídají autoři. Podklady k tisku redakce přijímá v elektronické podobě. Recenzní posudky jsou uloženy v redakci. Žádná část publikovaného čísla nesmí být reprodukována, kopírována nebo elektronicky šířena bez písemného souhlasu vydavatele.

© OCELOT s.r.o., 2017

Časopis je zařazen Radou vlády ČR pro výzkum a vývoj do seznamu recenzovaných neimpaktovaných periodik vydávaných v ČR a do mezinárodní databáze CSA Materials Research Database with METADEX, spravované firmou ProQuest, USA.

Abstracts of the main articles are published in Czech, Slovak and English version at the web site of the Metallurgical Journal. The journal is published 6 times a year. Price of a single issue is CZK 200 without VAT. Net price of basic annual subscription is CZK 1190, student have 20% discount against the confirmation of study. Forwarding cost (postage) is added to the net price of subscription. Upon agreement with the foreign customers the subscription price, including postage, can be paid in Euro. Subscription is automatically renewed for the next year, unless the customer does not cancel it at the latest one month before the expiry of the subscription period in writing or by electronic mail. Orders are to be sent to the Editorial Office or SEND Předplatné, spol. s r.o., Ve Žlíbku 1800/77, hala A3, 193 00 Praha 9-Horní Počernice, Czech Republic (+420 225 985 225, send@send.cz). Editorial Office provides also information on the conditions of publication of articles and on conditions of advertising.

The authors bear the responsibility for the originality of their articles and for their factual and linguistic accuracy. Editorial Office accepts the articles in electronic form. Peer reviews are archived in the Editorial Office. No part of the published issues may be reproduced or electronically distributed without written permission of the publisher.

© OCELOT s.r.o., 2017

The journal was included by the Government Council for Research and Development of the Czech Republic into the list of non-impacted peer-reviewed journals published in the Czech Republic. Abstracts of its articles make part of the international database "CSA Materials Research Database with Metadex", administered by the database centre ProQuest, USA.

## Obsah / Content

### Recenzované vědecké články / Peer-reviewed Scientific Papers

- prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.; prof. Ing. František Kavička, CSc.; doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.* 4  
*Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.; Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.*  
Numerical Off-line Model of Temperature Field of a Continuously Cast Billet and its Preparation  
Numerický off-line model teplotního pole plynule odlévaného sochoru a jeho příprava
- prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.; prof. Ing. František Kavička, CSc.; doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.* 18  
*Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.; Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.*  
Dynamic On-line Model of Temperature Field for Continuous Steel Billet Casting and its Integration into the Control System of the Caster  
Dynamický on-line model teplotního pole plynule odlévaného ocelového sochoru a jeho začlenění do řídicího systému ZPO
- prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.; prof. Ing. František Kavička, CSc.; doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.* 29  
*Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.; Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.*  
Parametric Study of Continuously Cast Steel Billet 150 × 150 mm  
Parametrická studie plynule litého ocelového sochoru 150 × 150 mm
- Ing. Ivana Kroupová; Ing. Filip Radkovský; doc. Ing. Petr Lichý, Ph.D.* 40  
Casting Technologies of Manufacturing of Metallic Foams and Possibilities of Their Use as a Heat Exchanger  
Slévárenské technologie výroby kovových pěn a možnosti jejich využití coby výměníku tepla

### Recenzované výzkumné články / Peer-reviewed Research Papers

- Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D.; Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.; Ing. Jana Kosňovská* 47  
*Ing. Šárka Štefanišínová; doc. Ing. Ladislav Socha, Ph.D.; prof. Dr. Ing. René Pyszko*  
Effect of Cooling of the Ingot on its Macro-structural and Chemical Heterogeneity  
Vliv intenzivního chlazení ingotu na jeho makrostrukturu a chemickou heterogenitu
- Ing. Vladislav Šťastný; doc. Ing. Jiří David, Ph.D.* 58  
Hodnocení povrchu desek krystalizátoru s využitím znalostního systému  
Evaluation of Surface of the Mould Plates with the Use of the Knowledge System

### Informační články / Informative Articles

#### Zprávy z HŽ, a.s. / Information of HŽ, a.s.

- Ing. Ludvík Vala* 61  
Meziroční porovnání měsíčních a postupných hutních výrob roku 2017 a 2016

#### Z hospodářské činnosti podniků, institucí a řešitelských pracovišť / Professional Periodical for Metallurgy and Material Engineering

- Ing. Tomáš Grulich* 63  
Realizace nové výrobní linky pro válcování a tvarování listů parabolických pružin  
Building of New Production Line for Taper Rolling and Forming of Leaves for Parabolic Springs

<i>Daniel Urban</i>	65
Transformace Hutnictví železa na Ocelářskou unii	
<i>Daniel Urban</i>	65
Růst produkce oceli táhl export, pokles cen znamenal pro oceláře snížení tržeb o 5,4 %	
<b>Ze života škol / Information on Activities of Universities</b>	
Zmena názvu Hutníckej fakulty na Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie	68
International Studnets´ Day of Metallurgy 11. – 13. května 2017 – ISDM 2017	69
Kvízy ze slévárenství obohatily program Festivalu v ulicích v Ostravě	69
<b>Výstavy, veletrhy, konference / Exhibitions, Fairs, Conferences</b>	
Mezinárodní konference NanoOstrava již po páté	70
27. ročník mezinárodní vědecké konference IRON AND STEELMAKING se uskuteční začátkem října v Beskydech	70
<b>Hutnictví ve světě / Metallurgy in the World</b>	71
<b>Historický seriál / Historical Serial</b>	
<i>Ing. Ladislav Jílek, CSc.</i>	76
Historie výroby kovů a její obraz v bibli. 5. část: Speciální technologie	
<b>Dodavatelé příspěvků ve všeobecné části</b>	
● VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství ● Vysoké učení technické v Brně ● MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. ● HŽP a.s. ● Hutnictví železa, a.s. (od 1. 6. 2017 Ocelářská unie a.s.) ● redakce	
<b>Inzerce</b>	
● FMMI VŠB-TU Ostrava ● Centrum nanotechnologií, VŠB-TU Ostrava	

# Recenzované vědecké články

## Numerical Off-line Model of Temperature Field of a Continuously Cast Billet and its Preparation

### Numerický off-line model teplotního pole plynule odlévaného sochoru a jeho příprava

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.; prof. Ing. František Kavička, CSc.; doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.; Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.; Ing. Lubomír Klímeš, Ph.D.

Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Energy Institute, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Czech Republic

*The paper is concerned with fundamental analytical and empirical knowledge about the solidification of continuously cast steel billets having a square cross-section. Solidification and cooling of this billet and the heating of the mould is a very complicated problem of transient heat and mass transfer. The solving of such a problem is impossible without numerical model of the temperature field, not only of the concasting itself, while it is being processed through the caster but of the mould as well. An original 3-D numerical off-line model of the temperature field of a billet has been developed and presented there. The model is based on an explicit finite difference method and it solves for a solution of the Fourier-Kirchhoff partial differential equation. The latent heat of phase changes is incorporated into the model by means of the enthalpy method. The preprocessing mainly includes a complicated definition of boundary conditions, especially in the secondary cooling zone, and the determination of thermo-physical steel properties as functions of the temperature. The dependence of input data (thermo-physical properties and boundary conditions) on the temperature in a particular location on the billet makes the problem highly nonlinear.*

**Key words:** continuously cast billet; temperature field; discretization; initial and boundary conditions; thermo-physical properties; experimental measurement; simulation; numerical model; off-line and on-line version

Článek uvádí základní analytické a empirické poznatky o procesu tuhnutí ocelového předlitku čtvercového profilu (sochoru) v zařízení pro plynulé odlévání oceli (ZPO). Předkládá dále základ originálního 3D modelu nestacionárního teplotního pole plynule litého sochoru a jeho přípravu. Vlastní model je založen na explicitní numerické metodě konečných diferencí. Řeší parciální diferenciální Fourier-Kirchhoffovu rovnici druhého řádu. Simulace vývinu skupenských tepel fázových nebo strukturních přeměn je provedena zavedením termodynamické funkce entalpie. Příprava zahrnuje především obtížnou a časově velmi náročnou definici okrajových podmínek řešení a zjištění hodnot hlavních termofyzikálních vlastností odlévaných ocelí, které jsou výrazně závislé na teplotě. Ke stanovení termofyzikálních vlastností model využívá finského modelu IDS. Jejich funkční závislost i závislost okrajových podmínek na teplotě povrchu předlitku v daném místě ZPO znamená, že numerický model musí řešit silně nelineární úlohu přenosu tepla. Komplikovaná je především definice okrajových podmínek v sekundární chladicí zóně. Na sochorovém ZPO se používá velké množství trysek s různým nastavením. Koeficienty přestupu tepla pod tryskami je proto třeba měřit na speciálním laboratorním zařízení. Posun předlitku je modelován pohybem trysky podél ocelové desky simulující povrch předlitku. Chladicí účinek trysky se posuzuje podle vyhodnoceného tepelného toku, který tryska odvádí z chlazeného povrchu. Stanovené koeficienty přestupu tepla pod tryskou skokem narůstají při dosažení tzv. Leidenfrostovy povrchové teploty. Předkládaný model má grafický vstup i výstup, automatickou tvorbu výpočtové sítě a znázornění teplotního pole ve formě izoterem, izoploch konstantní teploty a znázornění teplotní historie jakéhokoli bodu příčného řezu sochohem při jeho průchodu ZPO. Řeší teplotní pole ZPO jako celku nebo jeho vybrané části.

**Klíčová slova:** plynule litý sochor; teplotní pole; diskretizace; počáteční a okrajové podmínky; termofyzikální vlastnosti; experimentální měření; simulace; numerický model; off-line a on-line verze

The dynamic model of solidification [1] was created at Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and registered under the name Brno Dynamic Solidification Models (BrDSM) and under the

EU trademark 015723893. Since 2003 it was successfully integrated into the control system of the control system for continuous casting machine for slabs (CCM) at the steelworks VÍTKOVICE STEEL a.s. [2 - 5]. During the collaboration on the project of the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic entitled "Research, development, and introduction into the production of a dynamic model of control of technology for continuous casting of billets" for the steelworks Třinecké železářny a.s., this model was also successfully developed for the solution of the unsteady temperature field of the billet as a square blank it and was included in the control system for the billet continuous casting machine No. 2 (CCM2) in Třinecké železářny, a.s. [6]. Progress during the project solution pointed to the significant differences between the modelling of the continuous casting of slabs and billets. Therefore, a new numerical model, including a new software product, had to be developed for the billet CCM. The team of authors summarises the progress of the project solution and its main results in three articles for the Hutnické listy journal.

### 1. Original temperature model of billet on the radial continuous casting machine (CCM)

The presented 3D model of the unsteady temperature field of continuously cast blank for the billet CCM, with dimensions of the square profile  $150 \times 150$  mm (Fig. 1), was first developed for a slab CCM as an off-line version [2] and then as an on-line in order to enable work in real time. This is its uniqueness, although this is a 3D model. Thanks to the universality of the code, it is

possible to use it for any billet CCM after modification and tuning. Numerical model solves the temperature field of the entire continuously cast blank (from the molten steel meniscus in the mould to the flame cutting machine) on a 3D mesh with a number of nodes exceeding  $2.5 \cdot 10^6$ . Solidification and cooling of the continuously cast blank during its passage through the entire CCM is a complex problem of 3D unsteady heat and mass transfer. We assume from all types of heat transfer in the moving continuously cast blank, the decisive one is the conduction described by the Fourier-Kirchhoff partial differential equation (1) of the second order, comprising a member of the internal heat source (development of internal latent heats of phase transformation, or of structural transformations) and members describing the thermal flow of the molten steel running at flow rate  $w$ :

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho \cdot c = \left( w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}_{\text{source}}, \quad (1)$$

where  $\rho$  is the density ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $c$  is specific heat capacity ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $T$  is temperature (K),  $\tau$  is time (s),  $k$  is thermal conductivity ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $x, y, z$  are Cartesian coordinates (m),  $w$  is speed of casting of steel, ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\dot{Q}_{\text{source}}$  is volume heat flow from inner source (latent heats of phase and structural transformations) ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ). An explicit numerical method of finite differences is used for solution of the equation (1).

Fig. 2 shows the heat balance of the elementary volume representing the common node of the mesh ( $i, j, k$ ).

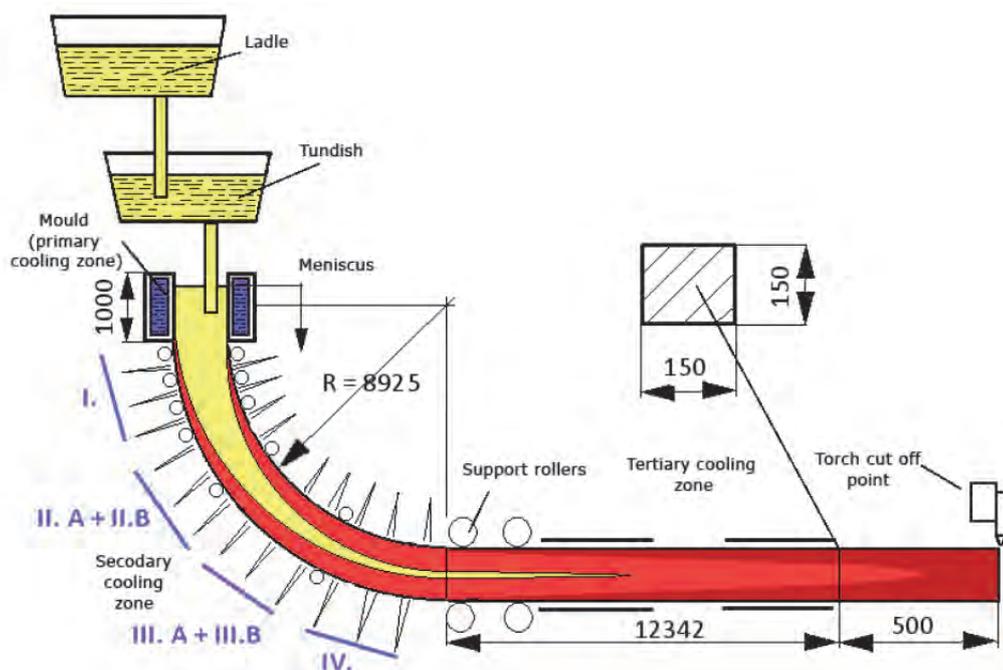


Fig. 1 Billet caster and basic concepts  
Obr. 1 Sochorové ZPO a základní pojmy

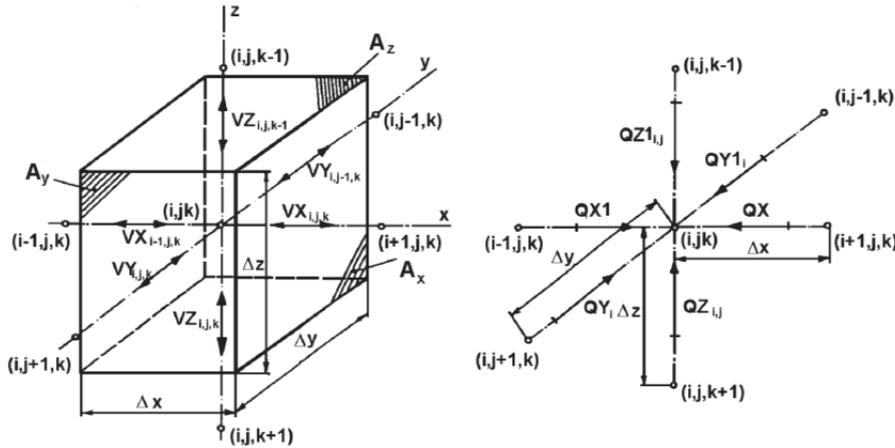


Fig. 2 Thermal balance diagram of the general nodal point of the network  
Obr. 2 Schéma tepelné bilance obecného uzlu výpočtové sítě

For example, the parameter  $VX$  ( $W \cdot K^{-1}$ ) in the  $x$ -axis direction can be written as follows:

$$VX_{i,j,k} = k_i \frac{A_x}{\Delta x} \quad VX_{i-1,j,k} = k_{i-1} \frac{A_x}{\Delta x} \quad (2)$$

where  $A_x$  is according to Fig. 2 a plane perpendicular to the direction of the  $x$ -axis

The heat fluxes  $QX$  and  $QX1$  (W) in the direction of the  $x$ -axis are

$$QX = VX_{i,j,k} (T_{i+1,j,k}^{(\tau)} - T_{i,j,k}^{(\tau)})$$

$$QX1 = VX_{i-1,j,k} (T_{i-1,j,k}^{(\tau)} - T_{i,j,k}^{(\tau)}) \quad (3)$$

The thermal balance of the elementary node of dimensions  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  are then described by the equation (4)

$$\left( QZ1_{i,j} + QZ_{i,j} + QY1_i + QY_i + QX1 + QX \right) = \frac{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \rho \cdot c}{\Delta \tau} (T_{i,j,k}^{(\tau+\Delta\tau)} - T_{i,j,k}^{(\tau)}) \quad (4)$$

in which the right side expresses heat accumulation (heat drop) in the node  $i, j, k$  for the time step  $\Delta\tau$ . The unknown temperature of the general node of the computational mesh at the next time point  $(\tau + \Delta\tau)$  is therefore given by an explicit formula:

$$T_{i,j,k}^{(\tau+\Delta\tau)} = T_{i,j,k}^{(\tau)} + \frac{\Delta \tau}{c \cdot \rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z} (QZ1_{i,j} + QZ_{i,j} + QY1_i + QY_i + QX1 + QX) \quad (5)$$

The temperature field of the billet passing through the radial CCM with a large arc radius can be described in a simplified manner by the Fourier-Kirchhoff equation, which takes into account only the vector component of speed  $w_z$  in the direction of the billet movement through

individual CCM zones. Equation (1) is reduced to this notation:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho \cdot c \cdot w_z \frac{\partial T}{\partial z} + \dot{Q}_{source} \quad (6)$$

The equation (6) must describe the temperature field of the continuously cast blank in all its three stages: above the liquidus temperature (melt), in the interval between the liquidus and solidus temperatures (so-called mushy zone) and also below the solidus temperature (solid phase). It is therefore appropriate to introduce the thermodynamic function of the temperature-dependent specific volumetric enthalpy  $H_v = c \cdot \rho \cdot T$  ( $J \cdot m^{-3}$ ) in order to simulate latent heats of the phase and structural transformations. These are included in the enthalpy.

Thermal conductivity  $k$ , specific heat capacity  $c$  and density  $\rho$  are thermo-physical properties, which are also functions of temperature. Equation (6) is transformed into the following notation:

$$\frac{\partial H_v}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + w_z \frac{\partial H_v}{\partial z} \quad (7)$$

The heat balance of the elementary node is now given by the equation (8):

$$\left( QZ1_{i,j} + QZ_{i,j} + QY1_i + QY_i + QX1 + QX \right) = \frac{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{\Delta \tau} (H_{v_{i,j,k}}^{(\tau+\Delta\tau)} - H_{v_{i,j,k}}^{(\tau)}) \quad (8)$$

The heat flow  $QZ_{i,j}$  must this also include an enthalpy of the inflow volume of melt per second

$$QZ_{i,j} = VZ_{i,j,k} (T_{i,j,k+1}^{(\tau)} - T_{i,j,k}^{(\tau)}) - A_z w_z H_{v_{i,j,k}}^{(\tau)} \quad (9)$$

The unknown enthalpy of the node in the next time point  $(\tau + \Delta\tau)$  is given by an explicit formula of an analogous equation (5):

$$H_{v_{i,j,k}}^{(\tau+\Delta\tau)} = H_{v_{i,j,k}}^{(\tau)} + (QZ1_{i,j} + QZ_{i,j} + QY1_i + QY_i + QX1 + QX) \frac{\Delta\tau}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \quad (10)$$

As it is evident from the equation (10), a new value of enthalpy is calculated in each time step. For calculations of the members corresponding to the heat flows, it is also necessary to know the temperature values of the previous time step. Therefore, it is necessary for each control volume and for each time step to convert the enthalpy value to a temperature. The enthalpy function is not known as an analytical function, but as a set of tabular values, so regressive determination of temperature is a numerically challenging task. The calculation is performed quickly. Therefore, we chose a method, in which the enthalpy values were read and interpolated in the interval of 0.1 °C before the start of the calculation, i.e. before the start of casting of the new heat. Determination of the temperature for the relevant enthalpy is then during the calculation performed by modern search methods [7].

## 2. Spatial and temporal discretisation, initial and boundary conditions

For the solution of parabolic differential equations (1), or (10), different numerical methods are used [2]. For the solution, the method of control volumes was chosen as the most efficient way to thoroughly resolve the 3D system in real geometry with the knowledge of the already mentioned strong non-linearity of the solved

equation. The principle consists in the division of the body into the so-called control volumes, which can be of different sizes and shapes according to the user's requirement concerning the mesh density, and which thus may affect the accuracy of the solution. After the division of the domain into the control volumes, a heat balance equation is compiled for each volume. Namely, the application of the basic physical energy conservation law allows continuous expansion and tuning of the model with more physical phenomena.

Fig. 3 presents a selection of the coordinate system and the diagram of the computation mesh [8]. Solution deals with the symmetrical half of the billet cross-section from the molten steel level in the mould to the flame cutting/burning machine (Figs. 1 and 3). The coordinate system is chosen so that the start is located at half the width of the billet on a small radius,  $x$  is in the width direction,  $y$  is in the height direction, and  $z$  is in the direction of casting. The advantage of this option is that all coordinates are positive, which makes it easier to prepare software processing. In the zone of billet bending, the rectangular coordinates are transformed into cylindrical ones, i.e.  $y$  is the radius and  $z$  is the angle of rotation of the billet cross section. The calculation network is generated automatically. The developed model supports network densities as shown in Fig. 3. We chose in the  $x$ -axis direction 11 nodes, in the  $y$ -axis direction 21 nodes and in the  $z$ -axis direction 1861 nodes; the element size is  $7.5 \times 7.5 \times 15$  mm and the number of nodes in the network is 573 594. This calculation network allows real-time operation of the model, i.e. the calculation time is the same or even shorter than the time of casting.

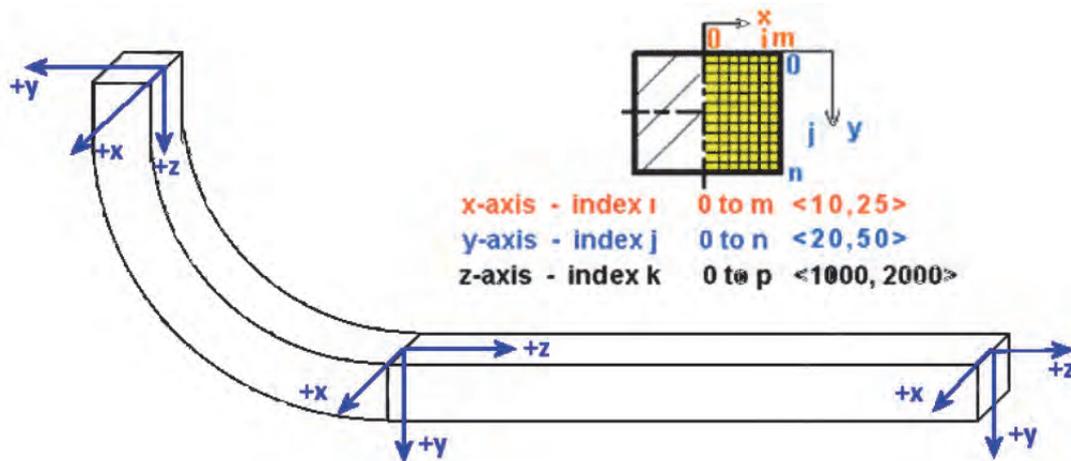


Fig. 3 Scheme of the network and the definition of the coordinate system  
Obr. 3 Schéma výpočtové sítě a definice souřadného systému

The initial condition for the solution is the temperature at individual points of the calculation mesh. A suitable value is the highest possible temperature, i.e. the casting temperature. An explicit finite difference method is used to solve the model. It follows from its principle that the stability of the calculation depends on the size of the time step. In the model, the method of adaptive change

of the calculation step is implemented, i.e. the user-specified calculation step is considered as recommended and the software changes it during the calculation.

The diagram in Fig. 4 shows the distribution of the boundary conditions to the zone of the mould (primary cooling zone), the secondary and the tertiary cooling zone. It is not possible to set different cooling around

the section in the tubular mould or under the water nozzles, i.e. not on a small or a large radius or on both sides. A number of the support rollers are much smaller than on the slab CCM and virtually no heat flow escapes through them. Even for boundary conditions, their

dependence on the continuously cast blank surface temperature is respected. Therefore, the non-linearity of the task is even more intensified. The process of billet cooling in all three cooling zones differs from the cooling of slabs on the slab CCM [2, 3, 13].

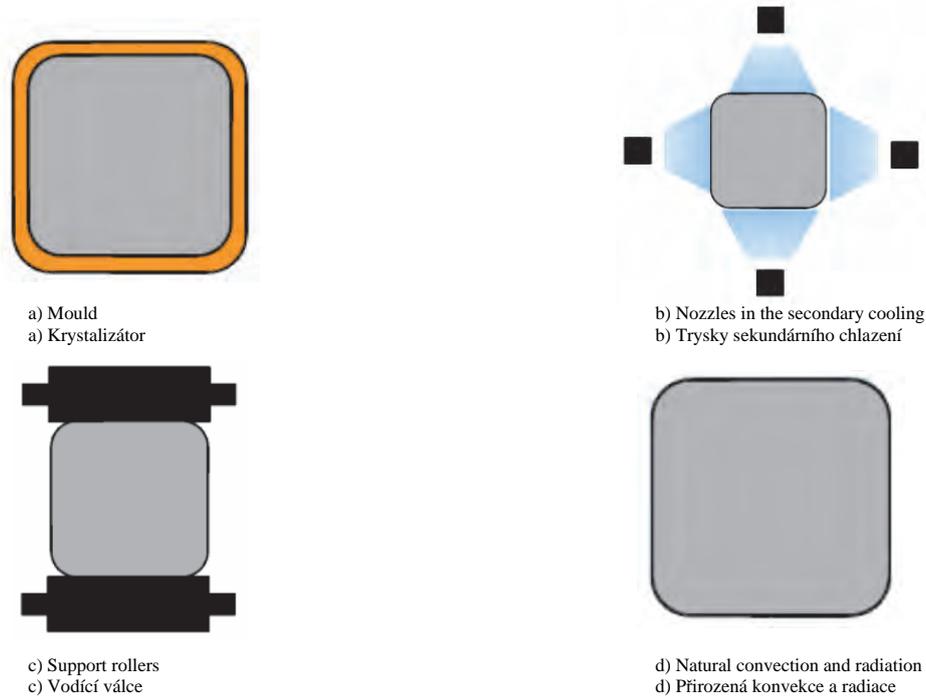


Fig. 4 Diagram of the boundary conditions in different places of a billet caster  
Obr. 4 Schéma okrajových podmínek v různých místech sochorového ZPO

Due to the fact that the task can be according to Figs. 3 and 4 considered axially symmetrical, it is sufficient to solve only half of the cross-section, that is why the definition of the boundary conditions is described by equations (11a) to (11e).  $T_{\text{cast}}$  is the casting temperature,  $T_{\text{surface}}$  and  $T_{\text{amb}}$  are the surface temperature of the billet and the ambient temperature,  $n$  is normal line to the billet surface,  $\sigma$  is the Stefan-Boltzmann constant,  $\varepsilon$  is the emissivity (relative radiance),  $k$  is the thermal conductivity,  $q$  is the heat flow and  $h_{tc}$  is the heat transfer coefficient (convection).

$$1. T = T_{\text{cast}} \quad \text{molten steel level} \quad (11a)$$

$$2. -k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad \text{plane of symmetry} \quad (11b)$$

$$3. -k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{tc} \cdot (T_{\text{surface}} - T_{\text{amb}}) \quad \text{in the mould} \quad (11c)$$

$$4. -k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{tc} \cdot (T_{\text{surface}} - T_{\text{amb}}) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{\text{surface}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad \text{in the secondary and tertiary zone} \quad (11d)$$

$$5. -k \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad \text{under guide rolls} \quad (11e)$$

## 2.1 Tubular mould

The walls of the tubular mould (Fig. 5) are cooled by one cooling circuit, in which the temperature difference

of the inlet and outlet water and the flow of water are measured. Control system for mould cooling maintains a constant water flow rate specified by the operator.

The issue of boundary conditions in the mould is so complex that it requires an implementation of a proprietary model that must be tuned on the basis of operating data from experimental temperature measurements in the mould walls by thermocouples and from the measurement of temperatures under the mould by pyrometers. It is possible to determine an average heat flow dissipated from the mould [6]. Its value must be consequently separated to individual walls along their height and width.

### Method of calculating heat flows on the mould wall

The diagram of the tubular mould and location of the thermocouples in its wall is shown in Fig. 5. Fig. 6 shows an example of the measured temperatures. These diagrams represent the time interval of one heat for steel grade TERMEX-1. It is evident from the diagrams that the measured values cannot be directly used in the calculation of heat flows, but they must be filtered (evolutions of the measured temperatures are in the diagram plotted with a thick line).

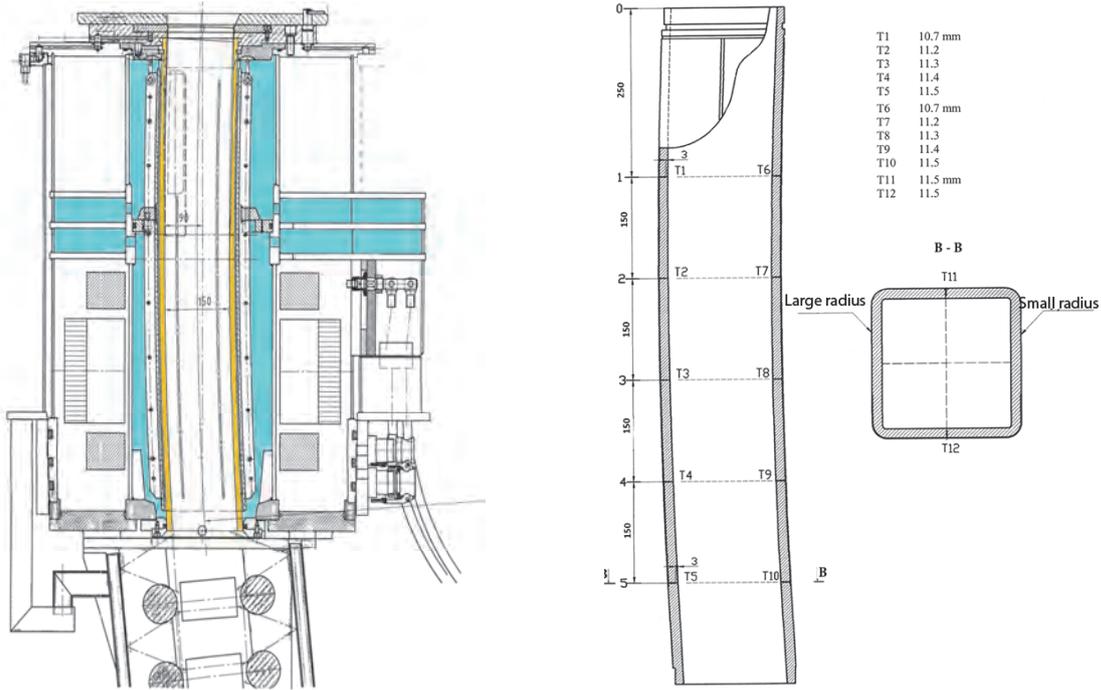


Fig. 5 Diagram of the tubular mould and position of thermocouples  
Obr. 5 Schéma trubkového krystalizátoru a umístění termočlánků

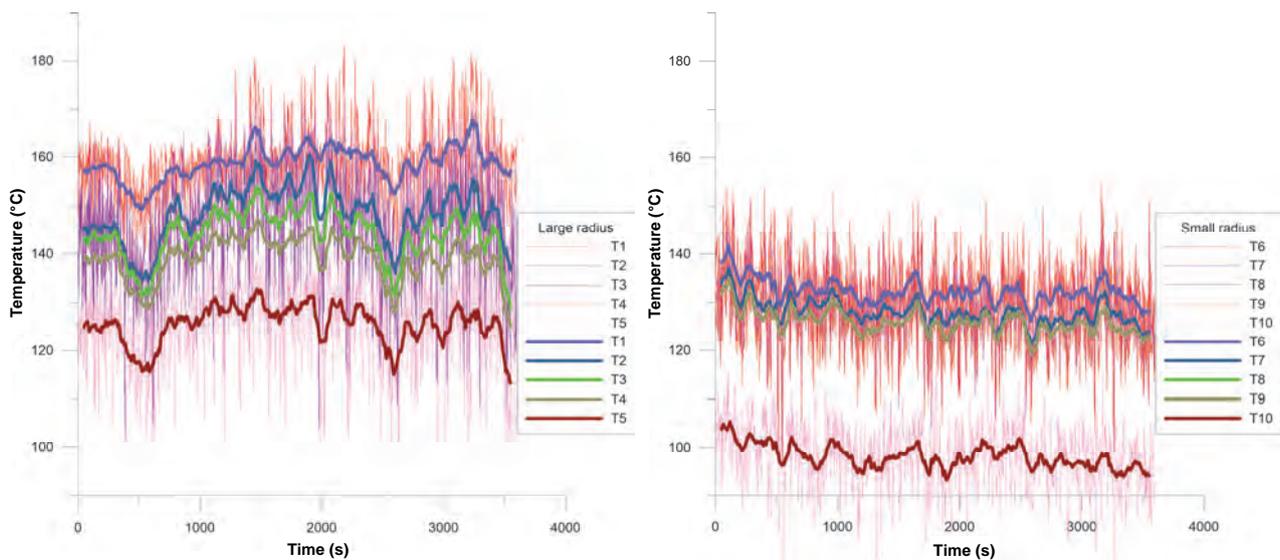


Fig. 6 Examples of measured temperatures in the mould wall  
Obr. 6 Příklady změřených teplot ve stěně krystalizátoru

Fig. 7 shows a simplified diagram of the mould heat balance and a diagram of wall temperature measurement using thermocouples [6]. The distance of the measuring point of the thermocouple  $\delta_b$  from the mould inner wall is 3 mm. The heat balance is solved for five sections of the mould chosen in a way that the thermocouples are positioned vertically and approximately in their centre. The basic prerequisite for this solution is that equality of the heat outputs from the cooling water flow and heat passage is ensured not only for the whole mould, but also for all five calculation sections. The same value of the heat transfer coefficient on the side of the cooling water in all sections is assumed for the calculation. It requires solution of a system of equations.

The value of the heat transfer coefficient  $htc_w$  on the mould outside wall (on the side of the cooling water), chosen for the heat balance calculations, must correspond, with a certain tolerance, to the calculation value of this quantity from the usual criteria dependences for water flow through the channel of the annular cross section (mould shell). For example, this coefficient for the flow rate of  $1665 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  is approximately  $30,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ .

The heat transfer is solved for the surfaces of the mould inner wall, the surface which depends on the height of the respective section 1 to 5, separately on the big and small radii of the billets bending and on both its side

walls. At the section 1, the height depends on the distance of the liquid metal level from the mould upper edge  $h_{level}$ . The diagram in Fig. 7 shows evolutions of the specific heat flows along the mould height on the big and small radii of the mould during casting of the steel grade TERMEX-1. It is an example of the approach presented here of determining the boundary conditions in the mould from the measured temperatures in the walls of the tubular insert and from the temperature difference of the cooling water and its flow. In this way, over 280 different heats were processed. The obtained results were correlated with the following influences: carbon content in the cast steel, contraction of cast steels, casting speed, electromagnetic stirring in the mould, type of casting powder, negative strip size, molten steel level in the mould, etc.

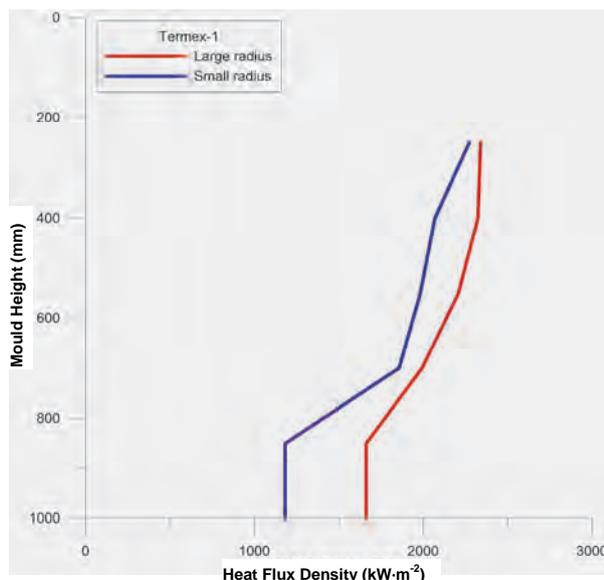
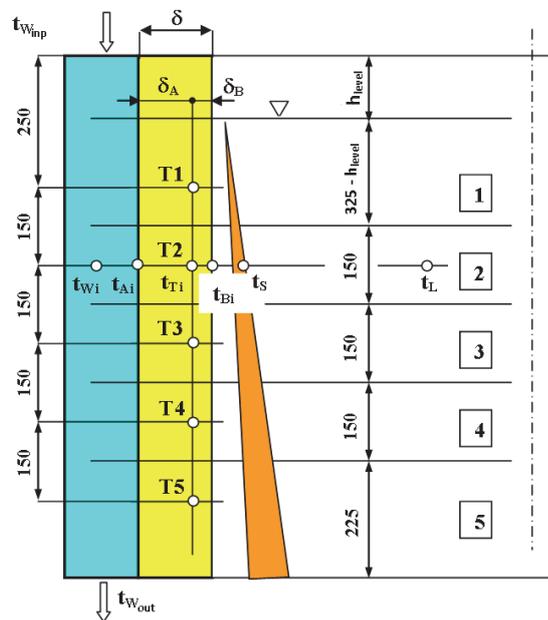


Fig. 7 Diagram of the heat balance of a mould and of calculated heat flows

Obr. 7 Schéma tepelné bilance krystalizátoru a vypočtených tepelných toků

## 2.2 Determination of heat transfer coefficients in the secondary and tertiary zones

The boundary conditions in the secondary cooling area are illustrated in Fig. 8. It is apparent that the boundary conditions must be defined for three different characteristic surfaces of the continuously cast blank according to their position relative to the roll and reach of the spray nozzle. Cooling by water nozzles has critical influence. Therefore, a great deal of attention must be given to the determination of the appropriate heat transfer coefficient under the nozzle (forced convection).

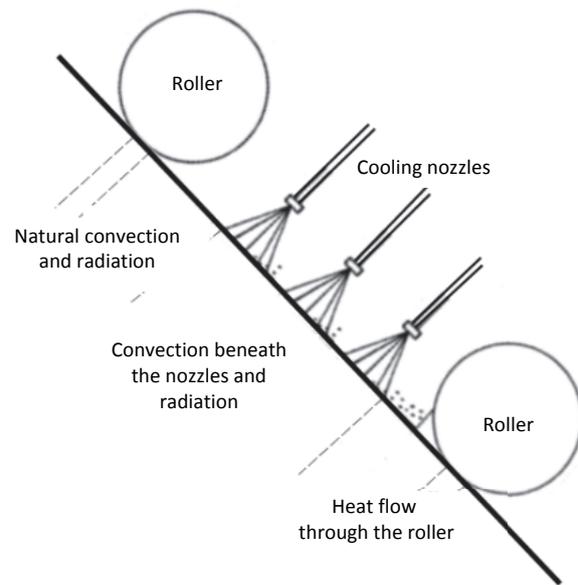


Fig. 8 Diagram of cooling in the secondary zone  
Obr. 8 Schéma chlazení v sekundární zóně

### 2.2.1 Heat transfer coefficients under the cooling nozzles

Commercially used temperature field models describe the heat transfer coefficients under the nozzles as a function of the incident amount of water per unit of area. They are based on a variety of empirical relationships. We cannot recommend this approach. In the presented model, the heat transfer coefficients are obtained by measuring the spray characteristics of all the nozzles used on the CCM in the so-called hot-plate model (Fig. 9) in the Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory at Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering [9, 10], for a sufficient range of operating pressures of water and sufficient range of the casting speed.

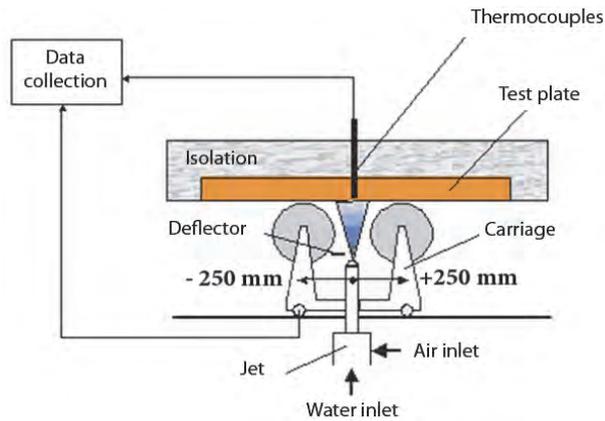


Fig. 9 Laboratory device simulating the process of cooling  
Obr. 9 Laboratorní zařízení k simulaci chladicího procesu

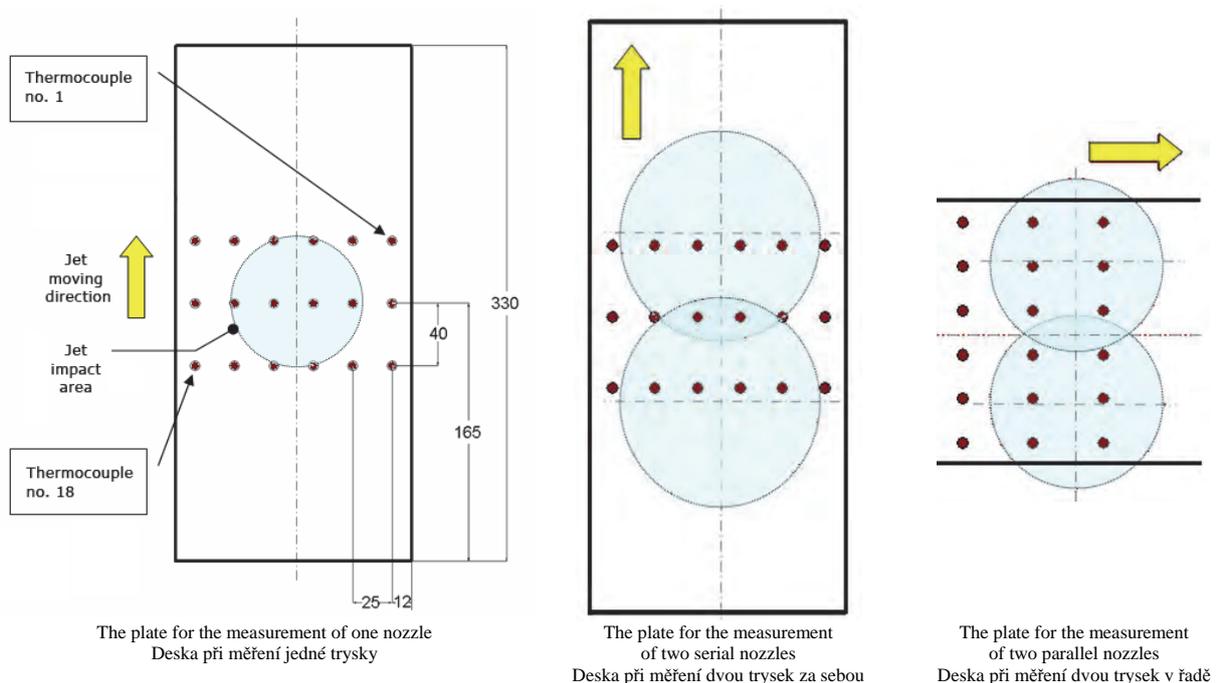


Fig. 10 Diagram of the layout of thermocouples on the model plate  
Obr. 10 Schéma rozmístění termočlánků na modelové desce

The steel plate with thermocouples is mounted in the holder. The plate is electrically heated. During the experiment, a nozzle with a motion mechanism is inserted under the plate (the heater is at this time removed). During the experiment, water is pumped into the nozzle from the reservoir by a pump. The water pressure is measured before entering the nozzle. The temperature of the water and the temperature inside the plate are monitored by a computer measurement system. Examples of the layout of the measuring points on the plate are shown in Fig. 10. Square dimensions of the measuring plate are  $330 \times 150$  mm, the thickness is 24 mm. Eighteen thermocouples (diameter 1.5 mm, type K) are built into the plate. The set of thermocouples measures the temperature at a depth of 2.5 mm (measured from the cooled surface). The top surface of the plate is insulated. The bottom of the plate is cooled. The nozzle

(or nozzles) are placed on a movable support. Due to the fact that the casting machine is operated at a large range of casting speeds, the experiments were performed for casting speeds of  $1.5$  and  $4.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . In this way, more experiments were performed for each nozzle for different water flows.

From the heat transfer coefficients, a database of boundary conditions is constructed, from which the interpolation model determines the respective heat transfer coefficient under the nozzle for the desired temperature of the surface of the continuously cast blank, the operating pressure of the water and the desired casting speed. The temperature of the water in the secondary zone is entered into the model as an ambient temperature  $T_{\text{amb}}$  under the nozzles, the ambient is entered into the model as an ambient temperature

[11]. This approach represents a unique combination of experimental measurements in laboratories with a numerical model for calculating non-linear boundary conditions under a cooling nozzle.

Due to the fact that control of secondary cooling is performed by regulation of water flow and not by regulation of its pressure, the functions water, flow-water pressure were set for all the nozzles according to the manufacturer's laboratory model, in order to set for the experiments the pressure corresponding to the flow in the zone:

$$\dot{m} = \sqrt{p} \cdot k \quad p = \frac{\dot{m}^2}{k^2} \quad (12)$$

where  $p$  is water pressure (MPa),  $\dot{m}$  is water flow ( $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ ) and  $k$  is nozzle constant.

For each point of the calculation mesh, we know its temperature and position relative to the nozzles. For each point on the surface, it is possible to assign a four-dimensional state space, in which the following coordinate system is introduced:  $(htc, p, w, T)$  where  $htc$  is the heat transfer coefficient ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $p$  is the water pressure (MPa),  $w$  is the casting speed ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) and  $T$  is the temperature. In this area, the heat transfer coefficient is a function of the flow, speed, and temperature, i.e.  $htc = f(p, w, T)$ . The  $f$  function is not known, only some  $htc$  coefficients are known for some flows, temperatures, and speeds. Therefore, the function  $f$  is replaced with a new function derived from the known measured values. For the calculation of relations (12) we have coefficients for the dependence of the flow and speed.

The cooling effect of the nozzle can be assessed differently, e.g. according to the maximum value of the heat transfer coefficient under the nozzle, according to the average value of the coefficient, etc. However, it seems to be most appropriate to assess it according to the value of the heat flow determined from the equation

(13), which the nozzle dissipates from the cooled surface:

$$\dot{Q} = 2 \cdot \int_0^{x_{max}} \int_{-z_{min}}^{+z_{max}} htc_{xz} \cdot (T_{surface} - T_{amb}) \cdot dx \cdot dz \quad (\text{W}) \quad (13)$$

where:

$htc_{xz}$  – heat transfer coefficient under the nozzle at the coordinates  $x$  and  $z$ ,

$T_{surface}$  – steel surface temperature; it is here considered to be constant over the whole area,

$T_{amb}$  – ambient temperature; cooling water temperature of  $20^\circ\text{C}$  is considered here.

$x_{max}$  – billet cross section size 150 mm,

$z_{min}, z_{max}$  – the interval for which the nozzle experiment was performed; typical value  $z_{min} = 260$  mm,  $z_{max} = 200$  mm.

In relation to the dependence of heat transfer coefficients on the continuously cast blank surface temperature, it is necessary to mention the so-called Leidenfrost temperature [10]. It is the surface temperature, at which the character of heat transfer significantly changes. The continuous steam layer formed on the surface at high temperatures is disrupted and the heat transfer coefficients increase by a jump. Significantly more intense drops of surface temperature during passage under the cooling nozzle also correspond to this state.

The resulting heat flows calculated according to the equation (15) for surface temperatures of 500, 700, 900 and  $1100^\circ\text{C}$ , in dependence on the water flow, are plotted in Fig. 11. Fig. 12 shows the measured values of the heat transfer coefficients processed by software of the temperature model in the form of 3D and 2D diagrams under the nozzle. These diagrams are plotted for the surface temperature of  $800^\circ\text{C}$ , for the speed of  $2.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , for the water flow of  $10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  and for two nozzles JATO 4065L.

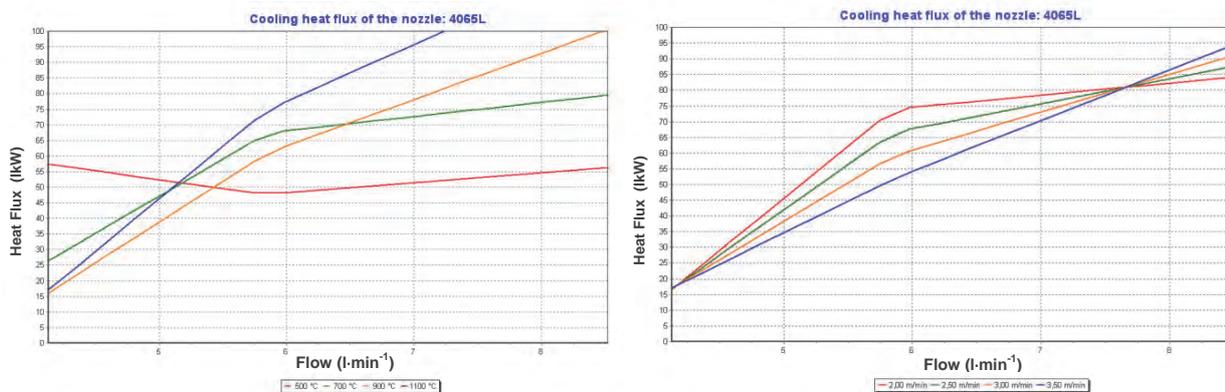


Fig. 11 Heat flow with the use of the nozzle 4065L (two serial nozzles) in dependence on the water flow rate and on the surface temperature  
Obr. 11 Odvedený tepelný tok pomocí trysky 4065L (2 trysky v řadě) v závislosti na průtoku vody a povrchové teplotě

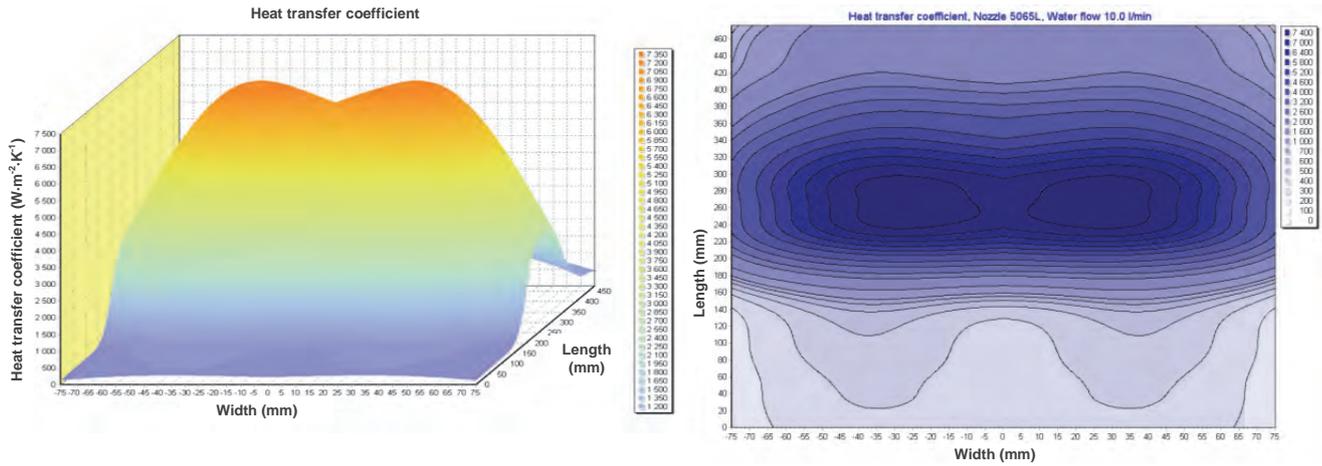


Fig. 12 Heat transfer coefficient for two serial nozzles with the water flow rate of 10 l·min<sup>-1</sup> through each nozzle  
Obr. 12 Součinitel přestupu tepla pro 2 trysky v řadě při průtoku 10 l·min<sup>-1</sup> každou tryskou

### 2.2.2 Heat transfer coefficients in the area of the rollers

The billet CCM has a small number of support rollers. Rollers in the pulling and straightening stand have more significant influence on the heat flows. The heat dissipated by the rollers in the billet CCM is, therefore, negligible (it cannot be neglected in the case of the slab CCM, though). The greater importance of the influence of rollers is caused by the fact that they separate the areas, into which the nozzles can spray. The boundary condition below the roller is therefore used also for limiting the influence of nozzle action [8].

### 2.2.3 Heat transfer coefficients in the tertiary cooling zone

A heat transfer through natural convection is considered from those parts of the continuously cast blank surface that are not cooled by the nozzles or that are not in contact with the roller. The empirical relation [12, 13] is used for the heat transfer coefficient  $htc_{nat}$ :

$$htc_{nat} = 0,84 \cdot \sqrt{(T_{surface} - T_{amb})} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}) \quad (14)$$

### 2.2.4 Heat transfer by radiation

The entire billet surface, with the exception of areas in contact with the rollers, is subject to radiation. Consequently, the reduced heat transfer coefficient from the radiation must be added to all the heat transfer coefficients discussed in the previous paragraphs, in which the relative radiation  $\varepsilon$  is considered to be a variable,  $\sigma$  is the Stefan-Boltzmann constant,  $T_{surface}$  is the surface temperature and  $T_{amb}$  is the ambient temperature

$$htc_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{surface}^2 + T_{amb}^2) \cdot (T_{surface} - T_{amb}), (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}) \quad (15)$$

Fig. 13 shows the evolution of the calculated reduced heat transfer coefficient from radiation in relation to the

variable emissivity (blue curve) according to the equation (15) and for constant relative radiation  $\varepsilon = 0.8$  (red curve).

$$\varepsilon = 0,788285 + 7,0003375 \cdot T_{surface} - 40,1785714 \cdot 10^{-8} \cdot T_{surface}^2, \quad (16)$$

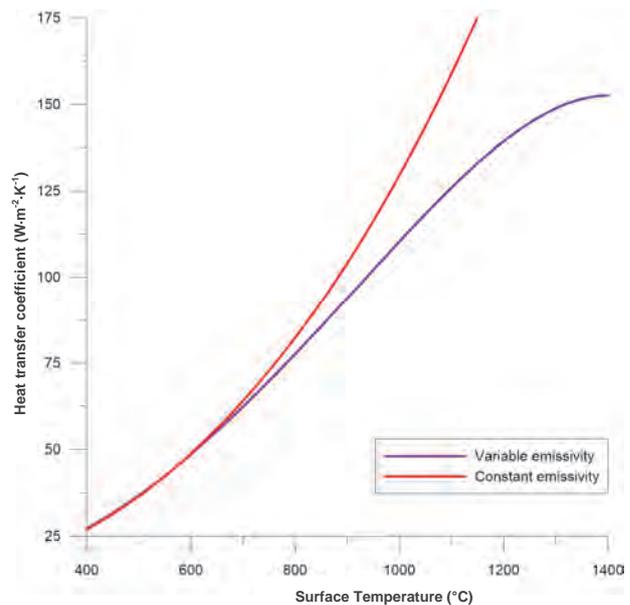


Fig. 13 Evolution of the reduced heat transfer coefficient from the radiation

Obr. 13 Průběh redukováného součinitele přestupu tepla od radiace

### 2.2.5 Total heat transfer coefficient

The total heat transfer coefficient is determined as a sum of two partial heat transfer coefficients - the heat transfer coefficient of actual heat transfer (natural or forced convection) and the reduced heat transfer coefficient from the radiation. Radiation was thus recalculated to convective heat transfer (to natural convection). The natural convection coefficient is

determined according to equation (14), the forced convection coefficient under the cooling nozzles is determined by the described laboratory measurements and the reduced coefficient is determined by the equation (15) or (16).

The flow rate of the total heat transfer coefficient, for example, on the billet side wall along the entire CCM, is shown in Fig. 14 for individual cooling zones from the

mould (Kr) to the zone IV (Fig. 1). It is also possible to evaluate the evolution of the total coefficient on the big and small radius of the billet bending [8]. The coefficient is formed by a single component only at the contact of the billet and the roller. The secondary cooling nozzles are on the CCM divided into several separate control loops, which makes it possible to form temperature field of the continuously cast blank.

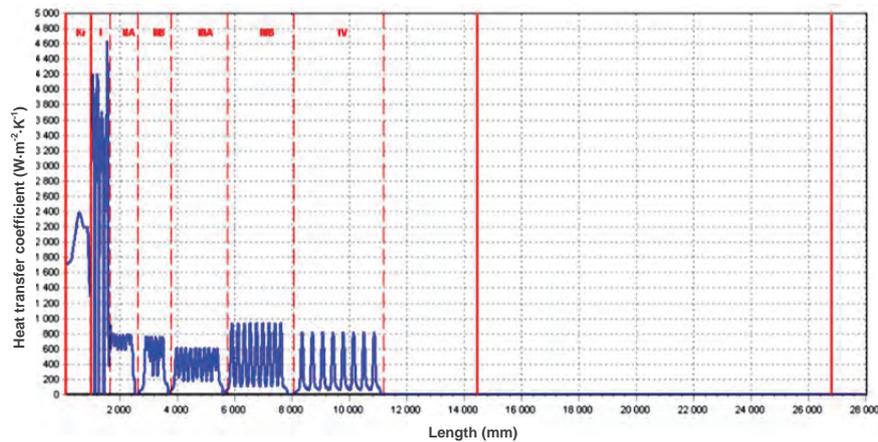


Fig. 14 Total heat transfer coefficient on the side wall along the entire caster

Obr. 14 Celkový součinitel přestupu tepla na boční stěně sochoru podél celého stroje

### 3. Thermo-physical properties of steel

Thermo-physical properties of steels belong among important parameters entering numerical models that solve the temperature field of the continuously cast blank. At application of the mentioned simulation of development of latent heats of phase and structural changes by introduction of enthalpy, it follows from the Fourier-Kirchhoff equation (1) that formation of the temperature field of the billet passing through the CCM is directly affected by the following thermo-physical properties: volume enthalpy, specific heat capacity, thermal conductivity coefficient and density (specific density) of steel.

The Finnish solidification model Interdendritic Solidification Model (IDS) is used to determine the temperature dependence of these parameters of steel in the presented simulation of solidification. It is a simulation tool for solidification of steel comprising phase changes, which makes it possible to determine the dependence of the basic thermo-physical properties on the temperature for the given steel grade with a specific chemical composition and for the desired parameters of cooling. The model of solidification IDS is a so-called gray box, i.e. it combines empirical or semi-empirical sub-models with physically conceived (fundamental) sub-models [14].

CCM in real operation cast even hundreds of different steel grades, for which it would be difficult to set the parameters of casting and other related technological parameters. The chemical composition of steel,

according to which the steel is classified into quality groups (that are further divided into sub-groups), influences significantly the susceptibility of the given steel grade to the occurrence of defects, namely crack formation and phenomena of segregation in the continuously cast blank. Although the role of individual chemical elements and of their combinations is not always quite unambiguous, it is generally possible to mention the basic trends of some influences of elements, especially carbon, on the susceptibility of cast steels to defects. Depending on the carbon content, the steel is usually divided into four groups. The first group consists of steels with a content of C < 0.08%, the second group contains steels with a C content from 0.08 to 0.15%, the third group contains steels with a C content from 0.15 to 0.50%, and the fourth group contains steels with a C content > 0.50% [2].

The basic recommended steel composition of steels for the casting of billets is given in Tab. 1. The table lists one to two characteristic steels for each of the four groups. It is supplemented with liquidus and solidus temperature. The mentioned IDS software was used for determination of thermo-physical parameters on the basis of the chemical composition of the steels [15].

The results of the solution of the temperature field of the billet with dimensions 150 × 150 mm are shown for the steel grade TERMEX-1 from Group 3. Therefore, Figs. 15 and 16 show diagrams of the dependence of the thermo-physical properties on the temperature (thermal conductivity, specific heat capacity, density, enthalpy), which are supplemented with the liquidus and solidus temperature.

Tab 1 Distribution of steel grades into groups and sub-groups according to their chemical composition  
Tab. 1 Rozdělení ocelí do skupin a podskupin podle chemického složení

Sk	Family	Steel	$T_{LIK}$	$T_{SOL}$	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	V	Ti
			(°C)											
1	C15	P2-04B	1531	1489	0.020	0.300	0.040	0.010	0.010	0.065	0.050	0.040	0.000	0.000
2	B20	1220	1523	1477	0.100	1.025	0.075	0.010	0.010	0.060	0.075	0.075	0.015	0.000
3	A31	TERMEX-1	1515	1457	0.180	0.725	0.200	0.020	0.020	0.200	0.075	0.075	0.000	0.000
	D50	C45EKL	1491	1402	0.460	0.650	0.300	0.015	0.015	0.100	0.200	0.200	0.000	0.000
4	B73	C82DPC	1466	1342	0.840	0.700	0.200	0.008	0.007	0.125	0.085	0.100	0.000	0.000

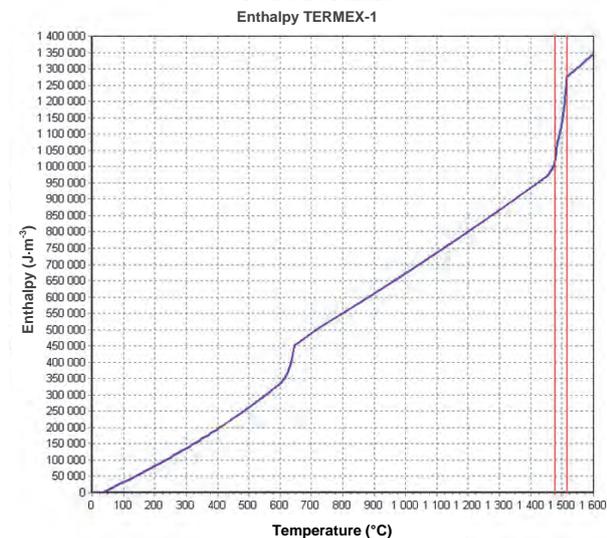
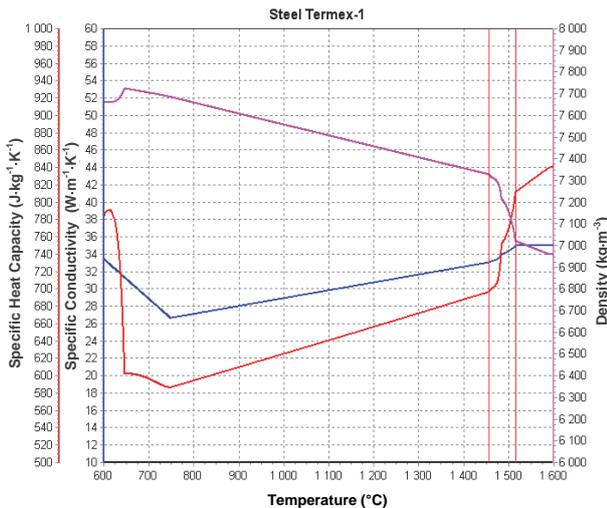


Fig. 15 Thermo-physical properties of the TERMEX-1 steel grade from the group No. 3

Obr. 15 Termofyzikální vlastnosti oceli TERMEX-1 ze skupiny 3

#### 4. Methods of displaying the calculated temperature field of the billet

Fig. 16 contains one of the most illustrative views provided by the presented model. Each curve here records the temperature history of any cross-sectional

point selected by the user when it passes through the entire CCM from the molten steel level in the mould (coordinate 0) to the flame cutting machine. Typical points (points in the corners and in the centre of the square profile) are selected here.

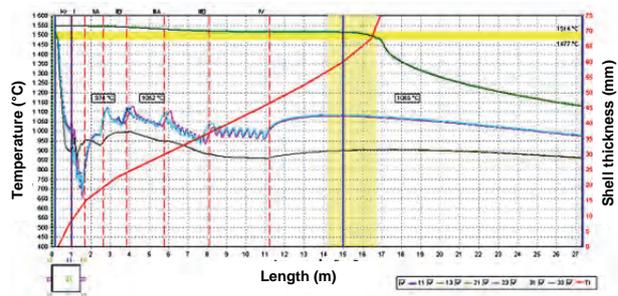


Fig. 16 Temperature history of selected points of the cross section of the billet 150 × 150 mm (steel TERMEX-1) during its passage through the caster

Obr. 16 Teplotní historie zvolených bodů příčného řezu sochorem 150 × 150 mm (ocel TERMEX-1) při jeho průchodu ZPO

The red curve, which runs from the start of the coordinate system and has a scale in the diagram at the right-hand side, shows the increase of the solidified strand shell. The width of the horizontal yellow strip shows the temperature range of solidification for the steel grade TERMEX-1 (here 1457 - 1515 °C). The width of the vertical yellow zone indicates the distance between the iso-liquidus and the iso-solidus (the width of the mushy zone) at its maximum value, as shown also in Fig. 17. The red dashed vertical lines are the boundaries between the individual cooling zones already mentioned above, the blue vertical lines represent the level of the molten steel in the mould, the mould lower edge, the end of the arc and the position of the flame cutting machine. In addition, the surface experimental temperatures measured by pyrometers on real CCM (974 °C, 1052 °C and 1065 °C) at the given locations are expressed numerically below the diagram in the frame.

Fig. 17 shows evolution of the iso-liquidus (red curve) and of iso-solidus (blue curve) in the longitudinal axial section of the billet. Fig. 18 shows isothermal surfaces in transverse and longitudinal sections of the billet displayed on the computer monitor connected to the CCM information system.

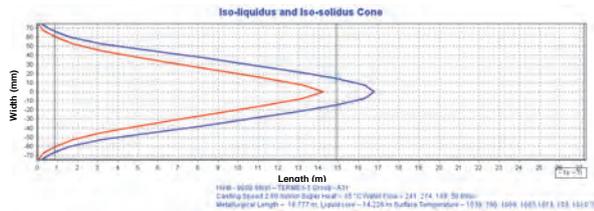


Fig. 17 Evolution of iso-liquidus and iso-solidus in the axial longitudinal section of the billet 150 × 150 mm (steel TERMEX-1)

Obr. 17 Průběh izolikvidy a izosolidy v podélném osovém řezu sochorem 150 × 150 mm (ocel TERMEX-1)

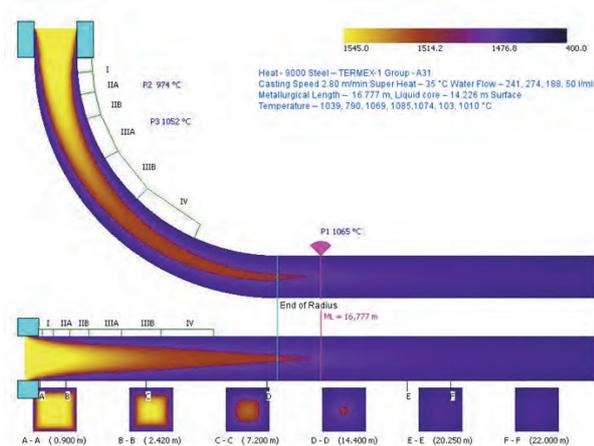


Fig. 18 Iso-thermal areas of the billet 150 × 150 mm (steel TERMEX-1) displayed on the monitor

Obr. 18 Izotermické plochy sochoru 150 × 150 mm (ocel TERMEX-1) na monitoru

## Conclusions

The paper presents a proposal of a complex calculation apparatus for solving the temperature field of the continuously cast billets from the automatic generation of the mesh through the preparation of the thermo-physical parameters (including the assessment of their influence on the accuracy of the calculation), through to the definition of the boundary conditions (including the assessment of their impact on the calculation accuracy) and various processing of its results. This proposal was implemented in cooperation with the steelworks Třinecké železárny, a.s. as the main solver of the project of the Ministry of Industry and Trade of Czech Republic. An overview of the numerical model and preparation of its use is presented. The most difficult is the definition of the boundary conditions on all the surfaces of the system that separate the solved system of the billet from the so-called surroundings, or which lie in the planes of the billet symmetry. For determination of the heat transfer coefficients under the cooling nozzles it is necessary to perform an experiment with a hot plate method. Verification and application of the numerical model of temperature field assume also systematic experimental research and measurement of operational parameters on real CCM.

## Acknowledgments

This publication was prepared as a result of solution of the NETME CENTRE PLUS project (LO1202) with financial support from the Ministry of Education, Youth and Sports under the National Sustainability Program I.

Tato publikace vznikla řešením projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finanční podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci Národního programu udržitelnosti I.

## Literature

- [1] *Continuous Casting: Brno Dynamic Solidification Models* [online], 2016: Brno University of Technology [cit. 2016-10-05]. Available from: <http://www.continuouscasting.info/PRICM-5>: In: 5<sup>th</sup> Pacific Rim 2004, International Conference on Advanced Materials and Processing PRICM-5, Beijing, China, 2-5 Nov. 2005, pp. 3831–3834. *Materials Science Forum*, Vols. 475–479, p. 5.
- [2] ŠTĚTINA, J. et al. Historie tvorby, vývoje a ověření originálního numerického modelu teplotního pole pro proces plynulého odlévání bram provozovaný ve VÍTKOVICE STEEL a.s. [History of the creation, development, and verification of the original numerical model of the temperature field for the process of continuous casting of slabs, which was developed in VÍTKOVICE STEEL a.s.], *Hutnické listy*, 70 (2017) 1, 4–16. ISSN 0018-8069.
- [3] ŠTĚTINA, J. et al. Začlenění dynamického modelu BrDSM teplotního pole plynule odlévané bramy do řídicího systému ve VÍTKOVICE STEEL a.s. [Integration of the Dynamic Model BrDSM of temperature field of the continuously cast slab into the Control System in VÍTKOVICE STEEL a.s.], *Hutnické listy*, 70 (2017) 1, 17–34. ISSN 0018-8069.
- [4] DOBROVSKÁ, J. et al. Originální numerický model chemické heterogenity plynule lité ocelové bramy a jeho spojení s numerickým modelem teplotního pole. [Original numerical model of chemical heterogeneity of the continuously cast steel slab and its connection to the numerical model of the temperature field], *Hutnické listy*, 70 (2017) 1, 35–46. ISSN 0018-8069.
- [5] KAVIČKA, F. et al. Numerická a experimentální analýza atypického průvalu ocelové bramy v pásmu rovnání při plynulém odlévání ve VÍTKOVICE STEEL a.s. [Numerical and experimental analysis of atypical breakout of steel slab in the straightening zone during continuous casting in VÍTKOVICE STEEL a.s.], *Hutnické listy*, 70 (2017) 1, 47–59. ISSN 0018-8069.
- [6] KAVIČKA, F., ŠTĚTINA, J., SEKANINA, B., STRÁNSKÝ, K. *Výzkum, vývoj a zavedení do výroby dynamického modelu řízení technologie pro plynulé odlévání sochorů*. (Závěrečná zpráva o řešení části projektu výzkumu a vývoje MPO ČR č.FI-IM/021) [Research, development, and implementation into production of a dynamic model for control of technology for continuous casting of billets. (Final report on the solution of a part of the research and development project of the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic No. FI-IM / 021)], Brno: VUT in Brno, 2007.
- [7] ŠTĚTINA, J. et al. The Numerical and Experimental Investigation of a Concasting Process. In *ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference* (the Book of Abstracts), Kohala Coast, Hawaii, USA, March 2003, p. 103.
- [8] ŠTĚTINA, J. *Optimalizace parametrů lité sochorů pomocí modelu teplotního pole*. (Habilitation thesis) [Optimisation of parameters for the casting of billets using the temperature field model. (Habilitation thesis)], Ostrava: VŠB-TU Ostrava, FMMI, 2008.
- [9] HORSKÝ, J., RAUDENSKÝ, M. Measurement of Heat Transfer Characteristics of Secondary Cooling in Continuous Casting. In *14<sup>th</sup> Conference on Metallurgy and Materials METAL*, Ostrava: Tanger, s.r.o., 2005, s. 1–8.
- [10] RAUDENSKÝ, M., HORSKÝ, J. Secondary Cooling in Continuous Casting and Leidenfrost Temperature. *Ironmaking and Steelmaking*, 32 (2005) 2, 15–24. DOI 10.1179/174328105X15913, Maney, UK.

- [11] BAROZZI, S., FONTANA, P., PRAGLIOLA, P. Computer Control and Optimization of Secondary Cooling During Continuous Casting. *Iron and Steel Engineer*, 63 (1986) 11, 21–26.
- [12] YAMAUCHI, A., SORIMACHI, K., SAKURAYA, T., FUJII, T. Heat Transfer between Mold and Strand Through Mold Flux Film in Continuous Casting of Steel. *ISIJ Intl.*, 33 (1993) 1, 140–147.
- [13] ŠTĚTINA, J. *Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy. (Diplomová práce) [Dynamic model of temperature field of the continuously cast slab. (Dissertation thesis)]*, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007.
- [14] LOUHENKILPI, S., LAITINEN, E., NIEMINEN, R. Real-Time Simulation of Heat Transfer in Continuous Casting. *Metallurgical Transactions B*, 24B, (1993) 4, 685–693.
- [15] MIETTINEN, J., LOUHENKILPI, LAINE, J. Solidification Analysis Package IDS. Proceeding of General COST 512. *Workshop on Modeling in Materials Science and Processing*, M.Rappaz and M. Kedro eds., ECSC-EC-EAEC, Brussels, Luxembourg, 1996.

---

## Proces na nejvyšší úrovni – Salzgitter Flachstahl vyvinul nový způsob high-tech odlévání

*aktiv-online.de*

07.03.2017

Lehká, extrémně pevná, dobře tvářitelná – to jsou vlastnosti nové vysoce výkonné oceli, zajímavé pro automobilní a strojírenský průmysl. Mimořádné na ní je, že Salzgitter Flachstahl tuto ocel vyrábí inovativním způsobem. Ocel o teplotě 1500 °C teče z pánve na dopravní pás 12 m dlouhého zařízení pásového lité, světové novinky a jádro nového inovativního lité oceli. Technologii vyvinuly Salzgitter Flachstahl, SMS a univerzita v Clausthal-Zellerfeld. Mimořádné na způsobu je, že se všechno pohybuje horizontálně. Zatímco u obvyklého plynulého lité proudí ocel formou shora dolů a vytváří až 50 cm silné předlitky, je nyní vedena vodorovně na vodou chlazeném dopravním pásu. To má jasné výhody: vznikající pásy jsou jen 1,5 cm silné. Tavenina se ochlazuje mnohem rychleji, a tím se vytváří jemnější struktura s vysokou kvalitou. „Tímto způsobem se mohou vyrábět vysoce výkonné oceli, které se konvenčními způsoby vůbec nedají vyrobit,“ vysvětluje Dirk Austemann z firmy SMS, stavitele zařízení. Používaná ocel má vysoký obsah manganu, jakož i křemíku a hliníku.

## Povzbuzovací prostředky pro unavenou ocel

*Wissenschaft-aktuell.de*

13.03.2017

Po mnoha letech se mohou ocelové slitiny v mostech, letadlech nebo elektrárnách unavit. Mikrotrhliny se šíří a náhlá zatížení vedou k lomům s částečně katastrofálními následky. Velká stabilita vzrostlých kostí zavedla nyní mezinárodní skupinu materiálových vědců k efektivní strategii proti unavujícím se ocelím. Jak informují tito vědci v časopise „Science“, mohla by uměle zkonstruovaná, hierarchicky vybudovaná nanostruktura propůjčit materiálům výrazně delší život. Přeneseno na velké množství ocelových slitin by se tak měla výrazně zvýšit stabilita stavebních děl, železnic a jiných ocelových konstrukcí. „Zatížení strukturálních komponent jsou často cyklická,“ říká Cemal Cem Tasan z massachusettského institutu technologií v Cambridgi. Jednotlivá zatížení, zaviněná střídáním teplot a vibracemi, jsou sice podkritická, ale pokud se mnohotisíckrát opakují, vedou k únavě materiálu a nakonec k lomu materiálu. Vědci se přitom nechali inspirovat komplexní mikro- až nanostrukturou vnitřní konfigurace kostí.

## Více peněz pro oceláře – čtyři procenta ve dvou stupních

*zeit.de*

17.03.2017

Zhruba 72 000 zaměstnanců severoněmeckého ocelářského průmyslu by mělo ve dvou stupních dostat celkem 4 % více na mzdách. Dohodli se na tom zaměstnavatelé a odboráři z IG Metall po více než desetihodinovém jednání v Düsseldorfu. Ve dnech před rozhodujícím jednáním vyzvaly odbory k celé sérii varovných stávek, kterých se podle odborů zúčastnilo 13 500 ocelářů. Zaměstnavatelé nejprve nabízeli jen 1,3 % pro 15 měsíců, zatímco odbory požadovaly o 4,5 % více peněz na období 12 měsíců. Kompromis nakonec vypadá tak, že od 1. dubna 2017 dojde ke zvýšení o 2,3 % na 13 měsíců a od 1. května 2018 o dalších 1,7 %. Dohoda platí do 31.12.2018, a sice pro Severní Porýní-Vestfálsko, Niedersachsen a Brémy. Pro zaměstnance v Sársku a východním Německu jsou vedeny samostatné rozhovory. Nils Naujok ze strategického poradenského domu PwC konstatuje, že zakázkové knihy většiny podniků jsou plné. Vzhledem ke zvýšení cen mezi 10 a 15 % v uplynulém roce se mohou podniky těšit ze stoupajících marží. Přesto zůstává odvětví i v letošním roce pod tlakem.

## Dynamic On-line Model of Temperature Field for Continuous Steel Billet Casting and its Integration into the Control System of the Caster

### Dynamický on-line model teplotního pole plynule odléváného ocelového sochoru a jeho začlenění do řídicího systému ZPO

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.; prof. Ing. František Kavička, CSc.; doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.; Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.; Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.

Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Energy Institute, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Czech Republic

*The on-line version of the 3D dynamic model of the transient temperature field of a billet caster is based on its off-line version. It enables the simulation of the temperature field of the caster in real time. The model receives the data from the first and second level of control of the caster via an interface program, evaluates the measured data and carries out a calculation of the temperature field and other aggregated quantities that are sent back to the information system of the steelworks/plant. It aims to enhance the quality and accuracy of the input data, the mutual connections between them and the qualitative parameters, including the establishing of their limit values. This creates a system that not only quickly but also very accurately displays the temperature field of the blank during the course of the actual process, including all necessary technological data from the caster. The dynamic model was integrated into the casting control system. This suggests its usefulness for real deployment, the application and robustness of the used numerical methods and other software parts.*

**Key words:** dynamic solidification model; casting control system; control computer; monitor of an operator; cooling optimization; statistical data processing

*On-line verze 3D dynamického modelu nestacionárního teplotního pole sochorového ZPO je založena na jeho off-line verzi. Umožňuje simulaci teplotního pole ZPO v reálném čase nebo v čase kratším. Mnohonásobné zvýšení rychlosti výpočtu teplotního pole sochoru umožňuje nejen využití výkonnějšího výpočetního hardware, ale především software. V takto krátkém čase tak lze sledovat vývoj teplotního pole v oblasti krystalizátoru, sekundárního i terciálního chlazení a tyto informace využít pro optimální řízení ZPO jako celku i jednotlivých jeho klíčových uzlů. Model přijímá data z první a druhé úrovně řízení ZPO přes rozhraní, vyhodnocuje naměřená data a provádí výpočet teplotního pole a dalších agregovaných veličin, které jsou odesílány zpět do informačního systému ocelárny. Cílem je zvýšení kvality a přesnosti vstupních údajů, vzájemných vazeb mezi nimi a kvalitativními parametry, včetně stanovení jejich mezních hodnot. To vytváří systém, který nejen rychle, ale také velmi přesně zobrazuje teplotní pole sochoru během daného procesu, včetně všech potřebných technologických dat ze ZPO. Funkčnost on-line modelu je podmíněna dostupností on-line vstupních dat, jako jsou licí teplota, rozměr sochoru, chemické složení lité oceli, licí rychlost, poloha hladiny v krystalizátoru, teploty ve stěně krystalizátoru, teploty chladicí vody v krystalizátoru na vstupu a výstupu, průtok vody, nastavení průtoků a tlaku vody v sekundárním chlazení, teploty z pyrometrů v sekundárním chlazení. Tato data poskytuje modelu teplotního pole vyvinutý separátní program se standardním rozhraním. Rozhraní je naprogramováno dle aktuálního stavu řízení a je ve zdrojových textech k dispozici odběrateli, aby si mohl při změně řízení interface modifikovat. Dynamický model byl začleněn do systému řízení ZPO. Svědčí to o jeho užitečnosti pro reálné nasazení, o spolehlivosti i robustnosti použitých numerických metod i dalších softwarových částí.*

**Klíčová slova:** dynamický model tuhnutí; řídicí systém ocelárny; řídicí počítač; operátorská obrazovka; optimalizace chlazení; statistické zpracování dat

Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering collaborated on the solution of the project of the Ministry of Industry and Trade of Czech Republic (MIT) with the steelmaking company Třinecké železářny, a.s. as the principal investigator. During the creation of off-line and on-line versions of the temperature field model, it was inevitable to choose a

modern development tool and object-oriented language [1] for programming. The model was therefore programmed in Delphi 2007 (Object Pascal programming language). The Firebird database, a modern SQL client/server database, was used for storage of data. We separated the data and the program. All input data, such as the location of the cooling

nozzles, rollers, experiment parameters, properties of cast steels, etc., were stored in the SQL database. Similarly, the results of the simulation were entered into the SQL database. This solution allowed making changes without having to intervene in the program code. This was the only possible way because the programs in the model were from the outset developed with a view for their deployment in real-world operation, where maintenance of the computer will be ensured by network managers. All changes to data, configurations, and technology standard operating procedures (SOP) were made in one database.

The resulting product was developed as a unit of three independent programs BrWatch, BrCaster and BrCCME<sub>x</sub> that will be discussed in subchapters 1.1 through 1.3. At present, the Brno Dynamic Model of Solidification, commercially offered by the Brno University of Technology, is registered under the single name of Brno Dynamic Solidification Models (BrDSM) (trademark EU 015723893).

## 1. Three independent programs for temperature field system

### 1.1 BrWatch program

Data acquisition program BrWatch was run on the DASFOS server and it was programmed in Delphi 2007

(Fig. 1). It loaded the configuration from the local database Firebird (position 4), it communicated with the application InTouch (position 3) via dll, and it communicated with the central database using ADO/ODBC (position 6). On the basis of these communications, it constructed a vector of real numbers at regular intervals (5 to 10 seconds on request of the on-line model). The vector was transferred via the TCP/IP server using the protocol HTTP/XML (position 2) to BrCaster (on-line model). It picked the values calculated by BrWatch program characterizing the temperature field, i.e. surface temperatures, metallurgical length, etc., as well as the results of recommended values for casting rate and water flow rates for the zones I, II, III, and IV from BrCaster via TCP/IP using the HTTP/XML protocol (position 2).

The graphical environment of the data acquisition program made it possible to quickly check the collected data and set the parameters of the on-line temperature model (Fig. 2). The system administrator used this program for influencing the parameters and behaviour of the on-line model. The thermal model is a numerical calculation that works with a fixed time step. It always had to have all the data at every step. Any deficit of the quantity might have caused numerical instability and crash of calculation. It was possible to replace the missing or incorrect quantities by either a previous valid value or a so-called standard value. The set time step, in which the calculated data was provided, was 10 s.

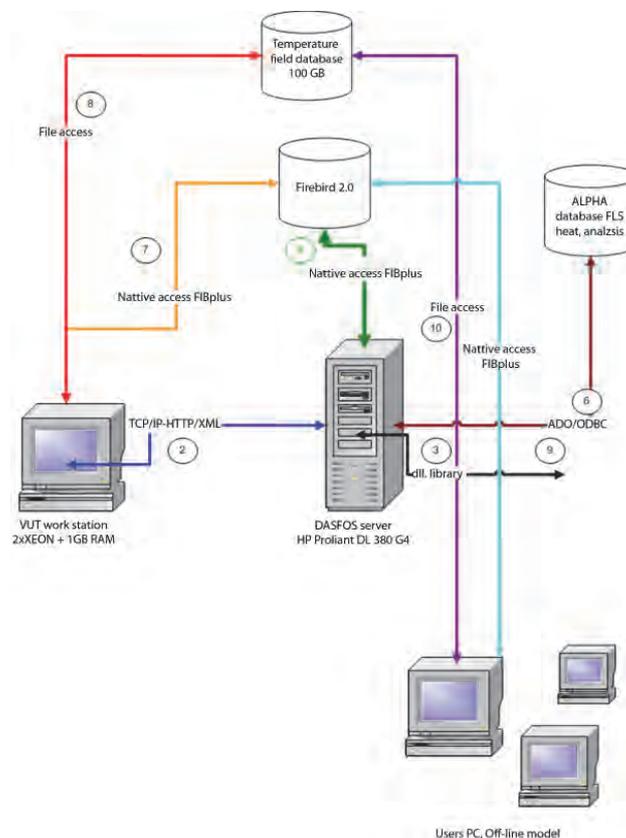


Fig. 1 Scheme of the communication between the different parts of the dynamic model

Obr. 1 Schéma komunikace mezi jednotlivými částmi dynamického modelu

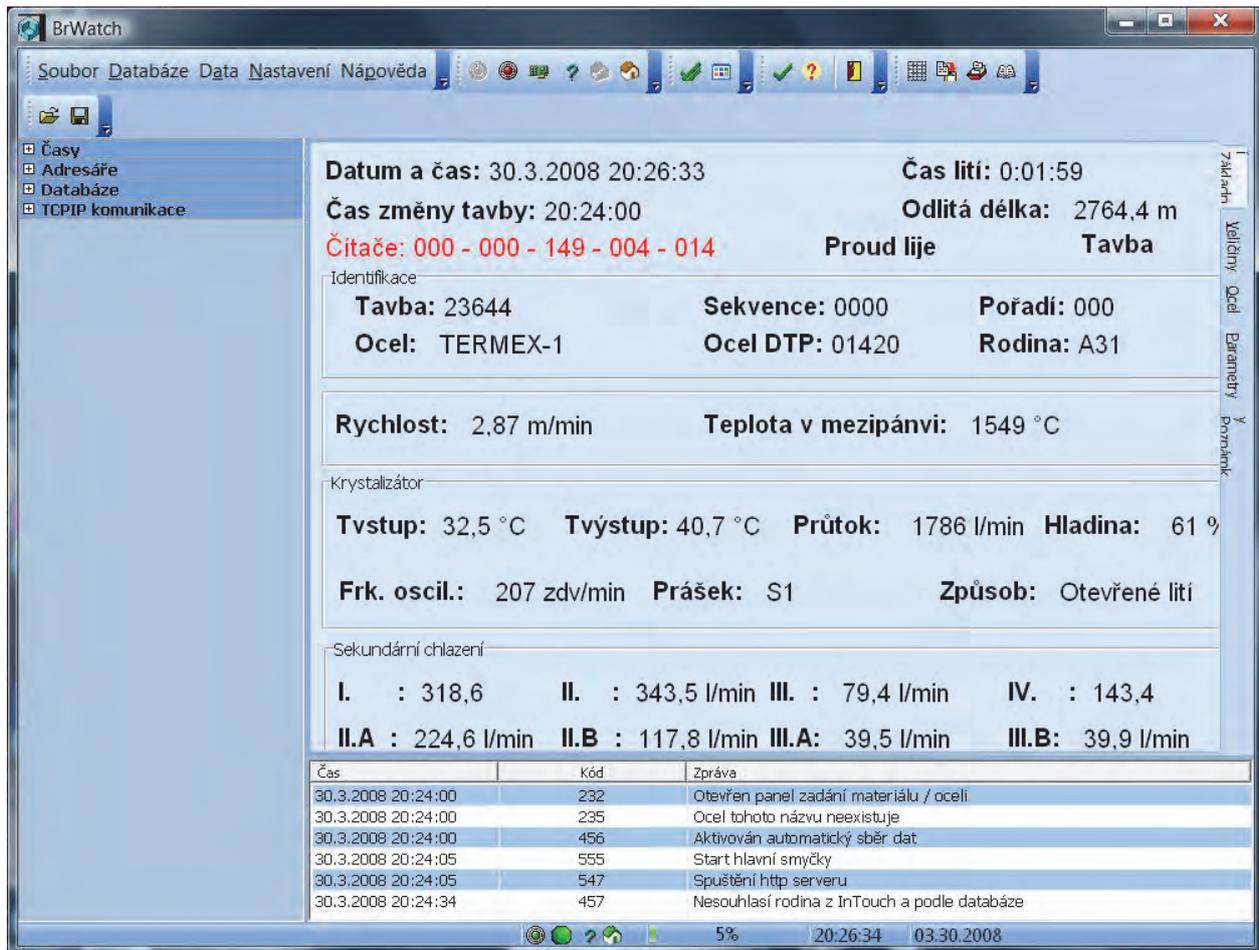


Fig. 2 Graphical interface of the program BrWatch  
Obr. 2 Grafické rozhraní programu BrWatch

## 1.2 Program BrCaster, on-line model

The on-line model was run on a two-processor PC, visualization was available in the control room for continuous casting machine 2 (CCM2). The numerically demanding multithreaded model solved the following functions: it read configuration from the Firebird database, same as BrWatch (Fig. 1, position 7); it received the vector of valid input values via TCP/IP sockets (position 2); it performed calculation of boundary conditions and thermo-physical parameters; it calculated the temperature field; it visualized the temperature field on the computer monitor in the control room; it calculated the controlled quantities (required casting speeds, water flows for the zones I, II, III and IV); it saved the calculated temperature field (position 8); it provided the current temperature field data to the operating information system for all its users (web server).

The program was based on the off-line version, picked the data from the first and second levels of the hierarchically structured CCM control system via the BrWatch interfacing program, it performed the calculation of the temperature field and of other aggregated quantities (Fig. 3) which were sent back to

the information system of the steel plant. Another goal of the on-line version was to increase the quality and accuracy of the input data, of mutual links between them and of the qualitative parameters, including the setting of limit values. In this way, a system was created that displayed not only very quickly but also as accurately as possible the real temperature field of the continuously cast billet (CCB) during the process, as well as all the necessary technological data from the CCM. One of the great advantages was the fact that the program had integrated the so-called web server, i.e. other users of the computer network of the steel plant could see individual operator screens of the online model via an ordinary Internet browser (Fig. 4).

Fig. 5 shows screens of the dynamic temperature model. Most of them are the same as for its off-line version. Fig. 5a presents basic parameters of casting both in numerical form and in the form of barographs and graphs of history. The basic screen of the model is in Fig. 3, where the metallurgical length is emphasized in addition to the temperature field. Fig. 5b shows the temperature history of the indicated points of cross-section during its progress through the entire CCM. Data from secondary cooling, including the temperatures measured by a pyrometer and calculated

temperatures at the same points, are shown in Fig. 5c. The screen in Fig. 5d shows the evolution of iso-liquidus and iso-solidus in longitudinal axial sections, and Fig. 5e shows the evolution of surface temperatures at the place of the built-in pyrometers. The

graph of the local time of solidification (the time, during which temperature of the given point was within the interval of solidification) in individual points of the profile is shown in Fig. 5f. The last screen shows the heat output volume in the individual zones (Fig. 5g).

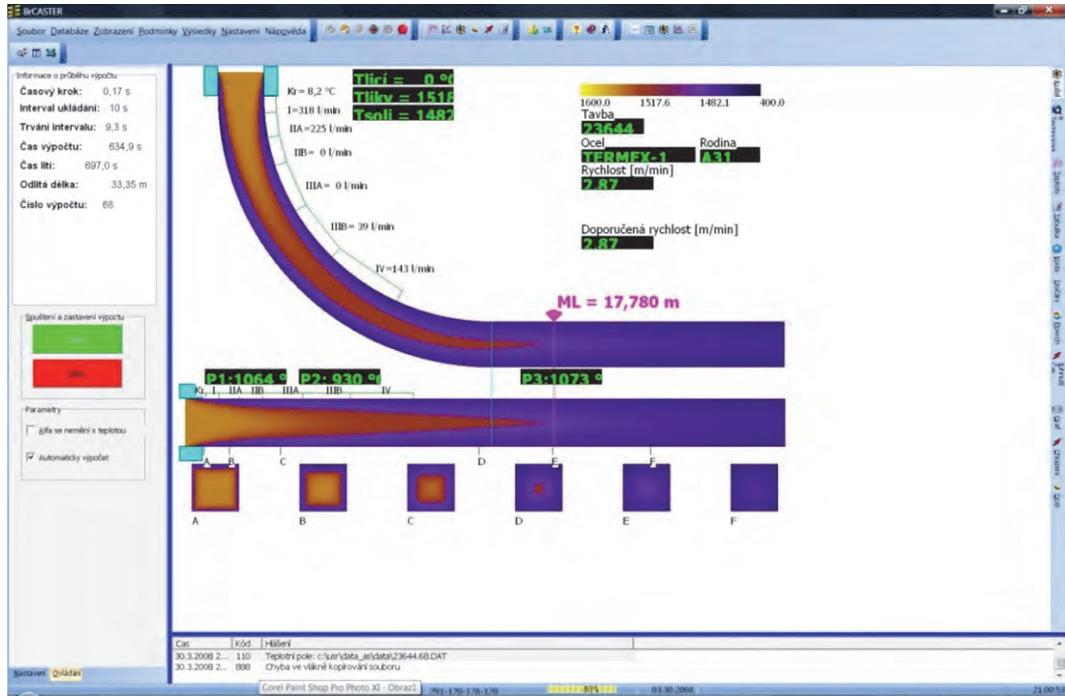


Fig. 3 Graphical interface of the on-line program with an example of the temperature field  
Obr. 3 Grafické rozhraní on-line programu s příkladem zobrazení teplotního pole

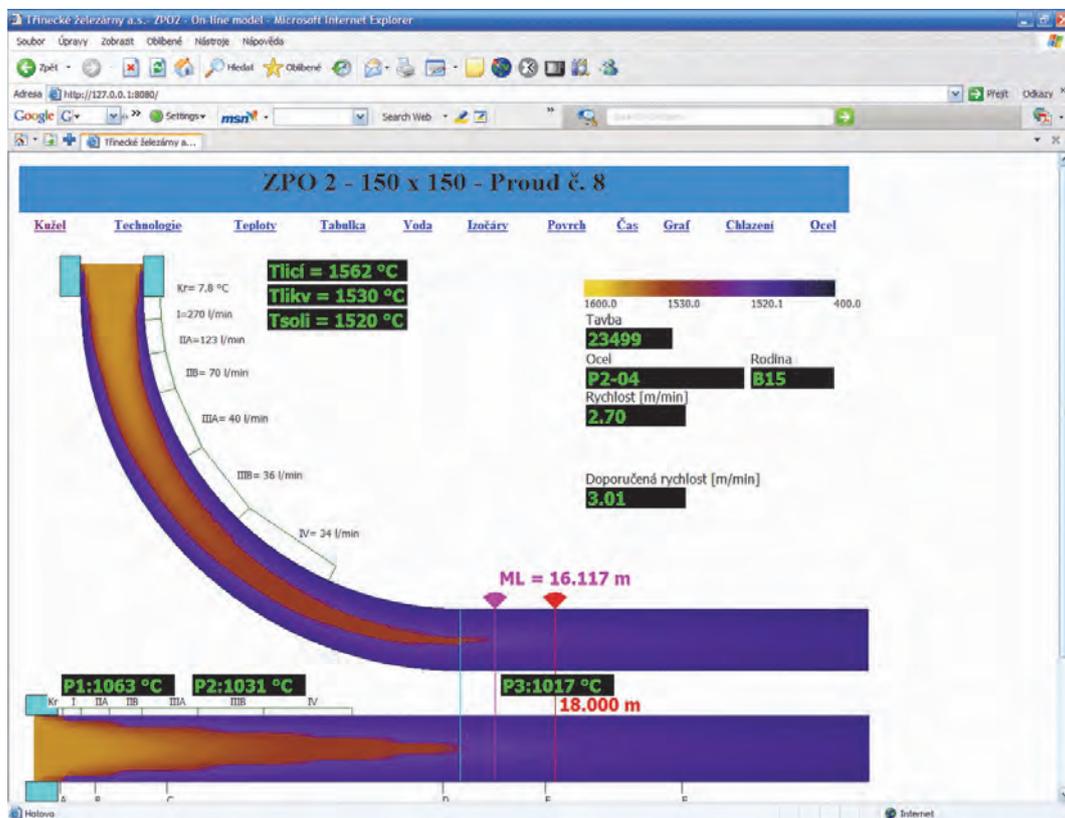


Fig. 4 Example of the results of the on-line model via the information system  
Obr. 4 Příklad zobrazení výsledků on-line modelu přes informační systém



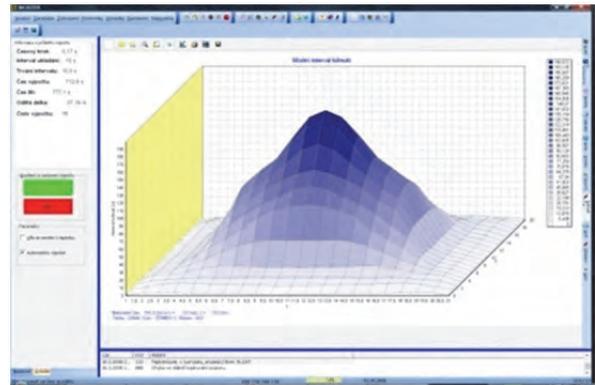
a) Basic parameters of the casting  
a) Základní parametry lití



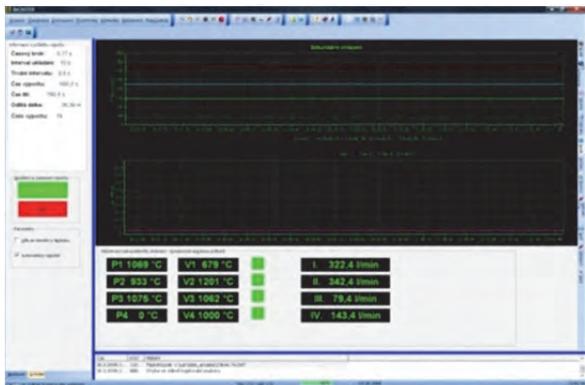
e) Surface temperatures in the place of built-in pyrometers  
e) Povrchové teploty v místě zabudovaných pyrometrů



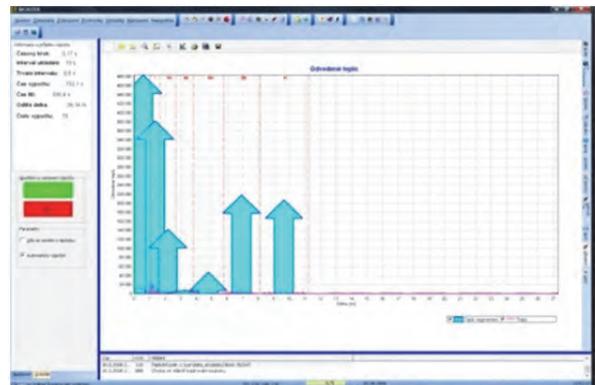
b) Temperature history along the caster  
b) Historie teplot podél ZPO



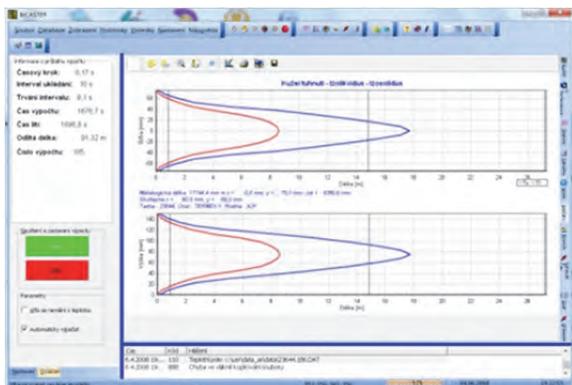
f) Local solidification time  
f) Místní doba tuhnutí



c) Data of the secondary cooling  
c) Data sekundárního chlazení



g) Heat flows diverted in the zones  
g) Tepelné toky odvedené v zónách



d) Evolution of iso-liquidus and iso-solidus in the axial longitudinal sections  
d) Průběh izolikvidy a izosolidy v podélných osových řezech

Fig. 5 Operator monitor of the dynamic model of the temperature field

Obr. 5 Operátorské obrazovky dynamického modelu teplotního pole

### 1.3 Program BrCCMEx, off-line model

The off-line temperature model, which was run on any industrial PC, had the following options: loading the configuration and data from the central Firebird database (position 9); editing Firebird Configuration Database on the Server (position 9); retrieving data from an online server, such as trends (position 9); viewing files (position 10); and it performs calculations

of the temperature field.

The off-line model, which was developed first, enables the user to design even a non-traditional file or combination of technological interventions for the optimal formation of the temperature field with the aim of enhancing the quality of the concasting while maintaining or even raising the volume of production. The basic screen MS Windows is shown in Fig. 6.

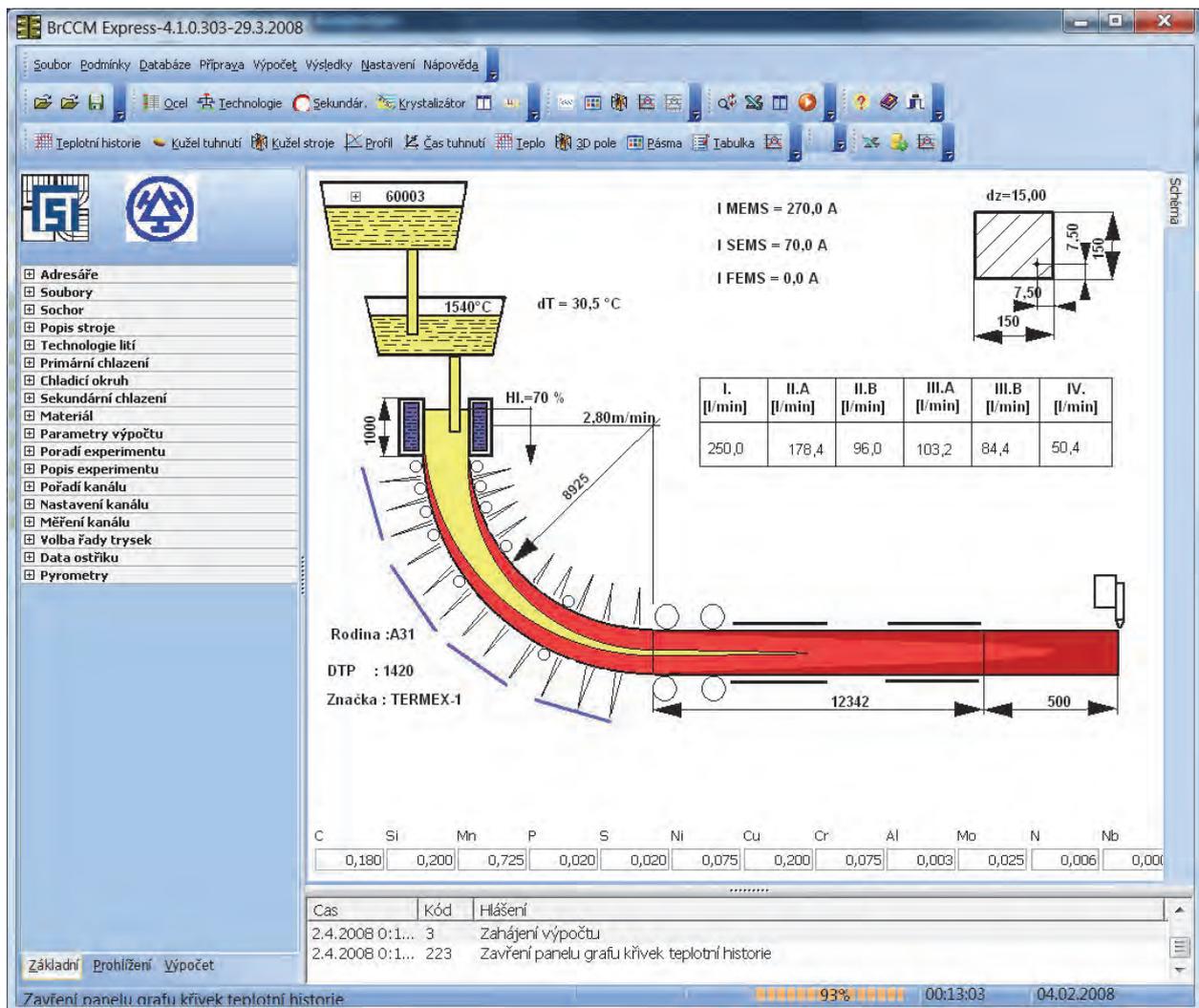


Fig. 6 Basic screen of the off-line model

Obr. 6 Základní obrazovka off-line modelu

Users (technologists) had the opportunity to upload the current live data from the on-line model to their off-line temperature field model, to make some changes in input parameters (e.g. to adjust secondary cooling, change the casting speed, etc.). After performing an off-line simulation, they found out how the temperature field would be created under such changed conditions. The off-line version can be also successfully used in the case of occurrence of defects on billets. The user has downloaded calculated thermal fields from the archive

server and he/she could analyse, with the use of the off-line model, probable causes of defects and prepare measures in order to avoid repeating of defects. The off-line model will in future allow also for download of quantities from the application server, and it will make possible to use statistical methods and links between variables and defects for the search of the cause of defects in the formation of the original temperature field of the billet from a problematic heat.

## 2. Dynamic model activity

Two independent control loops worked in a dynamic on-line model. The first served for the setting of calculation of the temperature field according to the current state of CCM and operating conditions. This control loop used temperature values measured by three (or possibly four) installed pyrometers for calculation of the control deviation. Location of the pyrometers is schematically illustrated in Fig. 7 with black dots.

Temperatures from the pyrometers were compared with the calculated temperatures at the same locations and correction of the heat transfer coefficients in the respective zones before the pyrometers was performed. If the difference between the measured and calculated temperatures and the correction factor was within acceptable limits ( $\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), the green LED signal lamp indicated correspondence of the model with the reality (Fig. 5d). In the event of a major disagreement, the red light warned that the situation should be analysed.

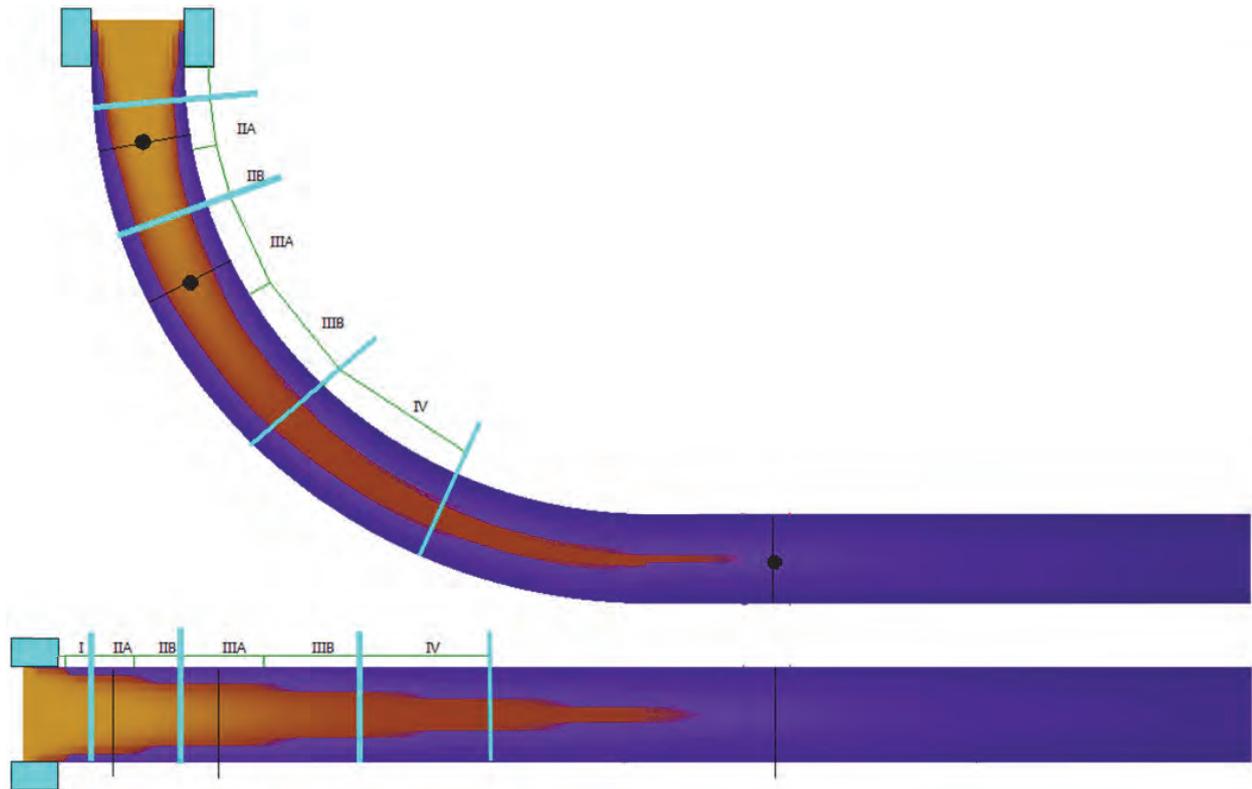


Fig. 7 Location of the pyrometers and places with target temperatures  
Obr. 7 Umístění pyrometrů a míst s cílovými teplotami

The second control loop was the recommendation of optimal casting speed and flow rates in the zones I, II, III and IV using the temperature model. Optimisation criteria can be in general the following ones:

- metallurgical length, which should extend into the not-bent part,
- limitation of reheating between zones,
- cooling rate limitation,
- limitation of surface temperature at the point of straightening,
- limitation of temperature behind individual zones,
- limitation of temperature fluctuations in the cooling zone.

Due to the fact that the optimal values of these parameters are unknown, only the following parameters were selected for this project:

- metallurgical length, which should approach the specified value,
- surface temperatures at four locations (between zones), marked in Fig. 7 with cyan boundary lines); temperature values must be within the specified interval.

Fig. 8 shows a diagram of the control operation for one zone controller (in this case zone III). Similar control loops must be implemented for all four zones.

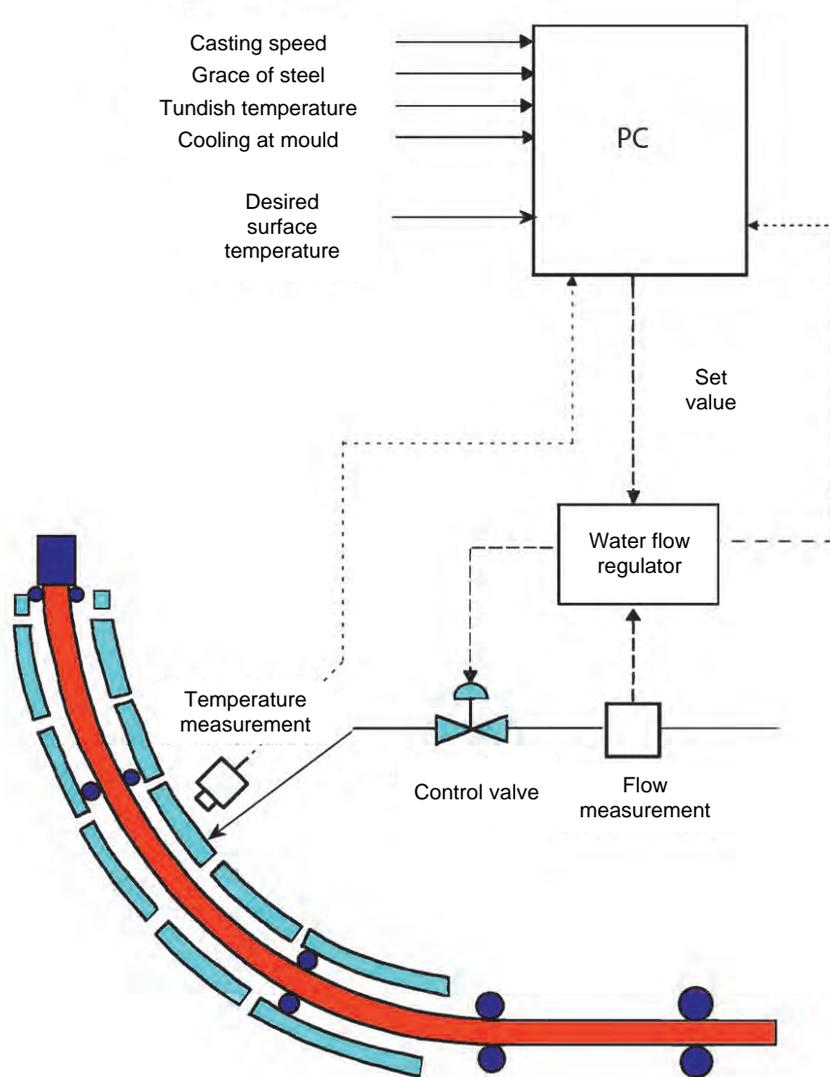


Fig. 8 Scheme of the regulation of the water flow in the one cooling zone  
Obr. 8 Schéma regulace průtoku vody v jedné chladicí zóně

Since the number of cast steel grades was large, we used their classification in 4 groups [2, 3], for which the casting conditions should be the same. The database of conditions for each group contains:

- recommended metallurgical length,
- minimum and maximum temperature at the point 1 (behind zone I),
- minimum and maximum temperature at the point 2 (behind zone II),
- minimum and maximum temperature at the point 3 (beyond zone III),
- minimum and maximum temperature at the point 4 (behind zone IV).

Determination of these optimal values is a very challenging and long-term task. Therefore, in the first

stage of deployment of the on-line model, the actual achieved values and the metallurgical length for casting conditions taken from the standard operating procedure for the respective group were used as initial values.

### 3. Outline of statistical processing of data from dynamic on-line model

In addition to graphical results presented here, statistical methods can also be used for the analysis of data from the on-line model of the temperature field. For each melt, the following statistical variables were determined for all measured and calculated values of the technological parameters: mean value (arithmetic mean), minimum value, maximum value, variance, standard deviation, slope coefficient and coefficient of acuity.

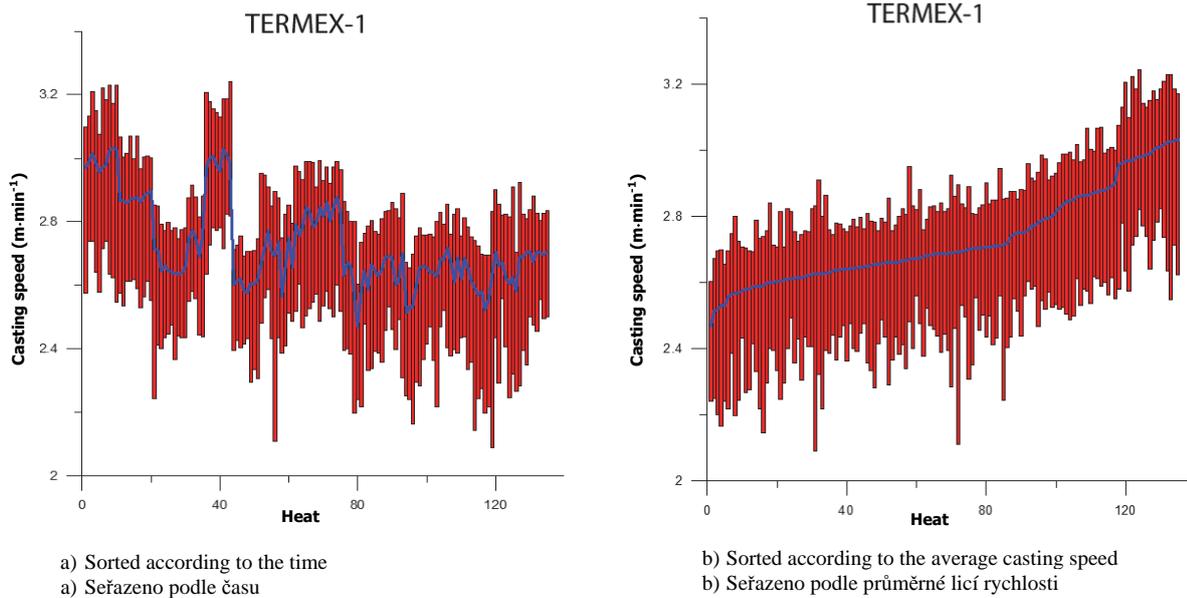


Fig. 9 Casting speed in the individual heats, the minimum, maximum and average value  
Obr. 9 Lící rychlost u jednotlivých taveb, minimální, maximální a průměrná hodnota

These statistical variables were evaluated for all 400 data files that are stored by the temperature model in the database. It was possible to further evaluate these quantities using graphs for the given period. The graphs presented here correspond to the six-month operation of the CCM when a total of 140 heats of TERMEX-1 steel grade were cast.

Fig. 9 depicts the casting speed for TERMEX-1 steel grades. The minimum and maximum casting speeds and averaged speed are plotted here. Fig. 9a shows the temperature of individual heats in the order in which they were cast. Fig. 9b shows the temperatures of heat ordered according to the average casting speed of these heats.

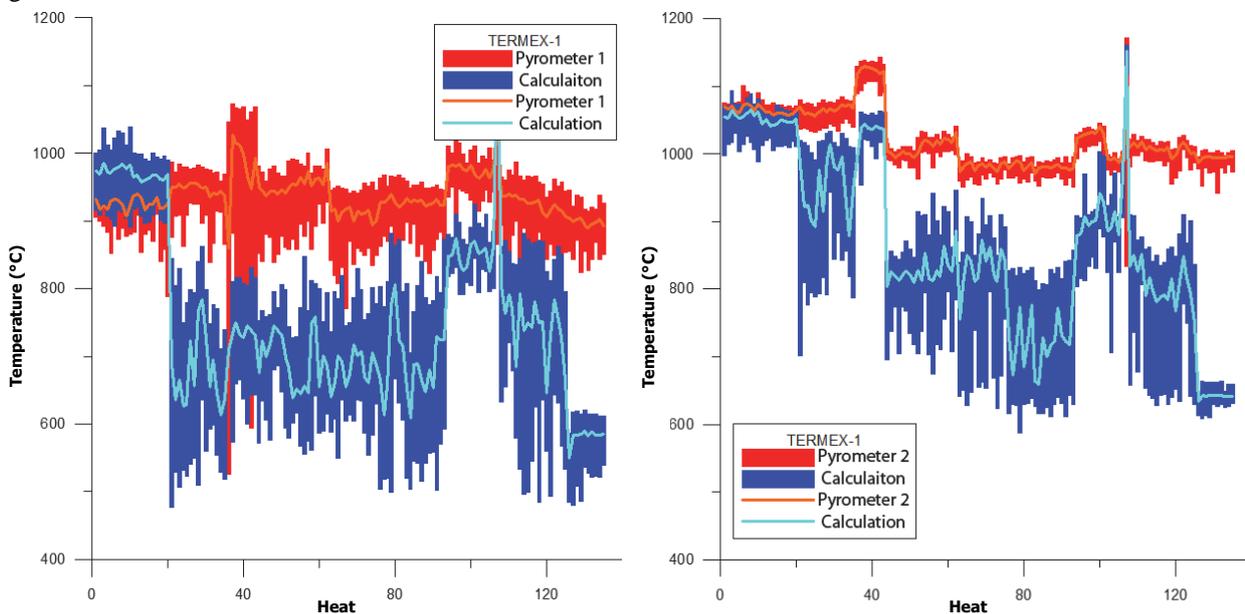


Fig. 10 Surface temperature measured by the pyrometers and calculated in the same places  
Obr. 10 Povrchová teplota měřená pyrometry a vypočtená ve stejných místech

Fig. 10 shows a similarly structured graph of the measured surface temperature determined by the pyrometers 1 and 2. The graph also shows an evolution of the temperatures calculated at the same points. Figure 10 shows a good match between the measured and calculated values for the first 20 heats. The calculation results showed that surface temperature was higher only

by 5% in comparison to the temperatures measured by the pyrometer 1. The 5% variance is a very good result for the operating conditions. After that the nozzles in the first zone were replaced by a different type which is in the graphs manifested by an increased 22% difference between the measured and calculated temperature values.

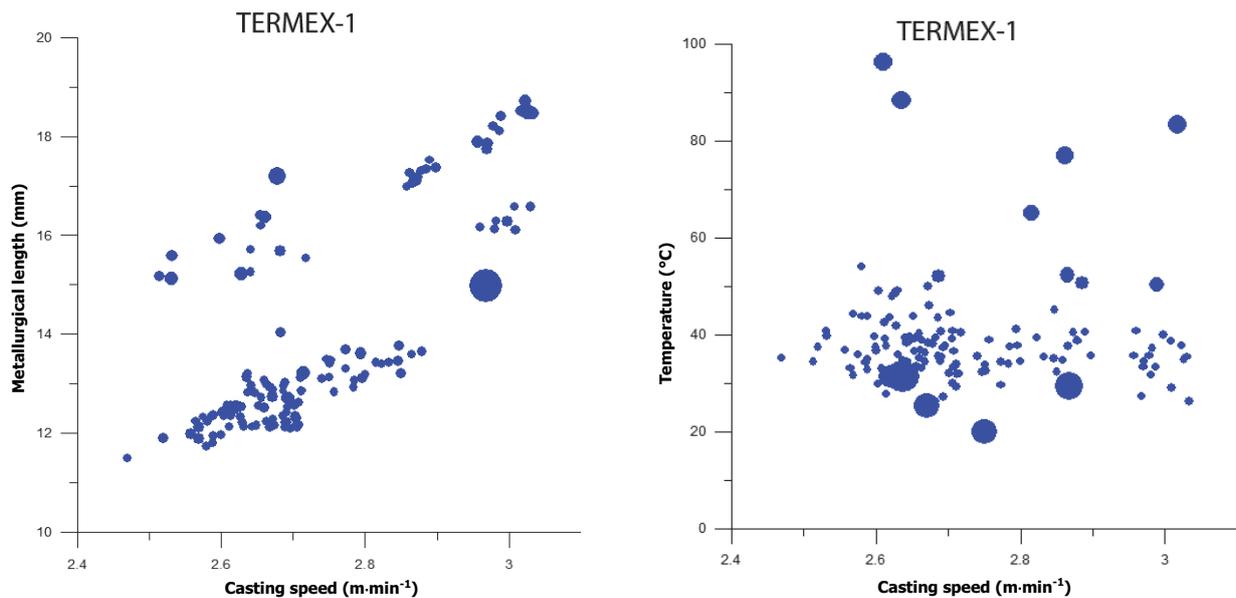


Fig. 11 Metallurgical length and the temperature of the overheating depending on the casting speed for steel TERMEX-1

Obr. 11 Metalurgická délka a teplota přehřátí v závislosti na rychlosti lité pro ocel TERMEX-1

The graphs in Fig. 11 present the value of metallurgical length and the overheating temperature in dependence on the casting speed. These parameters from each heat are expressed by one blue circle, the radius of which corresponds to the standard deviation. It can be seen from Fig. 11 that approximately linear dependence exists between the metallurgical length and the casting speed, which corresponds to the relevant solidification constant. Due to the replacement of the nozzle, the results of heats were divided into two linear dependencies, which were reflected in the graph by two fields of the observed cases. A functional dependence was also expected between the overheating temperature and the casting speed. This, however, was not confirmed in real heats, as it is shown in the right graph in Fig. 11.

The graphs of statistical variables are an example how it is possible to use the data from the on-line model for an analysis of the CCM behaviour and for optimisation of its operation.

## Conclusions

A numerical model of a non-stationary temperature field of a steel billet  $150 \times 150$  mm cast by continuous casting was developed and tuned in off-line and on-line versions. Presentation of the results shows how it is possible to use both versions for optimisation of casting parameters. The online version was in the steelworks Třinecké železárny, a.s. incorporated directly into the CCM control system. The results show significant differences between the temperature field model of

continuously cast slabs and billets. In the case of the casting of billets, the intervals of input parameters are much wider including a larger number of types of steels. A particular problem is also the use of conical water nozzles in the secondary cooling zone where the heat transfer coefficient under the nozzle is markedly dependent on the surface temperature of the billet. By using the model, it is possible to achieve faster and easier implementation and mastering of new types of steel (according to immediate customer requirements with reduced risk of production losses), but mainly to achieve higher qualitative parameters of steel casting including stability of their production, i.e. narrowing the difference between the qualitative properties of individual heats of the same steel grades and to achieve a repeatability. Improving the quality means moreover a reduction of power consumption per ton of final product. This reduces also the volume of flue gasses for the production of the final product and it will thus reduce the ecological exposure of the work environment.

## Acknowledgements

*This publication originated from a solution of the NETME CENTRE PLUS project (LO1202) with financial support from the Ministry of Education, Youth and Sports under the National Sustainability Program I.*

*Tato publikace vznikla řešením projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finanční podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci Národního programu udržitelnosti I.*

## Literature

- [1] KAVIČKA, F., ŠTĚTINA, J., SEKANINA, B., STRÁNSKÝ, K. *Výzkum, vývoj a zavedení do výroby dynamického modelu řízení technologie pro plynulé odlévání sochorů*. (Závěrečná zpráva o řešení části projektu výzkumu a vývoje MPO ČR č. FI-IM/021) [Research, development and implementation of dynamic model for control of technology for continuous casting of billets (Final report on solution of part of the research and development project of the MIT CR No. FI-IM/021)] Brno: FSI VUT in Brno, 2007.
- [2] ŠTĚTINA, J. et al. Parametrická studie plynule litého ocelového sochoru 150 × 150 mm [Parametric Study of Continuously Cast Steel Billet 150 × 150 mm]. *Hutnické listy*, 70 (2017) 3, 29–39. ISSN 0018-8069.
- [3] ŠTĚTINA, J. *Optimalizace parametrů lití sochorů pomocí modelu teplotního pole*. (Habilitation work) [Optimisation of parameters for casting of billets with the use of the temperature field model (Habilitation work)] Ostrava: VŠB-TU Ostrava, FMMI, 2008.
- [4] ŠTĚTINA, J. et al. Historie tvorby, vývoje a ověření originálního numerického modelu teplotního pole pro proces plynulého odlévání bram provozovaný ve VÍTKOVICE STEEL a.s. [History of creation, development and verification of the original numeric model for temperature field for the process of continuous casting of slabs used in the steelworks]. *Hutnické listy*, 70 (2017) 1, 4–16. ISSN 0018-8069.
- [5] ŠTĚTINA, J. et al. Začlenění dynamického modelu BrDSM teplotního pole plynule odlévané bramy do řídicího systému ve VÍTKOVICE STEEL a.s. [Implementation of dynamic model BrDSM of temperature field of the cast slab into the control system at the steel works VÍTKOVICE STEEL a.s.] *Hutnické listy*, 70 (2017) 1, 17–34. ISSN 0018-8069.
- [6] ŠTĚTINA, J. *Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy*. (Disertační práce) [Dynamic model of temperature field of the continuously cast slab (Dissertation)] Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007.
- [7] BRIMACOMBE, J. K. The Challenge of Quality in Continuous Casting Process. *Metallurgical and Materials Trans. B*, 30B (1999), 553–566.
- [8] MIETTINEN, J., LOUHENKILIPPI, S., LAINE, J. Solidification Analysis Package IDS. In: *Proceeding of General COST 512 Workshop on Modelling in Materials Science and Processing*, M. Rappaz and M. Kedro eds., ECSC-EC-EAEC, Brussels, Luxembourg, 1996.
- [9] RAUDENSKÝ, M., HORSKÝ, J. Secondary Cooling in Continuous Casting and Leidenfrost Temperature. *Ironmaking and Steelmaking*, 32 (2005) 2, Maney, UK.
- [10] THOMAS, B. G., O'MALLEY, R. J., STONE, D. T. Measurement of Temperature, Solidification, and Microstructure in a Continuous Cast Thin Slab. In *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VIII*, San Diego, CA, TMS, 1998.
- [11] HOOLI, P.O. Study of the Mould Flux Film between Mould and Steel Shell. In *4<sup>th</sup> European Continuous Casting Conf. Proc.*, 1, Birmingham, UK, October 14-16, 2002, pp. 379–386.
- [12] OMACHT, D., KUBÁNEK, Z., HURNÍK, A., GLOSSMANN, P. *Měření povrchových teplot plynule litého sochoru* (Technická zpráva, ZPO2 – 8. proud) [Measurement of surface temperatures of continuously cast billet (Technical report CCM2 – 8<sup>th</sup> strand)] Třinec: Třinecké železárny a.s., 2005.
- [13] BERNHARD, CH. Numerical Simulation of Solidification in Continuous Casting of Rounds. In *Continuous Casting of Billets and Modelling of Steelmaking Processes*, Třinec, October 2003.

## EU šetření proti pěti zemím kvůli ocelovému dumpingu před ukončením

tt.com

16.03.2017

Od léta 2016 běžící vyšetřování Evropské komise proti Srbsku a čtyřem dalším zemím kvůli obvinění, že exportují ocel do EU za dumpingové ceny, by mělo být co nevidět uzavřeno, výsledky by měly být předloženy v květnu. Určitý předběžný výsledek je ale znám již teď. Srbská ocelárna ve Smederevu, patřící od července 2016 čínskému koncernu HBIS, svoje exporty oceli do EU od srpna do listopadu 2016 nezvýšila. EK provádí šetření ale také proti Rusku, Iránu, Brazílii a Ukrajině, poté co si v květnu 2016 stěžoval evropský ocelářský svaz EUROFER. EUROFER tvrdil, že zmíněných pět zemí prodává svoji ocel o minimálně 20 % pod tržními cenami. Evropské šetření ukázalo, že exporty oceli pěti vyšetřovaných zemí do EU stouply v příslušném období o 14 %. Rusko zvýšilo export do EU o 73 %, Brazílie o 23 %. Irán a Ukrajina svoje exporty do EU zredukovaly, u Srbska nedošlo k žádné změně.

## ArcelorMittal spřádá plány pro Itálii

Frankfurter Allgemeine

22.03.2017

ArcelorMittal počítá ještě minimálně do konce roku 2018 s trvající robustní ocelářskou konjunkturou. Frank Schulz, šéf největšího ocelářského koncernu na světě pro Německo, poukazuje na dobrou poptávku po oceli od odvětví, jako je výroba automobilů, stavebnictví a strojírenství. Spotřeba oceli v Německu by měla letos vzrůst o 1 procento, v příštím roce předběžně o 1,5 procenta. Na roky 2017 a 2018 se díváme s opravdovým optimismem, řekl Schulz v Düsseldorfu. Také ceny se výrazně zvýšily, v průměru o dobrý dvoumístný procentuelní nárůst. Jenže stouply také ceny železné rudy a koksovatelného uhlí. Samozřejmě zůstávají obavy z obrovských přebytečných kapacit. Konsolidaci předpovídá Schulz i pro Evropu. Že se koncern snaží získat existující, deficitní a obrovskými ekologickými problémy zatíženou ocelárnu ILVA v Tarantu, není pro Schulze žádný protimluv. Říká, že by to bylo nové řešení pro Evropu. Schulz je toho názoru, že v této největší evropské ocelárně by bylo možné vyrábět vysoce kvalitní oceli nejen pro Evropu, ale také pro trhy v severní Africe a v Turecku.

## Parametric Study of Continuously Cast Steel Billet 150 × 150 mm

### Parametrická studie plynule litého ocelového sochoru 150 × 150 mm

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.; prof. Ing. František Kavička, CSc.; doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.;  
Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.; Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.

Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Energy Institute, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Czech Republic

*An application of the numerical model for computer simulations of the temperature field of continuously cast billet requires systematic experimentation and measurement of operational parameters on a real caster as well as in the laboratory. The measurement results, especially temperatures, serve not only for the verification of the exactness of the model, but mainly for optimization of the process procedure: real process → input data → numerical analysis → optimization → correction of real process. The most important part of the investigation is the measurement of temperatures in walls of the mould and surface temperatures of the billet in the zones of secondary and tertiary cooling. It is necessary to process the data before it is used, i.e. it is necessary to find a suitable method of filtering. The off-line model of the temperature distribution allows for comprehensive parametric studies into the influence of chemical composition, casting speed, temperature of overheating and cooling conditions in the secondary cooling on the temperature distribution of the cast billet.*

**Key words:** model tuning; temperature field; experimental measurement; parametric study; chemical composition; secondary cooling; casting speed; steel overheating; metallurgical length

*Aplikace numerického modelu teplotního pole kontinuálně litého sochoru vyžaduje systematický experimentální výzkum a měření provozních parametrů na reálném ZPO i v laboratoři. Výsledky měření, především teplot, slouží nejen k ověření přesnosti modelu, ale především k zajištění provázanosti těchto kroků: reálný proces → získání vstupních dat → provedení numerické analýzy → optimalizace technologických parametrů → korekce reálného procesu. Stejně je měření teplot ve stěně trubkového krystalizátoru pomocí termočlánků a na povrchu sochoru v zóně sekundárního a terciárního chlazení pomocí pyrometrů. Při ověřování a upřesňování modelu bylo vhodné provést experimentální měření povrchových teplot sochoru těsně pod krystalizátorem. Trvalé měření teplot pomocí tří pyrometrů se ukázalo jako nutné ve dvou zónách sekundárního chlazení a na výběhu za tažně-rovnací stolicí. Off-line model teplotního pole umožňuje provedení i rozsáhlých parametrických studií vlivu chemického složení oceli, licí rychlosti, rychlosti přehřátí a sekundárního chlazení na výsledné teplotní pole sochoru. Výsledky studií slouží k ověření správnosti numerického modelu, k ověření používaných empirických vztahů, k nastavení technologických předpisů pro dané sochorové ZPO i při přípravě komplexní optimalizace výroby. Ke srovnání vlivu různých vstupních parametrů je nejvhodnější zvolit grafické vyhodnocení metalurgické délky, maximální délky tekuté fáze, nárůst ztuhlé licí kůry, teploty povrchu sochoru v místě rovnání a teploty jeho povrchu těsně před výstupem z klece ZPO. Je připojena úvodní studie vlivu elektromagnetického míchání na teplotní pole sochoru. Ukazuje se, že vliv míchání je při použití hustotě výpočtové sítě zanedbatelný.*

**Klíčová slova:** ladění modelu; teplotní pole; experimentální měření; parametrická studie; chemické složení; sekundární chlazení; rychlost lití; přehřátí oceli; metalurgická délka

### 1. Model tuning and its verification

The research of thermo-kinetics of solidification and cooling of continuously cast billets requires a systematic experimental research on a real continuous casting machine (CCM). Its results were used not only for tuning of the numerical model of the temperature field but also for its verification. Long-term experimental measurement provided a continuous correction of numerical analysis of the real process. Experimental investigation in the steelworks would be very costly and they would be complicated from the organization point

of view because it is not allowed to endanger or to influence the production. For tuning of the model, it was therefore necessary to use quantities that were already measured by the existing CCM control system.

The usually measured quantities are the steel temperature in the tundish, the water flow through the mould including its temperature and the billet surface temperature measured by pyrometers at different places. For tuning of the model and for verification of the submodel for the mould temperature field it was advisable to perform experimental measurement of surface temperatures just below the mould.

### 1.1 Experimental measurement for model verification

On the basis of the analysis and spatial possibilities of the CCM2 in the steelworks Třinecké železářny [1] and with regard to the possibility of placing the measuring device in the process plant, the following measuring points were chosen (Fig. 1):

a) measuring point No. 1 – 3 (under the mould – zone II.A), Fig. 2

b) measuring point No. 4 (zone III.A), Fig. 3

c) measuring point No. 5 (at the outlet, behind the drawing-straightening stand), Fig. 4

All the measuring points are on the billet eighth utmost strand as it is shown in Fig. 4. Dimensions in the diagrams of the measuring points or of the plane of the nozzles in the right part of Figs. 2 to 4 represent the distances from the lower edge of the mould.

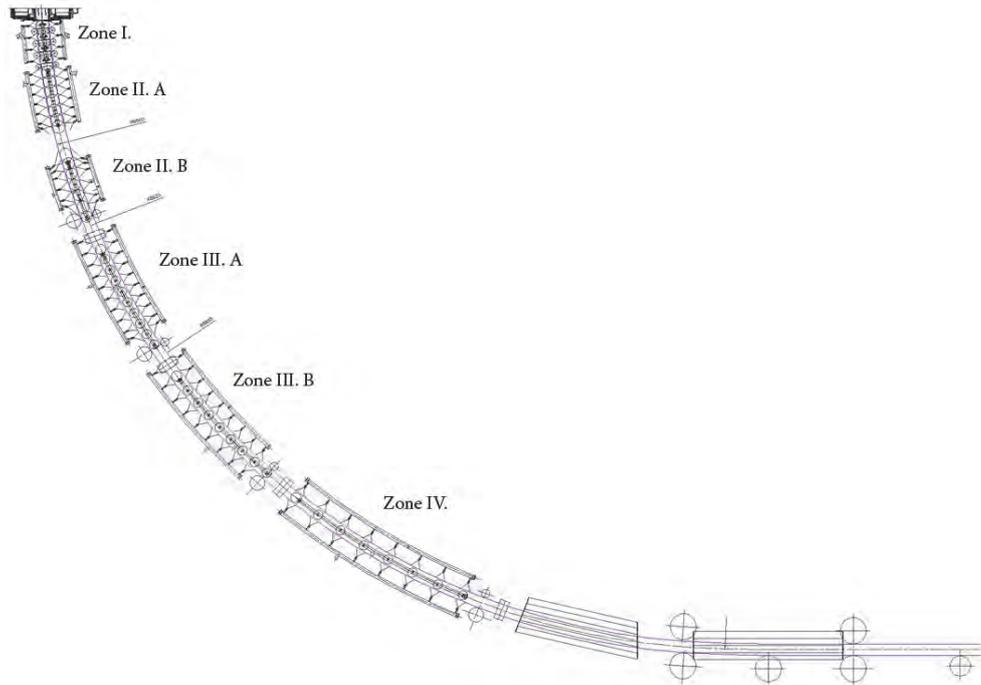


Fig. 1 Diagram of layout of the nozzles in the radial part of the caster and their assignment to the zones

Obr. 1 Schéma umístění trysek na oblouku stroje a jejich přiřazení do zón

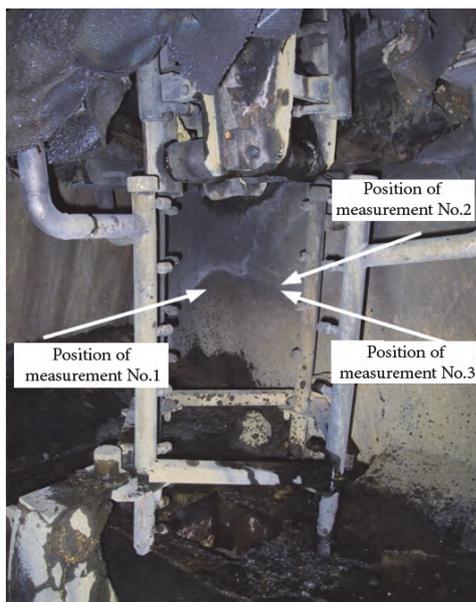
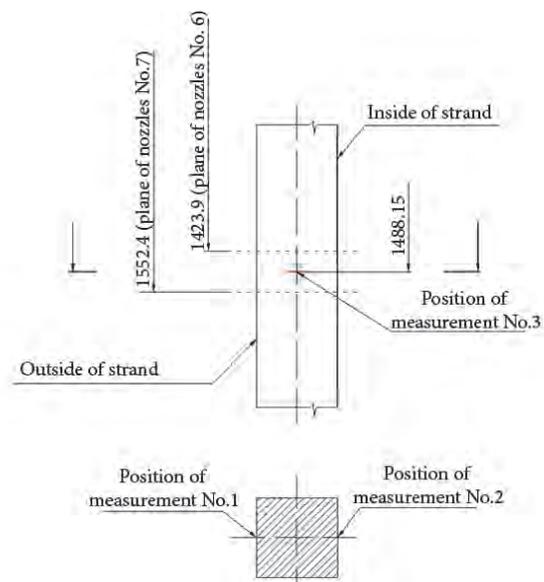


Fig. 2 Diagram of the layout of the pyrometers in the zone II. A (pyrometers Nos. 1 – 3)

Obr. 2 Schéma umístění pyrometrů v II. A zóně (pyrometr č. 1 – 3)



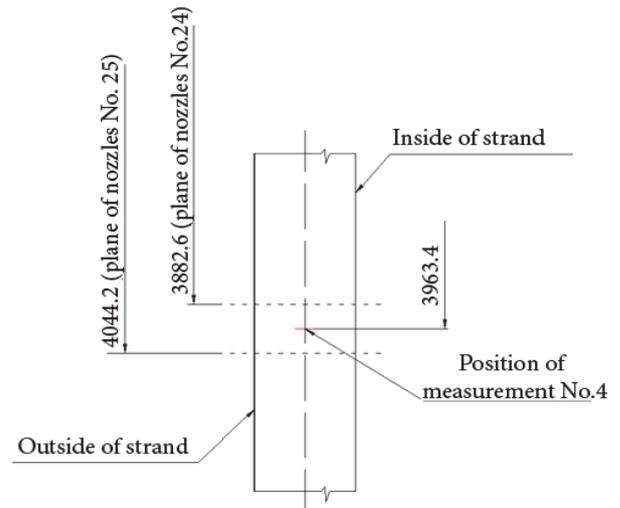


Fig. 3 Diagram of location of the pyrometers below the SEMS (pyrometer No. 4)  
Obr. 3 Schéma umístění pyrometru za elektromagnetickým míchačem (pyrometr č. 4)

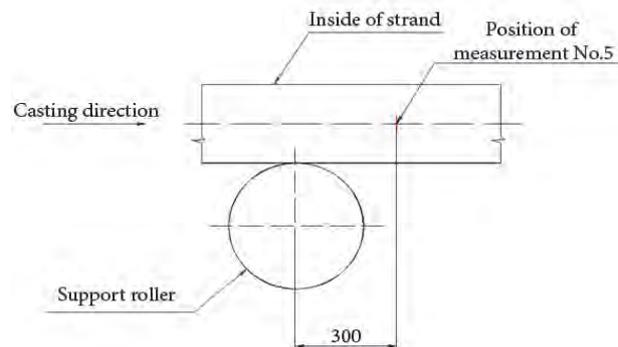
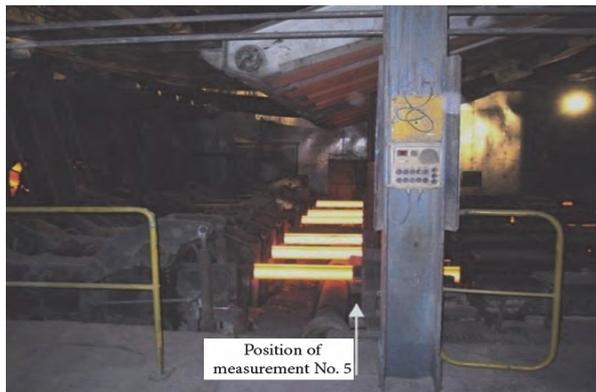


Fig. 4 Diagram of location of the pyrometer at the end of the caster (pyrometer No. 5)  
Obr. 4 Schéma umístění pyrometru na výběhu (pyrometr č. 5)

The measured values were classified according to heats and other technological data were assigned to them such as: casting speed, water flow rate, etc. (Fig. 5). It was necessary to use the filtration of the measured pyrometers [2, 3]. During processing of measurement results, the filtration with the use of recursive median filter proved to be the most appropriate. The diagram in Fig. 6 shows the evolution of the measured data from pyrometers filtered by the median recursive filter with the filter order  $r = 5$ .

$$y_i = \text{median} \{y_{i-r}, \dots, y_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+r}\} \quad (1)$$

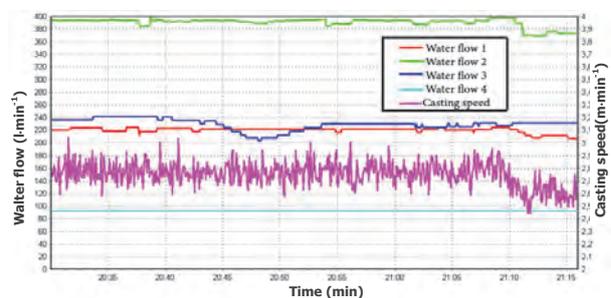


Fig. 5 Values of parameters from operational measurement for the heat of the steel grade TERMEX-1

Obr. 5 Hodnoty parametrů z provozního měření pro tavbu s ocelí značka TERMEX-1

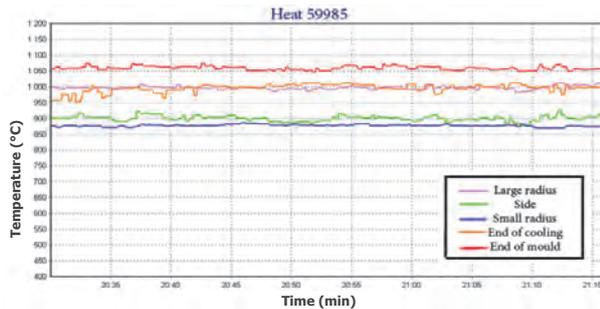


Fig. 6 Measured surface temperature for the heat of the steel grade TERMEX-1, processing by means of median recursive filter

Obr. 6 Měření povrchové teploty pro tavbu oceli TERMEX-1, zpracování mediánovým rekurzivním filtrem

Temperature measurements showed a great asymmetry between the surface temperatures at small and big radiuses at the point of bending of the casting strand. As stated in the article [4], the CCM billet is symmetrical along the circumference of the profile. The measurements, however, show that functional symmetry is not reflected here. According to Fig. 6, the difference between surface temperatures in the first measurement point exceeds 200 °C. The main reason for this asymmetry is the varying intensity of heat removal from the small and big radiuses in the mould. The surface of the continuously cast blank has therefore a different surface temperature after leaving the mould. Due to the fact that effect of the Leidenfrost temperature [5] is applied, there will be more pronounced asymmetry of surface temperatures on the small and big radiuses. This problem could be solved with the use of other nozzles in zones I. and II. A, which would have different dependences of the heat transfer coefficient on the surface temperature.

## 1.2 Continuous measurement of surface temperatures

On the basis of the experience with measurements described in paragraph 1.1, three pyrometers were permanently installed on the CCM, including their integration into the operational information system. The results of the measured temperatures were continuously available for the CCM operator and they were simultaneously used as input parameters for the on-line model of the temperature field.

The following positions were chosen for the permanent installation of pyrometers on the CCM2 on the side wall of the utmost eighth strand:

- zone IIA, between the 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> nozzle from the top, i.e. 1.145 m below the mould lower edge (Fig. 1),

- zone IIIA, between the 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> nozzle from the top, i.e. 3.685 m below the mould lower edge,
- outlet (behind the drawing-straightening stand), i.e. 16.7 m below the mould lower edge.

Fig. 7, for example, presents photographs of installation of the pyrometers in real operation during casting, namely (a) in the zones III.A and b) in the outlet. Fig. 8 shows the position of those three pyrometers permanently installed on the CCM – they are marked with black dots.



a) Pyrometer in the zone III.A during the casting  
a) Pyrometr v zóně III.A během lití



b) Pyrometer at the end of the caster during the casting  
b) Pyrometr ve výběhu během lití

Fig. 7 Permanently installed pyrometers  
Obr. 7 Fyzické zobrazení trvale umístěných pyrometrů

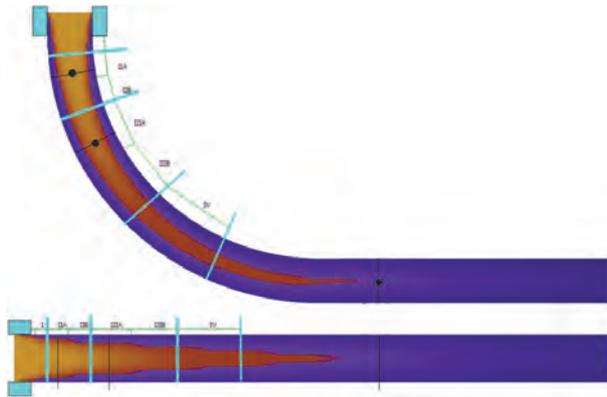


Fig. 8 Diagram of locations of the measuring pyrometers (black points)

Obr. 8 Schéma umístění měřících míst pyrometrů (černé tečky)

The majority 180 measured quantities on the billet CCM from the control levels I and II entered the software of the temperature model and was stored in the database. The user of the temperature model can select and plot from these measured and also calculated and stored quantities. Due to the very large number of these quantities, we strived to select the principal ones, which include more influences.

For this purpose, a diagram was created comprising the casting speed, temperature of superheating, metallurgical length and surface temperatures calculated by the model, and measured by the pyrometers at the same locations (Fig. 9). When comparing the measured temperatures with the calculated ones, the average temperature of the four points closest to the location of the pyrometer was considered as the calculated value.

It was also necessary to monitor the heat dissipated by the mould. It was possible to verify the correct function of the mould model by the average billet surface temperature along its entire circumference at the lower edge of the mould.

The water flows in the individual zones had to be correlated with the surface temperatures behind the respective zone at the point without the nozzles (Fig. 10). Five temperature values were recorded in the database at characteristic cross-sectional points that were identical with the points in the diagram of the temperature history in Fig. 16 in [4]. For display purposes, in one case we chose the average temperature of all five points, i.e. it included also the corners. In another case, we chose the average temperature from only three temperatures in the centre of the sides, since the effect of cooler corners might have overshadowed the impact of cooling by the nozzle.

In the secondary cooling circuits, it was desirable to monitor not only the flow but also the water pressure. Water flow and water pressure are functions of the nozzle constant  $k$  [4]. Therefore, Fig. 11 shows the change of this parameter as an example of the monitored magnitude, which could indicate the state of the nozzles in the cooling circuit.

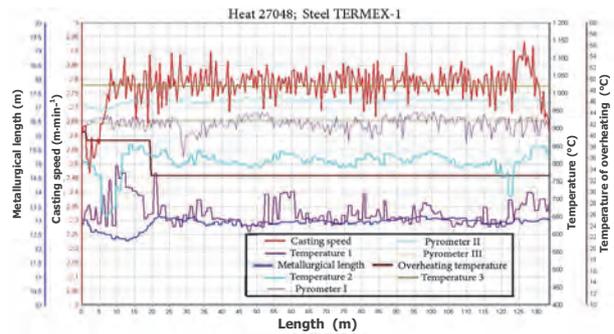


Fig. 9 Basic casting parameters and measured surface temperatures from the database of the model for the steel grade TERMEX-1

Obr. 9 Základní parametry lití a měřené povrchové teploty z databáze teplotního modelu pro ocel značky TERMEX-1

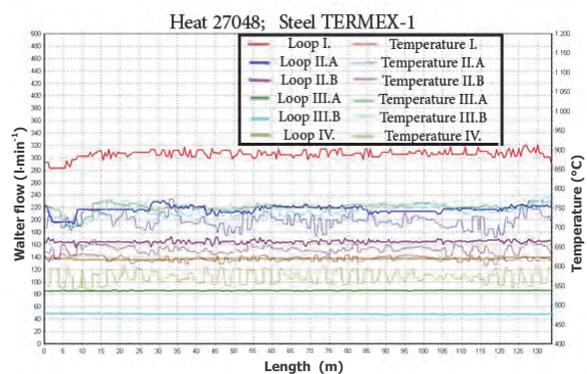


Fig. 10 Water flow rates in the secondary cooling circuits and calculated temperatures behind the zones from the database of the temperature model for the steel grade TERMEX-1

Obr. 10 Průtoky vody v okruzích sekundárního chlazení a vypočtené teploty za zónami z databáze teplotního modelu pro ocel značky TERMEX-1

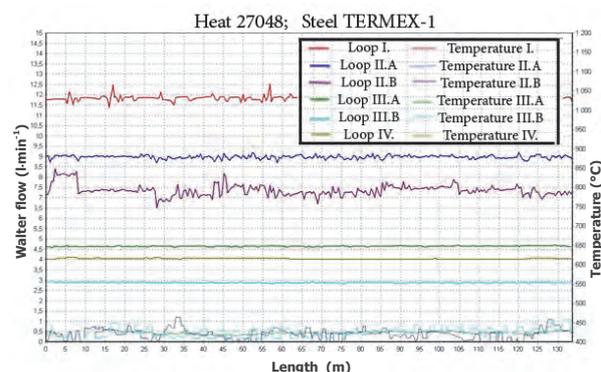


Fig. 11 Evolution of the nozzle constant and calculated temperatures behind zones from the database of the model for the steel grade TERMEX-1

Obr. 11 Průběh změny konstanty trysky a vypočtených teplot za zónami z databáze teplotního modelu pro ocel značky TERMEX-1

## 2. Parametric studies

Parametric studies of the influence of individual input technological parameters and properties on the resulting temperature field are the basic possibility of using the off-line version of the temperature field model. The scope of studies is made possible by parallelisation of

the code, which allowed shortening of the calculation time. With the large number of calculations that were performed, the effect of the time step on the calculation stability was monitored and its adaptation was continuously tuned. The results of these parametric studies can be used for validation of the used empirical relations, for proposing the technological standard operating procedures (SOP) for the CCM, for a complex optimisation and for set-up of a dynamic model.

Due to the fact that the result of the calculation was a 3D temperature field, it was necessary to analyse the influence of input parameters to which it is possible to clearly define and compare the final output parameters or to choose a graphical comparison of the output parameter. The maximum metallurgical length, the maximum length of the liquid phase and the surface

temperatures after the individual cooling zones were found to be the most suitable for such comparison. We present here only the results for steel grade TERMEX-1. The cooling of the mould was performed according to the technological standard operating procedures and the measured values, the inlet temperature of cooling water was always considered to be 20 °C, as well as the ambient temperature (air) 20 °C.

## 2.1 Study of influence of chemical composition on the temperature field

The basic recommended composition of steel for the casting of billets is given in tab. 1. The table lists one or two characteristic steels for each of the four groups. The list is supplemented with the liquidus and solidus temperature.

Tab 1 Sorting of steel grades into groups and subgroups according to their chemical composition

Tab. 1 Rozdělení ocelí do skupin a podskupin podle chemického složení

Group	Family	Steel grade	$T_{\text{LIK}}$	$T_{\text{SOL}}$	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	V	Ti
			(°C)											
1	C15	P2-04B	1531	1489	0.020	0.300	0.040	0.010	0.010	0.065	0.050	0.040	0.000	0.000
2	B20	1220	1523	1477	0.100	1.025	0.075	0.010	0.010	0.060	0.075	0.075	0.015	0.000
3	A31	TERMEX-1	1515	1457	0.180	0.725	0.200	0.020	0.020	0.200	0.075	0.075	0.000	0.000
	D50	C45EKL	1491	1402	0.460	0.650	0.300	0.015	0.015	0.100	0.200	0.200	0.000	0.000
4	B73	C82DPC	1466	1342	0.840	0.700	0.200	0.008	0.007	0.125	0.085	0.100	0.000	0.000

The previous article [4] discussed the thermo-physical properties of the five selected steels from table 1 with significantly different chemical composition. To make the effect of the chemical composition of steel, especially of a different carbon content, on the temperature field of the billet more evident, the other casting parameters were chosen equally, i.e. the casting speed of 2.8 m·min<sup>-1</sup> and the temperature of overheating of 30 °C.

Fig. 12 compares the length of the liquid phase determined by the numerical model with the metallurgical length of the steel billet from the table 1 if the following is used at CCM2: a) cooling according to the applicable technological standard operating procedure for each steel and b) identical cooling for all steel grades.

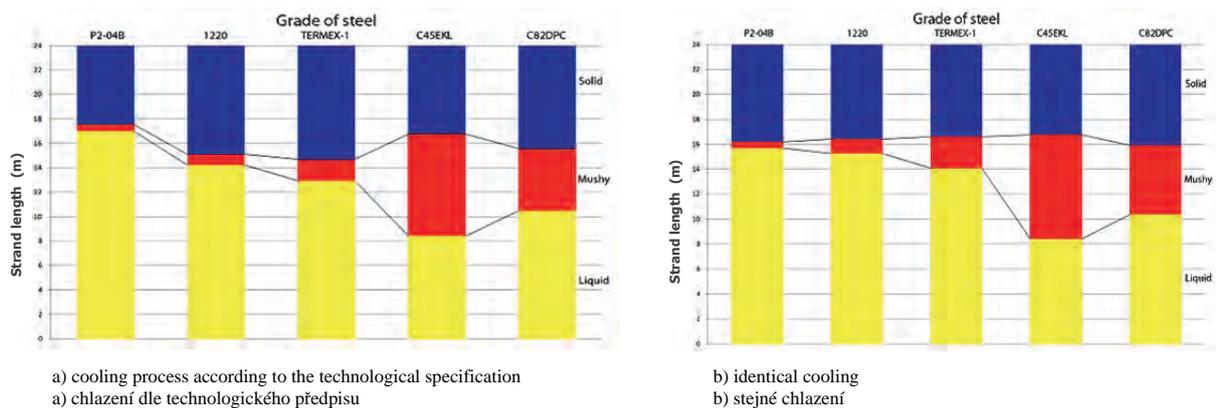
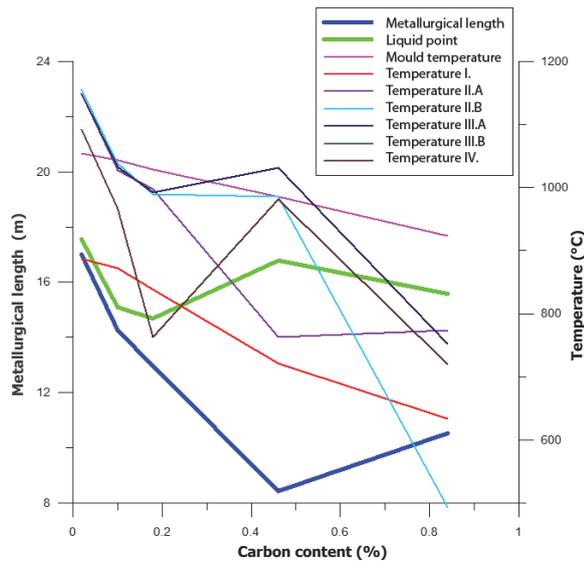


Fig. 12 Comparison of the length of the liquid phase and the metallurgical length for various steel grades

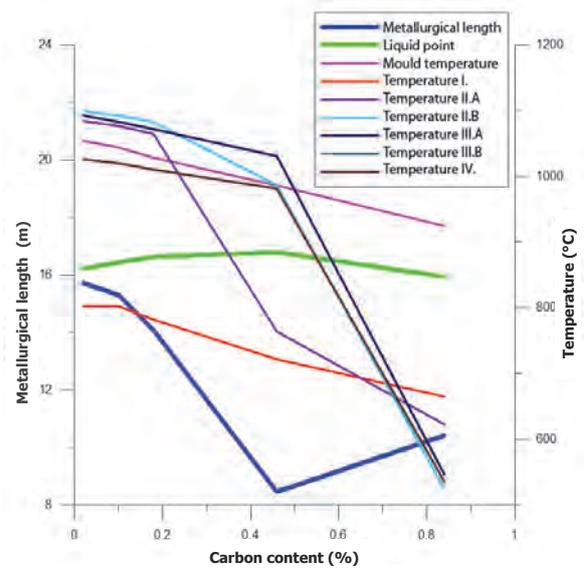
Obr. 12 Porovnání délky tekuté fáze a metalurgické délky pro různé značky oceli

Fig. 13 illustrates the effect of carbon content of steels from table 1 on the metallurgical length: a) at cooling according to the technological standard operating procedure, b) at identical cooling. In practice, a different cooling mode or different cooling curve is selected for

each group of steels according to the currently used technological standard operating procedure. The purpose of this comparison was to find out whether the cooling curves used for an individual group of steels are optimal.



a) cooling process according to the technological specification  
a) chlazení dle technologického předpisu



b) identical cooling  
b) stejné chlazení

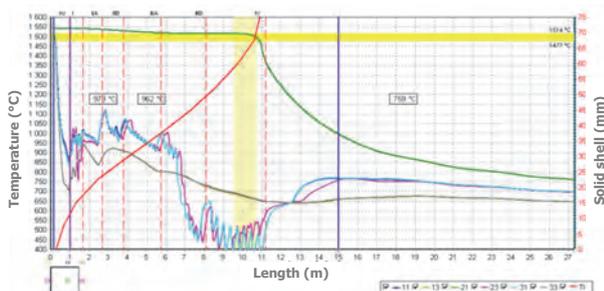
Fig. 13 Influence of the chemical composition on final parameters  
Fig. 13 Vliv chemického složení na výsledné parametry

## 2.2 Influence of the casting speed and superheating of steel

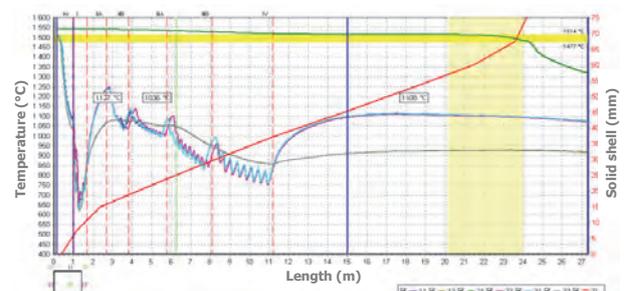
The casting speed is one of the basic technological parameters of continuous casting. For the steel grade TERMEX-1 presented here, the operating speed range between 2.00 and 4.00 m·min<sup>-1</sup> was considered. The water flow through the secondary cooling was increased linearly with the casting speed according to the technological standard operating procedure. The other input parameters, especially the overheating of 30 °C, were again left constant. It is not necessary to

investigate the effect of higher casting speed because the metallurgical length would exceed the length of the CCM. On the other hand, lower casting speeds are used only for a short time, e.g. in the event of a risk of breakout.

For comparison, in Fig. 14 we chose the temperature history of the same cross-sectional points along the length of the CCM in combination with a diagram of the growth of the solidified strand shell for the lowest and highest casting speed of 2.00 and 4.00 m·min<sup>-1</sup>, respectively.



a) 2.0 m·min<sup>-1</sup>



b) 4.0 m·min<sup>-1</sup>

Fig. 14 Temperature history of selected points in the billet cross-section during its passage through the caster and growth of the strand shell for two casting speeds

Obr. 14 Teplotní historie zvolených bodů příčného řezu sochorem při jeho průchodu ZPO a nárůst lící kůry pro dvě rychlosti liti

From the diagrams in Fig. 14 and from the summary diagram in Fig. 15, an approximate linear dependence of the metallurgical length and of the length of the liquid phase on the casting speed is evident. The break occurs at the speed of 3.5 m·min<sup>-1</sup> when the secondary cooling was already insufficient. The speed in the range from 3 to 3.5 m·min<sup>-1</sup> appeared to be optimal at the adjusted

secondary cooling. The speed used in the range of 2.8 to 3 m·min<sup>-1</sup> was unnecessarily low.

The casting temperature must always be higher than the liquidus temperature to ensure, with a sufficient reserve, a transport of the liquid steel from the tundish through the casting nozzle to the CCM so that pouring of the melt from the tundish through a submerged entry nozzle

is perfectly secured. From the operational point of view, it was, therefore, desirable that the casting speed with the decreasing overheating temperature would increase. Fig. 16 shows how the overheating above the liquidus temperature affected the metallurgical length. With a decreasing overheating temperature, the metallurgical length is shortened, allowing for a higher casting speed. This finding was consistent with the need to ensure

timely a pouring of the tundish. The calculations showed that the influence of overheating on the surface temperatures of the billet was much smaller than that of the slab CCM on the surface temperature of the slab [5]. It was necessary to make this parametric study for steels from all four groups because, for example, the influence of superheating on steels with a wide solidification interval may be different.

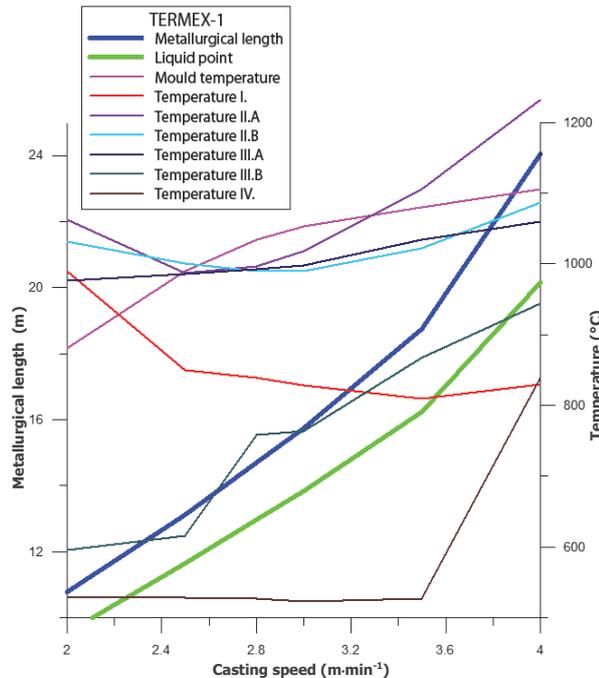


Fig. 15 Influence of the casting speed on selected parameters; steel grade TERMEX-1, temperature of overheating 30 °C

Obr. 15 Vliv licí rychlosti na vybrané parametry, ocel TERMEX-1, přehřátí 30 °C

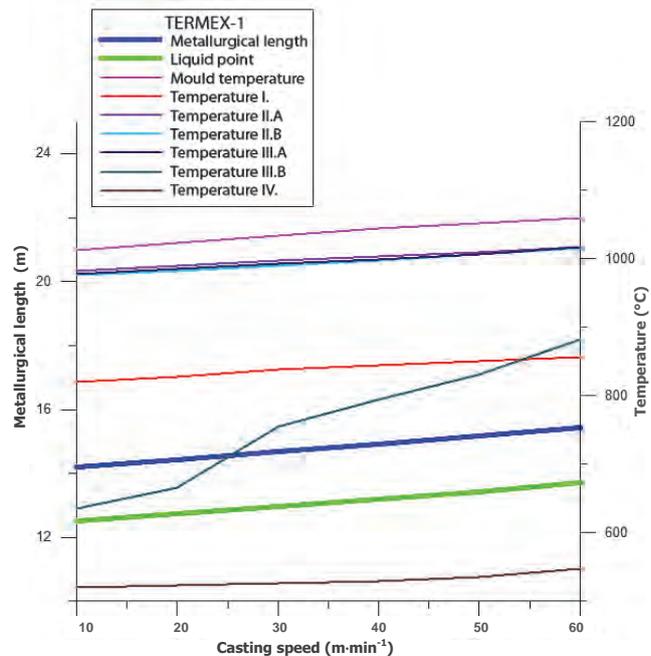


Fig. 16 Influence of the temperature of overheating, the steel grade TERMEX-1, the casting speed 2.8 m·min<sup>-1</sup>

Obr. 16 Vliv teploty přehřátí, ocel TERMEX-1, rychlost 2,8 m·min<sup>-1</sup>

### 2.3 Influence of secondary cooling

Setting the secondary cooling and its optimisation is a complex problem. The paper, therefore, studies only the effect of the secondary cooling on the temperature field for casting of the steel grade TERMEX-1 at the casting speed of 2.8 m·min<sup>-1</sup> and overheating of 30 °C.

The real operation uses the so-called cooling curves, for example, according to Fig. 17. The diagrams describe the dependence of the required flow rates (l·min<sup>-1</sup>) on the desired casting speed (m·min<sup>-1</sup>), each for a certain cooling intensity characterised by consumption of cooling water per 1 kg of the cast steel. These cooling curves were compiled for the particular CCM2 for the cooling zones I to IV (Fig. 1). The point is that in real operation, only four cooling zones were for simplicity set (regulated): I, II, III and IV. The water distribution between the zones II.A and II.B and between the zones III.A and III.B [6] was fixed and could not be changed during casting.

A comparison of the different characteristics of the calculated billet temperature for different cooling curves of 7 l·kg<sup>-1</sup> and of 20 l·kg<sup>-1</sup> is shown in Fig. 18.

From the resultant temperature fields for individual cooling curves, a summary diagram in Fig. 19 was compiled in the range of the values from 7 to 20 l·kg<sup>-1</sup>. This basic set of graphical dependencies served the user for an assessment which of the cooling curves was optimal for the cast steel. The cooling curves were ordered according to the amount of water in all zones.

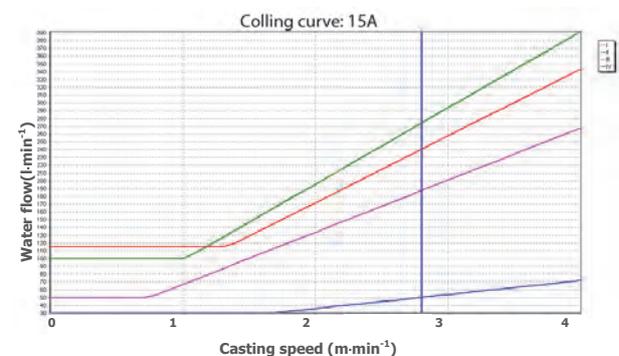


Fig. 17 Example of the cooling curves 15 l·kg<sup>-1</sup>

Obr. 17 Příklad chladičích křivek 15 l·kg<sup>-1</sup>

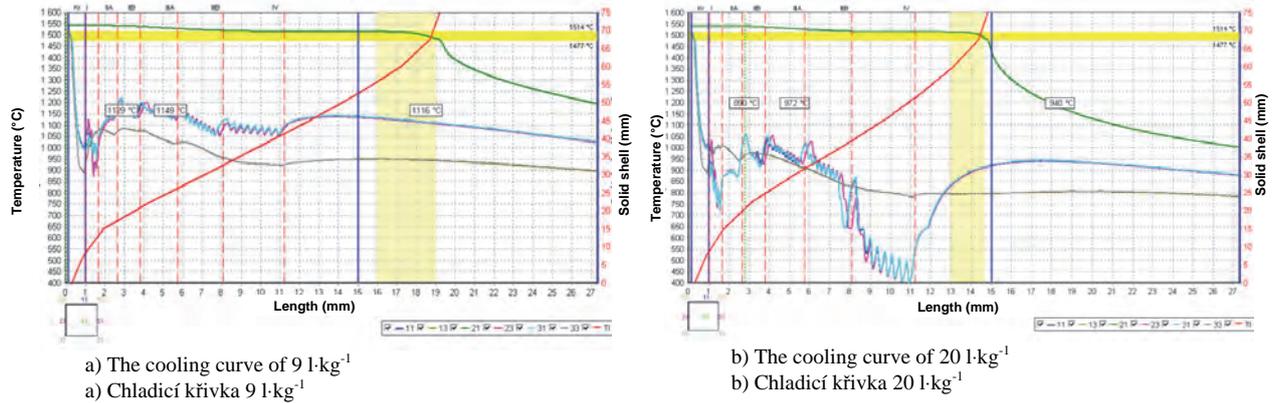


Fig. 18 Temperature history of selected points of the billet cross section during its passage through the caster and growth of the strand shell for two cooling curves

Obr. 18 Teplotní historie zvolených bodů příčného řezu sochorem při jeho průchodu ZPO a nárůst licí kůry pro dvě chladicí křivky

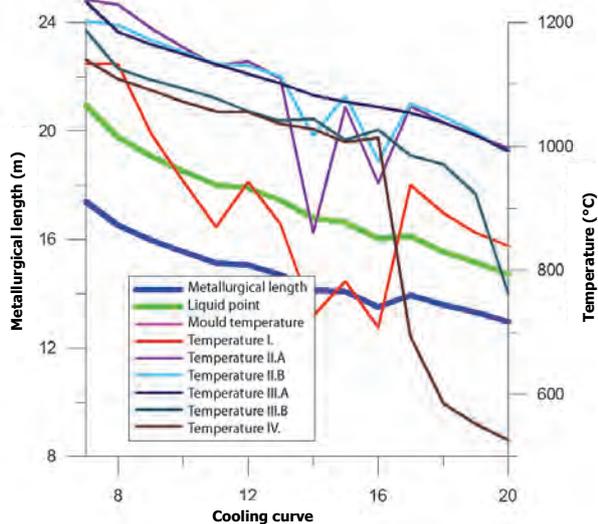


Fig. 19 Evolution of selected calculated parameters in dependence on the cooling curve

Obr. 19 Průběh vybraných vypočtených parametrů v závislosti na chladicí křivce

### 3. Electro-magnetic stirring

The CCM for casting of steel billets uses rotary stators of electro-magnetic stirring systems (Fig. 20). The velocity of movement of the molten steel, which is caused by electro-magnetic stirring, ranges from  $0.1$  to  $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Electro-magnetic stirring applied to the CCM is inherently a very complex magneto-hydraulic process, moreover combined with the processes of crystallisation and solidification of the continuously cast steel. The complexity of the whole steel casting process is further amplified by the fact that a large range of

casting temperatures is used from a high casting temperature to a temperature well below the solidus temperature after passing through the entire CCM. From the material and physico-chemical points of view, the evolution of the process is co-determined by a wide spectre of material and thermo-kinetic characteristics of the continuously cast steel, electrical and magnetic quantities that apply to the given steel composition. Also, evolution of the process of casting is influenced by a wide spectre of parameters of the CCM design and functional parameters, parameters of the CCM, construction and working parameters of electromagnetic stirring, as well as the parameters of their mutual arrangement and synchronization. Previous papers [7 to 10] show that the exact mathematical modelling of electromagnetic mixing in the CCM is still very difficult to solve. In principle, however, the possibility exists using the theory of physical similarity [1, 11, 12] of qualitative to semi-quantitative assessment of the mutual causality of material, thermo-kinetic, electro-magnetic and hydraulic quantities, including their interaction between the liquid and solid phases. The presented and discussed model of the temperature field presented in the paper and its use for optimising the casting parameters, particularly the casting speed and secondary cooling, works with a relatively rough computational mesh so that calculations can run in real time. Therefore, it is not possible to model the flow of liquid steel caused by electro-magnetic stirring in the mould. In order to encompass the influence of electro-magnetic stirring on the formation of the temperature field, we chose the following procedure. From the business data of the company CONCAST [13] that supplied the CCM, we obtained a diagram of the maximum flow speed along the mould height for two different excitation currents (50 and 200 A) for the electro-magnetic stirrer according to Fig. 20.

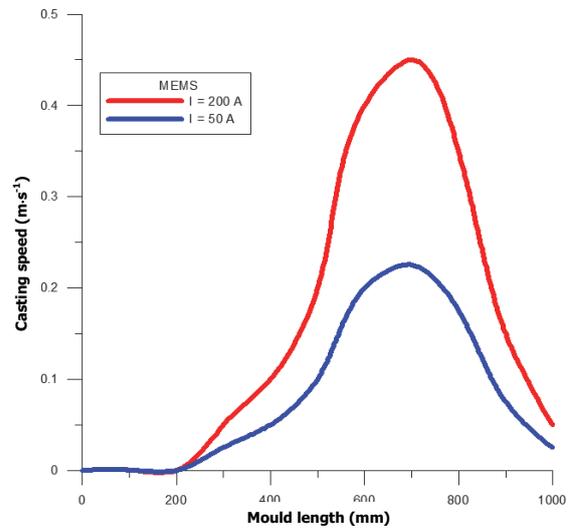
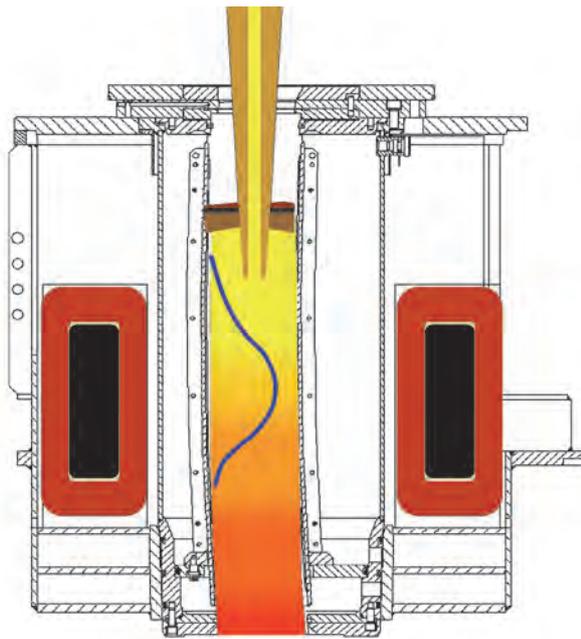
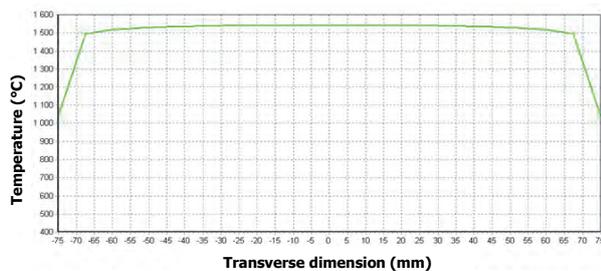


Fig. 20 Diagram of the mould with location of the electro-magnetic stirrer and its parameters

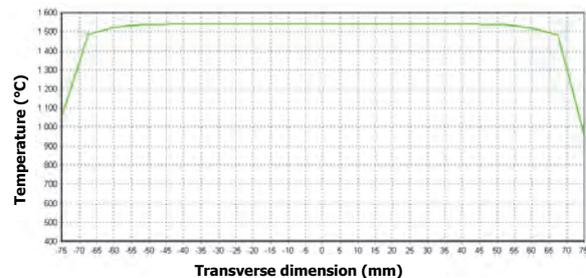
Obr. 20 Schéma krystalizátoru včetně umístění elektromagnetického míchače a jeho parametrů

In the resultant algorithm implemented into the temperature field model, the curves of casting speeds in dependence on the mould height (Fig. 20) were stored in the database, and for other values of the excitation current the maximum speed values were interpolated or extrapolated. From obtained maximum tangential speed, the components of speed  $w_x$  and  $w_y$  were calculated for each mesh elements having all nodes of the network above the liquidus temperature. Then the Fourier-Kirchhoff equation with all three components of the speed rychlosti  $w_x$ ,  $w_y$  and  $w_z$  was solved [5].

Fig. 21 shows a comparison of the temperature profile in the axial section at the depth of 600 mm below the top edge of the mould with switched-off stirring (current 0 A) and with switched-on stirring (200 A). It can be seen from the figures that the influence of stirring on the temperature field calculated on this mesh is negligible and that the greatest difference is caused by the equalisation of the heat flow dissipated through the mould wall of the small and big radiuses.



a) The current of 0 A  
a) Proud 0 A



b) The current of 200 A  
b) Proud 200 A

Fig. 21 Comparison of the temperature field for various values of the electric current for the stirrer at a distance of 600 mm under the mould upper edge

Obr. 21 Porovnání teplotního pole pro různé proudy míchače ve vzdálenosti 600 mm pod horní hranou krystalizátoru

## Conclusions

Research of thermo-kinetics of solidification and cooling of continuously cast billets requires a systematic experimental measurement on a real CCM. Its results will be used not only for tuning of the numerical model of the temperature field but also for assessment of the accuracy of this model. Experimental measurement also

provides a continuous correction of the real process based on its numerical analysis. The main measured variables are the temperatures in the mould walls, the surface temperature of the continuously cast blank at the outlet from the mould, in the cooling zones of the secondary cooling and at the casting strand outlet. The off-line version of the model of the temperature field allowed to assess the influence of the chemical

composition of the steel, in particular of the carbon content, the casting speed, the superheating of the steel and the influence of the secondary cooling on the resulting temperature field. For comparison, the value of metallurgical length, of the growth of the solidified shell, and the temperature history of characteristic cross-sectional points during its passage through the entire CCM were chosen.

### Acknowledgements

*This publication was prepared during the solution of the NETME CENTRE PLUS project (LO1202) with financial support from the Ministry of Education, Youth and Sports under the National Sustainability Program I.*

*Tato publikace vznikla řešením projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finanční podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci Národního programu udržitelnosti I.*

### Literature

- [1] KAVIČKA, F., ŠTĚTINA, J., SEKANINA, B., STRÁNSKÝ, K. *Výzkum, vývoj a zavedení do výroby dynamického modelu řízení technologie pro plynulé odlévání sochorů. (Závěrečná zpráva o řešení části projektu výzkumu a vývoje MPO ČR č.FI-IM/021) [Research, development, and implementation into production of a dynamic model for control of technology for continuous casting of billets. (Final report on the solution of a part of the research and development project of the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic No. FI-IM / 021)], Brno: VUT in Brno, 2007.*
- [2] THOMAS, B. G., O'MALLEY, R. J., STONE, D. T. *Measurement of Temperature, Solidification, and Microstructure in a Continuous Casting Thin Slab. In Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VIII, San Diego, TMS, 1998.*
- [3] ŠTĚTINA, J. *Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy. (Diplomová práce) [Dynamic model of temperature field of the continuously cast slab. (Dissertation thesis)], Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007.*

- [4] ŠTĚTINA, J. et al. Numerical Off-line Model of Temperature Field of a Continuously Cast Billet and its Preparation, *Hutnické listy*, 70 (2017) 3, 4–17. ISSN 0018-8069.
- [5] ŠTĚTINA, J. et al. Začlenění dynamického modelu BrDSM teplotního pole plynule odlévané bramy do řídicího systému ve VÍTKOVICE STEEL a.s. [Integration of the Dynamic Solidification Model BrDSM of Temperature Field for Continuous Slab Casting to the Control System in VÍTKOVICE STEEL a.s.], *Hutnické listy*, 70 (2017) 1, 17–34. ISSN 0018-8069.
- [6] ŠTĚTINA, J. *Optimalizace parametrů lité sochorů pomocí modelu teplotního pole. (Habilitationní práce) [Optimisation of parameters for the casting of billets using the temperature field model. (Habilitation thesis)], Ostrava: VŠB-TU Ostrava, FMMI, 2008.*
- [7] BIRAT, J.P. *Modelling and Process Control in the Steel Industry. La Revue de Métallurgie – CIT*, 94 (1977) 11, 1347–1367.
- [8] THOMAS, B.G., NAJJAR, F.M. *Finite-element modelling of turbulent fluid flow and heat transfer in continuous casting. Applied mathematical modelling*, 15 (1991) 5, 226–243.
- [9] THOMAS, B.G., LUI, D., HO, B. *Effect of Transverse and Oscillation Marks on Heat Transfer in the Continuous Casting Mold. In Applications of sensors in materials processing, Orlando, USA, 1997, pp. 117–142.*
- [10] FRUEHAN, R. J. *The Making, Shaping and Treating of Steel: Steelmaking and Refining Volume. The Casting Volume of the 11th Edition of the Making, Shaping and Treating of steel. The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, USA, 2003.*
- [11] STRÁNSKÝ, K. et al. *Electromagnetic Stirring of the Melt for Production of the Continuously Cast Billets and its Importance. Hutnické listy*, 62 (2009) 3, 26–30. ISSN 0018-8069.
- [12] KAVIČKA, F., STRÁNSKÝ, K., SEKANINA, B., ŠTĚTINA, J., DOBROVSKÁ, J. *The Effect of Electromagnetic Stirring on the Crystallization of Concast Billets. Materiali in tehnologije/ Materials and technology*, 45 (2011) 2, 163–166.
- [13] SMS Concast, 2017. SMS Concast [online]. Switzerland: SMS Group [cit. 2017-04-24]. Available from: <http://www.sms-concast.ch/news-media/publications.html>.

## Průmysl: ocel není v Bruselu dostatečně hodnocena

*Westdeutsche Allgemeine*

17.03.2017

Přínos oceli k odvětví recyklace není EU dostatečně hodnocena, kritizuje Hospodářské sdružení Ocel (WV Stahl) čtyři směrnice, projednávané Evropským parlamentem. Prezident WV Stahl Hans Jürgen Kerkhoff říká: „Měly by být vytvořeny stimuly pro odvětví recyklace a neměly by být vytvářeny nové překážky různými seznamy opatření s návrhy nových daní a dávek“. Ocel může být recyklována stále dokola a je tak parádním příkladem pro funkční recyklační hospodářství. Jako velice neuspokojivou kritizuje WV Stahl také skutečnost, že má být členským státům znovu přidán navíc čas k dosažení zadaných předloh, jakož i časový prostor pro stanovení určitých kritérií. „Nepotřebujeme Evropu dvou rychlostí v ekologické politice, tím se odvětví recyklace v EU nepomůže,“ kritizuje prezident odvětvového svazu.

## Oceláři na východě dostanou od dubna víc peněz

*unternehmen-heute.de*

21.03.2017

Po ocelářích na severozápadě dostane přidáno i 8000 zaměstnanců ocelářského odvětví i ve východním Německu. Zaměstnavatelé a IG Metall se shodli na tom, že zaměstnanci dostanou od dubna přidáno o 2,3 %. Od května 2018 pak o dalších 1,7 %. Dohoda tarifních partnerů pro východní Německo převzala všechny podstatné části dohody, která byla podepsána minulý týden pro 72 000 zaměstnanců na severozápadě Německa.

## Casting Technologies of Manufacturing of Metallic Foams and Possibilities of Their Use as a Heat Exchanger

### Slévárenské technologie výroby kovových pěn a možnosti jejich využití coby výměníku tepla

Ing. Ivana Kroupová; Ing. Filip Radkovský; doc. Ing. Petr Lichý, Ph.D.

VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Metallurgy and Materials Engineering, Department of Metallurgy and Foundry, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, Czech Republic

*Metallic foams are materials with broad applicability in many different areas (e.g. automotive industry, civil engineering industry, medicine, etc.). These metallic materials have artificially created pores in their structure. These pores give them specific properties, such as large rigidity at low density, high thermal conductivity, capability to absorb energy, etc. Since the discovery of porous metallic materials numerous methods of production have been developed. Porous metallic materials can be made from liquid metal, from powdered metal, metal vapors, or from metal ions. The aim of the paper is to introduce casting methods for manufacturing of metallic foams with irregular and regular cell structure. All these manufacturing methods of metallic foams are based on conventional foundry technologies and materials. The aim of the paper is also to show a possibility of using metallic foam as a heat exchanger.*

**Key words:** casting; metallic foam; 3D modelling

*Kovové pěny jsou materiálem s širokým uplatněním v mnoha oborech lidské činnosti (např. automobilový průmysl, stavebnictví, medicína, aj.). Tyto materiály obsahují ve své struktuře uměle vytvořené póry. Tyto póry jim pak dávají mnoho výjimečných vlastností, jako je např. vysoká tuhost při nízké měrné hmotnosti, vysoká tepelná vodivost, schopnost absorpce energie atd. První zmínky o kovových pěnách pocházejí již z počátku 20. století, kdy se tyto pórovité kovové materiály začaly používat pro strojírenské účely. Ve dvacátých letech minulého století se začaly vyrábět a komerčně využívat pěny vyhotovené spékáním kovových prášků, které se používaly pro výrobu filtrů, baterií a samomazných ložisek. Ve francouzském patentu z roku 1925 nalezneme zmínky o kovových pěnách vyrobených vzpěněním materiálu, o třicet let později v USA začíná jejich komerční použití. Ale rozsáhlá výzkumná a vývojová činnost začala až v 90. letech a pokračuje dodnes. V současné době probíhá na VŠB – Technické univerzitě Ostrava výzkum zabývající se optimalizací výroby tohoto unikátního materiálu slévárenskou cestou. Od objevu porézniích kovových materiálů bylo vyvinuto mnoho metod jejich výroby. Poréznií kovové materiály mohou být vyrobeny z tekutého kovu, kovového prášku, kovových par či ionizovaného kovu. Cílem tohoto příspěvku je představit slévárenské metody výroby kovových pěn, a to jak pěn s pravidelnou, tak i s nepravidelnou buňkovou strukturou. Tyto metody jsou založeny na konvenčních slévárenských technologiích a ve slévárnách běžně používaných materiálech. Principem níže uvedených technologií výroby kovových pěn je infiltrace tekutého kovu do dutiny formy vyplněné prekurzory/preformou nebo použití odpařitelného modelu. Cílem příspěvku je rovněž ukázat možné aplikace odlitků kovových pěn s pravidelnou vnitřní strukturou coby výměníků tepla – využití velkého vnitřního povrchu těchto složitých odlitků.*

**Klíčová slova:** odlitek; kovová pěna, 3D modelování

Metallic foams are materials, which are still under development with wide application possibilities in many fields of human activities (e.g. automotive industry, civil engineering industry, medicine, etc.). These interesting materials contain artificially created pores in their structure. These pores give them many exceptional characteristics, such as: high rigidity at low density, high thermal conductivity, absorption of energy and others. These materials offer interesting perspectives due to the combination of properties (Fig. 1). The aim of this paper is to explore the possibility of manufacturing of various structures of metallic foams and using cast

metallic foam with divided inner cavity as a heat exchanger. As an instrument of the investigation the method of computer simulation was first chosen, which can compare the metallic foam with classic tube exchanger [1].

The term “foam” is not always properly used and shall therefore need to be defined. According to Fig. 2 which lists the designations for all possible dispersions of one phase in a second one (where each phase can be in one of the three states of matter), foams are uniform dispersions of a gaseous phase in either a liquid or a solid. The single gas inclusions are separated from

each other by portions of the liquid or solid, respectively. Thus the cells are entirely enclosed by the liquid or solid and are not interconnected. The term “foam” in its original sense is reserved for a dispersion of gas bubbles in a liquid. The morphology of such foams, however, can be preserved by letting the liquid solidify, thus obtaining what is called a “solid foam”. When speaking of “metallic foams” one generally means a solid foam. [1].

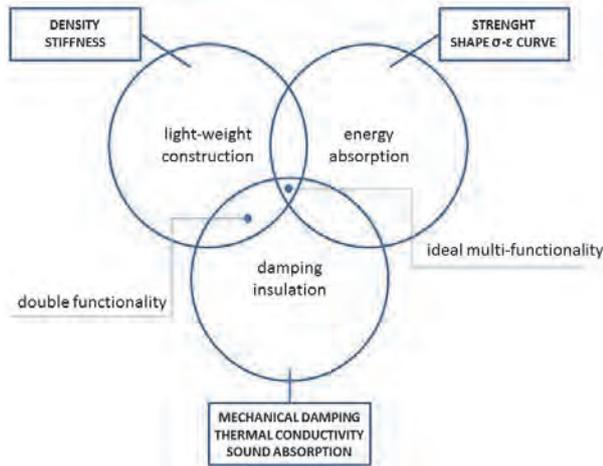


Fig. 1 Combination of properties of metallic foams  
Obr. 1 Kombinace vlastností kovových pěn

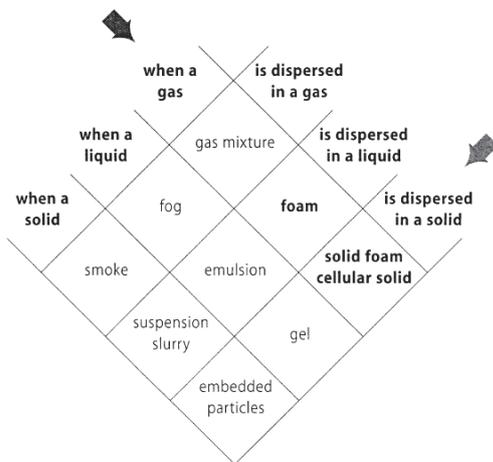


Fig. 2 Dispersions of one phase into a second one. Each phase can be in one of the three states of matter [1]  
Obr. 2 Disperze jedné fáze ve fázi druhé. Každá z fází může být v jednom ze tří skupenství [1]

## 1. Possibilities for manufacturing of metallic foams

Since the discovery of porous metallic materials numerous methods of production have been developed. Some technologies are similar to those for polymer foaming, others are developed with regard to the characteristic properties of metallic materials, such as their ability to sintering or the fact that they can be deposited electrolytically [2].

According to the state, in which the metal is processed, the manufacturing processes can be divided into four groups. Porous metallic materials can be made from [3, 4]:

- liquid metal (eg. direct foaming with gas, blowing agents, powder compact melting, casting [5], spray forming)
- powdered metal (eg. sintering of powders, fibres or hollow spheres, extrusion of polymer/metal mixtures, reaction sintering )
- metal vapours (vapour deposition)
- metal ions (electrochemical deposition)

Porosity may achieve 30% to 93% depending on the method of production and material used. By changing the process parameters it is possible to obtain porous structure with various sizes and shapes of pores and with different types of arrangement (regular or irregular - stochastic) [3].

By manipulation of the process parameters, the pore structure can assume continuous or discontinuous geometries, a range of pore sizes, pore fractions, and a controllable shape of the final product. The continuous pores are connected together and to the surfaces of the component to allow fluid flow from one side to the other [6].

Within the production of cast metallic foams, we were verified by the infiltration of the molten metal into the mould cavity filled with precursors/preform and an investment casting process using an evaporable pattern.

## 2. Experiment – casting technologies of manufacturing of metallic foams

Casting technologies of metallic foam production referred to in this paper are based on the use of existing materials and process procedures, which are commonly used in foundries. Precise definition and subsequent implementation of these manufacturing technologies could enable further expansion of these materials and using their full application potential.

### 2.1 Infiltration of molten metal into mould filled with precursors/preform

Inner pores of metallic foams can be achieved by using „particles“ – precursors or preform, which fill the mould cavity. These particles, which have given shape and size, are placed into the mould cavity and the molten metal is poured over them. Precursors and preform must meet certain criteria. Particularly, they must be made of material, which preserves its shape during impact of the molten metal (sufficient strength, low abrasion, refractoriness) and they must allow also good disintegration after casting.

Irregular arrangement of inner pores can be achieved by using precursors. Regular arrangement of the pores may be achieved by using preforms (special kinds of cores) of different shapes, which fill the mould cavity.

Principle of the method (using precursors) is shown in Fig. 3.

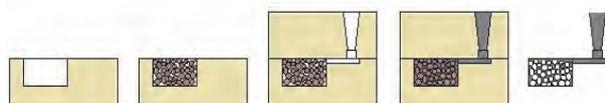


Fig. 3 Principle of infiltration of molten metal into mould filled with precursors, from left: mould, mould cavity filled with precursors, composite foundry mould, pouring molten metal into the mould cavity, cast metallic foam after removing precursors.

Obr. 3 Princip infiltrace tekutého kovu do dutiny formy vyplněné prekursorů, zleva: forma, dutina formy vyplněná prekursorů, složená forma, odlévání kovu do dutiny formy, odlitek kovové pěny po odstranění prekursorů.

### 2.1.1 Irregular cell structure

In the experiment we made castings with irregular cell structure with use of precursors based on conventional moulding mixtures (organic types). There were two types of precursors:

#### Precursors – Croning process

Core particles were manufactured from a moulding mixture (or from the rejected cores made by the Croning process). Final globular shape of core precursors was achieved by splitting them in to small pieces (10 – 30 mm) and subsequent tumbling. A mould cavity was filled with these precursors. Mould was made from the commonly used green sand (i.e. bentonite bonded moulding mixture). The disadvantage of these precursors is their irregular shape (Fig. 4), which is determined by uneven tumbling of the cullet due to non-uniform hardening of the default core mixture. Therefore, new technology of precursors manufacturing has been proposed – use of moulding mixture bonded by furan resin. This way of manufacturing of precursors should ensure the achievement of the same size, shape and the resulting characteristics of precursors.



Fig. 4 Precursors – Croning process (irregular shape and size)

Obr. 4 Prekursory – technologie Croning (nepravidelný tvar a velikost)

#### Precursors – Furan moulding mixture

For creating these precursors were used a plastic grille as a core box. By using this core box we created cubes with a side of 25 mm. These cubes were then subjected to tumbling. The proposed technology ensures production of precursors of the same size, shape and properties (Fig. 5).



Fig. 5 Precursors – Furan moulding mixture (regular shape and size)

Obr. 5 Prekursory– furanová ST-směs (pravidelný tvar a velikost)

### 2.1.2 Regular inner structure

Preforms (cores) for manufacturing of metallic foams with regular inner structure were made with the use of the polyurethane cold box technology, which is based on a two-component binder system and constitutes a suitable method for the production of thus geometrically complex shape preforms. Gradually produced cores were subsequently assembled into one unit to form the preform (Fig. 6), which is the negative of regular internal cavities of the casting (metallic foam).

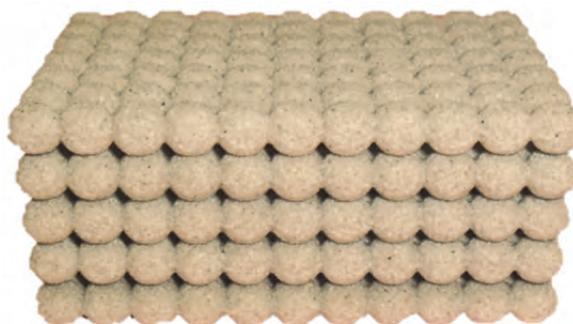


Fig. 6 Preform (core) composed of five layers of cells

Obr. 6 Preforma (jádro) složená z pěti pater

### 2.2 Use of evaporable pattern

One of the ways to create complex casting of metallic foam is to use an evaporable pattern (polyurethane, polystyrene).

### 2.2.1 Irregular cell structure

The most common foundry method for manufacture of metallic foams with open pores is a method with the use of a disposable evaporable polymeric pattern (Fig. 7) – polymeric foams (most commonly polyurethane foam – PU foams).



Fig. 7 The principle of use of a disposable evaporable polymeric pater, from the left – polymer foam, polymer foam infiltrated with plaster, removed polymer, infiltrated with metal, metallic foam in mould, removed mould, final metallic foam

Obr. 7 Princip využití jednorázového odpařitelného modelu, zleva – polymerní pěna, polymerní pěna zalitá sádrou, odpaření polymer, infiltrace tekutého kovu do vzniklé dutiny, kovová pěna ve formě, finální odlitek kovové pěny

One of the key steps in this production process is the choice and processing of material suitable for manufacture of a mould – plaster in this case. The material for the mould manufacture must have in particular sufficient heat resistance, the mixture must have good fluidity to be able to fill all the small pores of the PU foam.

For casting of various alloys (Cu alloys, Al alloys) it is necessary to define different annealing cycles. For casting the Cu alloys with higher melting temperature (higher casting temperature) it is necessary to anneal the plaster moulds to higher temperatures – to eliminate the thermal shock during casting, and to increase the melt fluidity into the complex mould cavity. Annealing cycles can be seen in Tab. 1.

Tab. 1 Annealing cycles of plaster moulds

Tab. 1 Žíhací cykly sádrových forem

Annealing cycle number	Temperature, increase, soak at temperature		
1	120 °C, 8 °C·min <sup>-1</sup> ; 8 h	320 °C, 10 °C·min <sup>-1</sup> ; 8 h	800 °C, 20 °C·min <sup>-1</sup> ; 10 h
2	120 °C, 8 °C·min <sup>-1</sup> ; 8 h	550 °C, 10 °C·min <sup>-1</sup> ; 8 h	1100 °C, 20 °C·min <sup>-1</sup> ; 10 h
3	120 °C, 8 °C·min <sup>-1</sup> ; 8 h	550 °C, 10 °C·min <sup>-1</sup> ; 8 h	1000 °C, 20 °C·min <sup>-1</sup> ; 10 h

The most commonly used is the annealing cycle No. 1 which is suitable for the subsequent casting of Al alloys (low melting temperature or low casting temperature).

However, for casting of Cu and Fe alloys it is necessary to increase the annealing temperature, i.e. to heat the moulds to higher temperatures. Therefore the annealing cycle No. 2 was recommended. This annealing cycle proved to be unsuitable – the moulds annealed to such high temperatures show an impaired collapsibility after metal casting.

A plaster sample has been subjected to differential thermal analysis, which found that at the temperatures

of 1100 °C the CaSO<sub>4</sub> is disintegrated to CaO and SO<sub>3</sub> (degradation of the mould).

After the evaluation of the plaster DTA the annealing cycle No. 3 was designed. The moulds annealed in such a way have good collapsibility after casting, but for casting the Cu and Fe alloys the mould temperature is too low. Casting of these alloys was accompanied by metal misruns into the mould cavity due to high temperature jump. On the contrary the mould prepared in such a way for casting the Al alloys is “overheated“.

### 2.2.2 Regular inner structure

There is a possibility of manufacturing metallic foams with regular inner structure by using the Lost Foam Technology. The technology principle consists in leaving the polystyrene pattern in the mould when the pattern is evaporated during casting and the resulting cavity is filled with the molten metal.

The pattern is most often prepared from expanded polystyrene (EPS) or polymethyl methacrylate (PMMA), it can be prepared by cutting, milling and subsequent gluing of individual parts or by creating a foaming mould. The pattern formed in such a way is equipped with a gating system, which can be made from the same material as the casting pattern. The entire pattern is treated with a heat resistant coating. Moulding can be done without the use of binders [7]. One of the advantages of this technology is the possibility of manufacture of castings with complex shapes and without the use of cores.

## 3. Utilization of metallic foam with regular inner cells

This part of the paper is devoted to designing an experiment for the possible testing of samples made of metallic foams with a regular arrangement of cells as an internal heat exchanger. Before the production of the real casting a variant for flow simulation was modeled, both for the metallic foam and the classical tubular exchanger. Subsequently both these models were subjected to comparison and evaluation of results. A powerful tool for designing an effective and adequate heat exchanger is a mathematical simulation. Simulations will be performed in ANSYS CFX software environment [8, 9].

### 3.1 Geometry

Figs. 8 and 9 show the initial analyzed geometries. Fig. 8 shows ball cores inside the metallic foam within two rows. The total number of the balls is 120. The left side of the figure shows the internal domain of the flowing medium, the right side shows a domain of the metallic foam with input intakes for attaching hoses for entering a medium.

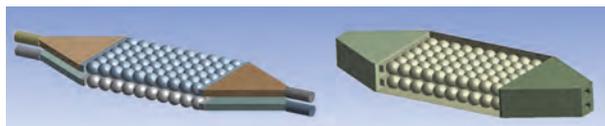


Fig. 8 Analyzed geometry of the metallic foam  
Obr. 8 Zkoumaná geometrie kovové pěny

Fig. 9 shows the classic two-row tubular heat exchanger, which is used in many applications. The total number of tubes is 12. The inner diameter of the pipes is equal to the diameter of balls in a metallic foam.

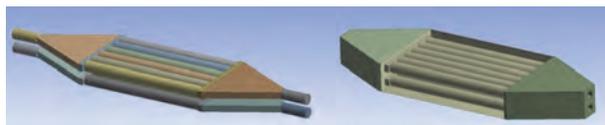


Fig. 9 Analyzed geometry of the tubular heat exchanger  
Obr. 9 Zkoumaná geometrie trubkového výměníku tepla

### 3.2 Mesh

Tube heat exchanger includes a total number of 1.1 million cells. Heat exchanger created with metallic foam contains a total number of 2.1 million cells. Cell size was set at 1.5 mm in both cases. The boundary layer at the surfaces is formed by five cells with a thickness of one millimeter.

### 3.3 Boundary conditions

Calculation of both geometries was divided into two main domains. The first domain was set as a liquid representing a flowing air. The second domain was set as a solid body representing the metal exchanger. Material properties of both domains are summarized in Tab. 2. The roughness of the walls is not included in the calculation [10]. Adiabatic walls were set up on all outer walls of solid bodies. Boundary conditions of the heat exchanger are defined on both floors.

Tab. 2 Physical properties of used material  
Tab. 2 Fyzikální vlastnosti použitého materiálu

	Domain	
	Ideal Gas	Aluminum
Thermal conductivity (W·m·K <sup>-1</sup> )	0.0261	237
Specific Heat Capacity-cp (kg·J·K <sup>-1</sup> )	1004.4	903
Density by 20 °C (kg·m <sup>-3</sup> )	1.204	2702
Dynamic viscosity (kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	1.831E-5	-

### 3.4. Results

Calculation of the tube heat exchanger ran approximately for two hours and the accuracy of the convergence is given below 1E-6. Calculation of the metallic foam heat exchanger ran approximately for 2.5 hours and the accuracy of the convergence is given

below 1E-6. Tab. 2 summarizes the mean values of the output areas of both heat exchangers.

Tab. 3 Average values at the output of heat exchanger  
Tab. 3 Průměrné hodnoty na výstupu z výměníku

		Metallic foam	Pipe
Temperature – hot side	(°C)	55.9	62.1
Temperature – cold side		55.5	50.2
Velocity – hot side	(m·s <sup>-1</sup> )	0.88	0.89
Velocity – cold side		1.12	1.1
Pressure – hot side	(Pa)	4.533E-3	4.548E-3
Pressure – cold side		6.42E-3	7.431E-3

Figs. 10 and 11 show values of the observed waveforms dependent on coordinates.

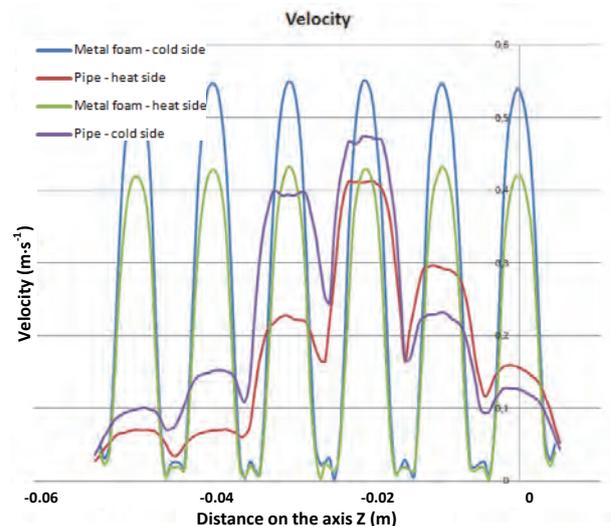


Fig. 10 Velocity profile of the heat exchangers  
Obr. 10 Rychlostní profil ve výměnících tepla

From Fig. 10 it is clear that the heat exchanger of the metallic foam has a uniform distribution of the velocity field around the analysis section. Temperature variation of a conventional tubular heat exchanger has the maximum velocity in the centre of the region. The colder side of heat exchangers has a higher rate of air flow than the hot side.

Fig. 11 shows distribution of the temperature field in two heat exchangers. The heat exchanger formed from metallic foam has a constant behavior throughout the course of the analysis cross section on both sides. In the plane of symmetry of the heat and cold sides correspond. The maximum value achieved in a tubular heat exchanger has reached the value of approx. 70 °C, with a ball exchanger this value was approx. 55 °C. The maximum difference between the hot and cold side of the metallic foam heat exchanger was approx. 1 °C, whereas classical heat exchanger had a maximum differential value of approx. 27 °C.

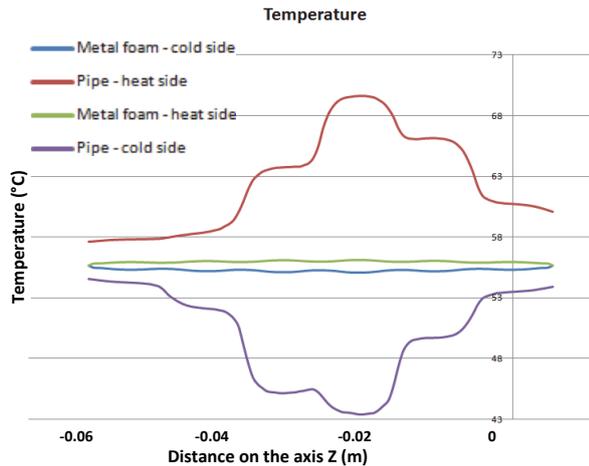


Fig. 11 Heat distribution in heat exchangers  
Obr. 11 Distribuce tepla ve výměnících tepla

Figs. 12 and 13 show the color resolution of values examined in both heat exchangers. Fig. 12 shows the thermal field on the hot side and Fig. 13 shows the velocity field of both heat exchangers.

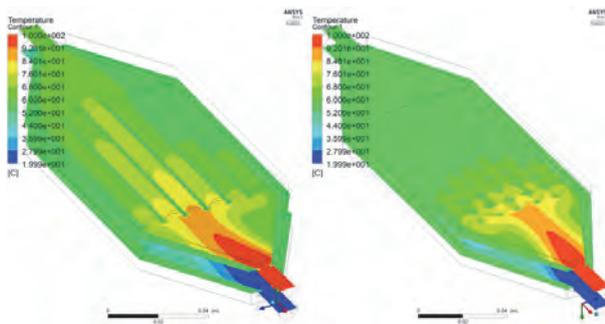


Fig. 12 Heat exchangers – the side of the hot medium flow  
Obr. 12 Výměník tepla – strana průtoku teplého média

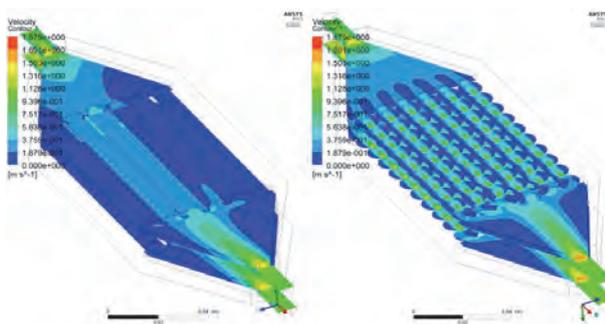


Fig. 13 Velocity field of the heat exchangers  
Obr. 13 Rychlostní pole výměníku tepla

## Conclusions

Metallic foams are progressive materials with continuously expanding use. Mastering of production of metallic foams with defined structure and properties using gravity casting into sand or metallic foundry moulds will contribute to an expansion of the

assortment produced in foundries by completely new type of material, which has unique service properties thanks to its structure, and which fulfils the current demanding ecological requirements. Manufacture of foams with the aid of gravity casting in conventional foundry moulds is financially advantageous process, which can be industrially used in foundries without high investment demands.

The principle of the above-mentioned technologies is the infiltration of liquid metal into the foundry mould cavity the use of an evaporative pattern. These technologies enable production of shaped castings – metallic foams – with irregular or regular cell structure. For production of precursors is moreover possible to use the material, which would be otherwise wastes – rejected cores or excess moulding mixture.

One of the possible applications of metallic foam with such complicated internal cavity is a heat exchanger. We first made for the purpose of verification of effectiveness a modeling of casting of the metallic foams, with variants for simulating the flow of gaseous media in both the metallic foam and the classic tube heat exchanger. Computational analysis showed that the heat exchangers showed signs of different behavior under the same boundary conditions. The greatest differences can be seen in Figs. 10 and 12, when the newly designed heat exchanger made of the metallic foam exhibits stable temperature characteristics in the whole investigated cross section immediately before an outlet therefrom. Uniform distribution of heat affected overall heat transfer in the heat exchanger so that the output temperature was generally lower by 12 °C. The relative pressure at the outlet of both heat exchangers has corresponded. In the next step heat exchangers with different geometries, etc., will be modelled. Computationally the most efficient heat exchanger will be subjected to experimental measurements and compared to the reference model (tubular heat exchanger).

## Acknowledgements

This work was elaborated within the research project TA02011333 and TH02020668 supported by the Technology Agency of the Czech Republic and projects of “Student Grant Competition” Nos. SP2017/57 and SP2017/58.

## Literature

- [1] BANHART, J. Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams. *Progress in Materials Science*, 46 (2001), 559–632.
- [2] LICHÝ, P., BEDNÁŘOVÁ, V. Casting routes for porous metals production, *Archives of Foundry Engineering*, 12 (2012) 1, 71–74.
- [3] BANHART, J., Manufacturing routes for metallic foams. *Journal of Minerals, Metals and Materials*, 52 (2000) 12, 22–27.
- [4] BEDNÁŘOVÁ, V., LICHÝ, P., HANUS, A., ELBEL, T. Characterisation of cellular metallic materials manufactured by casting methods. In: *21st International Conference on Metallurgy and Materials Metal 2012*, May 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> 2012, Brno, Czech Republic. (pp. 1209-1214). Brno: Tanger Ltd., Ostrava, 2012. ISBN 978-80-87294-31-4.

- [5] CHOLEWA, M., DZIUBA-KAŁUŻA, M. Closed aluminium skeleton casting, *Archives of Foundry Engineering*, 8 (2008) 1, 53–56.
- [6] SHAIK DAWOOD A. K., MOHAMED NAZIRUDEEN S. S. Development of Technology for Making Porous Metal Foams Castings. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 4 (2010) 2, 292–299.
- [7] ŻÓLKIEWICZ, Z., ŻÓLKIEWICZ, M. Lost Foam Process – the Chance for Industry. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN*, (2009), 431–436.
- [8] BLEJCHAŘ, T. *Návody do cvičení "Modelování proudění"-CFX*, 1. vyd. (učební texty) [Instruction for the exercise "Modelling of flow" – CFX, 1st edition (textbooks)] Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009. 133 pp. ISBN 978-80-248-2050-7. Available at <http://www.338.vsb.cz/PDF/Blejchar-CFX.pdf>.
- [9] BLEJCHAŘ, T. *Turbulence Modelování proudění– CFX*, 1.vyd. (učební texty) [*Turbulence of flow modelling*] CFX – 1st edition (text books) Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010. 259 s. Available at [http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence\\_ESF\\_v4.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence_ESF_v4.pdf).
- [10] KADLEC, Z. *Termomechanika, návody do cvičení*, 1.vyd. [Thermomechanics, instructions for exercises], 1st edition, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2002. 97 pp. ISBN 978-80-248-1736-1.

## Šéfové koncernů požadují vyšší tempo u digitalizace

*www.focus.de*

14.03.2017

Šéf ThyssenKrupp Heinrich Hiesinger požaduje více odvahy v Německu u digitalizace. První poločas byl podle Hiesingera ztracen, ale s dobře kvalifikovanými zaměstnanci by průmysl mohl ve druhém poločasu vyhrát, tvrdil Hiesinger na kolokviu na Technické univerzitě Mnichov. Produktivita prodělává díky digitalizaci přímo kvantový skok. Šéf švýcarského technologického koncernu Oerlikon Michael Süss žaluje: „V Německu dnes panuje určitá biedermeierovská nálada“. Přitom by Průmysl 4.0 mohl zastavit nebo dokonce obrátit stěhování pracovních míst do Číny a východní Evropy.

## Uhlík: Roztříštěné sny

*Handelsblatt*

23.03.2017

Uhlík platil jako nosič naděje, jak udělat auta lehčí. Ale ocel a hliník ho předjely. Je to právě šest let, kdy tehdejší šéf BMW Norbert Reithofer ohlásil revoluci ve stavbě karoserií. „Uhlíková vlákna jsou klíčovým materiálem pro automobilní průmysl jedenadvacátého století,“ řekl při příležitosti otvírání nového provozu, ve kterém se tento materiál lehkých konstrukcí měl ve spolupráci se specialisty SGL vyrábět. Černá speciální vlákna měla změnit způsob, jakým se vyvíjejí a staví automobily. Zřídka kdy se vrcholový manažer tak mýlil. Vysoce nadějný sen se rychle rozplynul. Uhlík má výhody, to je nesporné: zázračná vlákna jsou lehčí a tvrdší než ocel, doposud nejvýznamnější materiál pro stavbu automobilů. Jenže má i velké nevýhody, a ty bohužel převažují. Z toho důvodu se masové nasazení v automobilovém průmyslu nezdařilo. Je několikrát dražší než hliník nebo ocel, mnohem hůř se obrábí, často jen ručně. A uhlík se téměř nedá recyklovat. BMW zůstal jako jediný stavitel aut, který černá vlákna v nezanedbatelném množství používá. Budoucnost modelů, využívajících uhlíková vlákna, je jen s otázkou. BMW zcela zřetelně podcenilo vývoj klasických materiálů a musí se uhlíkové revoluce zříci. Nebo ji musí alespoň o celé roky odložit.

## Salzgitter zvyšuje dividendu

*Börsen-Zeitung*

25.03.2017

Je to právě rok, co v koncernu Salzgitter AG panoval strach o existenci. Evropu zaplavovala levná ocel z Číny, prodávaná za dumpingové ceny, které ležely dokonce pod výrobními náklady. Po zásahu EU a zavedení importních cel se situace pronikavě změnila. Koncern již před několika týdny ohlásil za rok 2016 zisk kolem 57 mil. € Vyhledky jsou tak dobré, jak už dlouho nebyly. Šéf představenstva Heinz Jörg Fuhrmann očekává, že v letošním roce obrátí i zisk výrazně stoupnou, sanační program skončil. Firma nyní sází na růst a inovace a investuje jen v Salzgitteru a v Ilsenburgu třímístné milionové částky do nových zařízení. Cílem je moci nabídnout vyšší kvality oceli, například pro offshore průmysl. S hlavní oblastí svého obchodu (výroba oceli a trub) se podnik nachází i přes zvýšené ceny ještě stále na trzích plných stresu. Vzhledem k dosaženým výsledkům byla dividendy na akcii zvýšena o 5 centů na 0,30 € Koncern hodlá za uplynulý rok vyplatit celkem 18 mil. €

# Recenzované výzkumné články

## Effect of Cooling of the Ingot on its Macro-structural and Chemical Heterogeneity

### Vliv intenzivního chlazení ingotu na jeho makrostrukturu a chemickou heterogenitu

Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D.<sup>1</sup>; Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.<sup>1</sup>; Ing. Jana Kosňovská<sup>1</sup>; Ing. Šárka Štefanišínová<sup>1</sup>; doc. Ing. Ladislav Socha, Ph.D.<sup>2</sup>; prof. Dr. Ing. René Pyszko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava-Vítkovice, the Czech Republic

<sup>2</sup> VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Metallurgy and Materials Engineering, Department of Metallurgy and Foundry, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, the Czech Republic

<sup>3</sup> VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Metallurgy and Materials Engineering, Department of Thermal Engineering, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, the Czech Republic

*The company MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. (Material and Metallurgical Research, Ltd.) deals with the research project entitled "Technology of Intensive Cooling of Steel Cast into an Ingot Mould." This project is funded by the programme "Support of Science and Research in the Moravian-Silesian Region 2015." As part of the project, the technology of intensive cooling of steel cast into moulds has been tested. The project solution was divided into two parts. Two ingots of the same type were cast, where the cast steel was of the identical chemical composition, temperature and casting speed. In both cast ingots, the macro-structural and chemical heterogeneity of cast steel was compared in four zones in one longitudinal axial section and three transverse sections along the height of the ingot. The evaluated macrostructures in the ingot sections show that the effect of intense cooling of cast ingot has significantly manifested itself at the bottom of the ingot with the increased zone of coarse-grained, differently oriented crystals. The analysis of the macro-structure of the cooled and non-cooled ingot further shows that in the bottom part of the cooled ingot the porosity has increased, and on the contrary, the upper part of the ingot has shown a significantly reduced porosity. Another finding is that the intense heat transfer during the ingot casting and solidification has a major effect on reducing the segregation of C, Cr and Mo elements. The calculation of the heat score shows that approximately 20 % of the heat was removed from the cooled ingot compared to the non-cooled ingot. The highest increase in heat output was identified at the bottom of the ingot.*

**Keywords:** steel, ingot; steel cooling; ingot casting; chemical homogeneity; macro-structural homogeneity, heat transfer

*Společnost MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. řeší výzkumný projekt „Technologie intenzivního chlazení oceli odlité do kokily“ Tento projekt je podpořen z programu „Podpora vědy a výzkumu v Moravskoslezském kraji 2015“ V rámci projektu byla odzkoušena technologie intenzivního chlazení oceli odlité do kokil. Řešení projektu bylo rozděleno na 2 části. Byly odlity dva ingoty stejného typu. Odlitá ocel měla v obou případech stejné chemické složení, stejnou teplotu a rychlost odlévání. U obou ingotů byla porovnávána makrostruktura a chemická heterogenita odlité oceli ve čtyřech zónách v podélném osovém řezu a třech příčných řezech po výšce ingotu. Hodnocené makrostruktury v řezech ingotů prokazují, že vliv intenzivního chlazení odlévaného ingotu se projevil velmi výrazně v patní části ingotu, kde došlo ke zvětšení zóny hrubých, různě orientovaných krystalů. Z provedeného rozboru makrostruktury chlazeného a nechlazeného ingotu dále vyplývá, že ve spodní části chlazeného ingotu došlo ke zvětšení výskytu pórovitosti a naopak v horní části ingotu došlo k jejímu výraznému zmenšení. Dále bylo zjištěno, že intenzivní odvod tepla během odlévání a během tuhnutí ingotu má zásadní vliv na snížení odmíšení prvků C, Cr a Mo. Výpočet tepelné bilance prokázal, že z chlazeného ingotu bylo odvedeno o cca 20 % tepla více než u nechlazeného ingotu. Nejvyšší nárůst odvedeného tepla byl zjištěn ve spodní části ingotu.*

**Klíčová slova:** ocel; ingot; chlazení oceli; lití ingotu; chemická homogenita; makrostruktura; přenos tepla

The technology of intensive steel cooling during casting of ingots was tested as part of the project "Technology of Intensive Cooling of Steel Cast into an Ingot Mould", that is the subject of the company MATERIÁLOVÝ A

METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. (Material and Metallurgical Research, Ltd.). The project solution was divided into two parts. Two ingots of the same type were cast, where the cast steel was of the identical chemical composition, and in both instances the temperature and casting speed conditions were met. In both cast ingots, the macro-structural and chemical heterogeneity of cast steel in one longitudinal axial section and three transverse sections along the height of the ingot was compared. We compared the heat output through the mould wall and set the amount of heat transfer from the cooling.

## 1. Characteristics of pilot experiments

For the experiments, i.e. casting of a reference ingot (Experiment Part 1) and subsequent comparison with the ingot that was tested for the intensive cooling technology (Experiment Part 2), we selected the steel grade ČSN 14209 modified with molybdenum. In this publication, this steel is also referred to as 14209Mo. The required chemical composition of 14209Mo steel and the chemical composition of the cast melt from an induction furnace (hereinafter referred to as IF) into a casting ladle (hereinafter referred to as CL) are listed in Tab. 1.

Tab. 1 Required and target chemical composition of the steel grade 14209Mo

Tab. 1 Požadované a cílové chemické složení značky oceli 14209Mo

14209Mo Steel		Chemical composition (wt. %)										T <sub>liq.</sub> (°C)
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Ni	P	S	Al	
Requirement	Min.	0.90	0.35	0.90	1.30	1.20	-	-	-	-	-	1471
	Max.	1.10	0.65	1.20	1.65	1.30	0.250	0.30	0.027	0.030	0.010	1450
Melt in CL Experiment, Part 1		1.00	0.44	0.99	1.53	1.24	0.035	0.08	0.018	0.009	0.018	1457
Melt in CL Experiment, Part 2		1.01	0.52	1.03	1.55	1.26	0.03	0.12	0.025	0.008	0.021	1458

The experiment progressed as follows. The melt was produced in an atmospheric IF. The mass of the melting was 1750 kg. After melting of the basic charge and alloying additives, the chemical composition was tested and element contents were adjusted to a desired range.

After heating to a casting temperature of 1598 °C, the melt was cast into a CL. By pouring it into the CL the melt was cooled to 1551 °C. The relatively high casting temperature, 94 °C above the liquids temperature, was chosen on the basis of long-term practical experience with casting these types of steels because the liquid steel in the low-capacity ladle cools faster. The melt produced in IF was poured to CL, where the sampling of the metal for chemical analysis was followed by the covering of the melt level with slag. The chemical composition of the melt (Experiment Part 1) in the ladle is shown in Table 1. Subsequently, the casting of a melt in a mould set started within approx. 1 min. The melt was poured under a protective argon atmosphere from the bottom into a V2A type-mould set. The casting time of a body of the ingot was 5.5 min. and the casting time of the whole ingot 7.2 min. In the Experiment Part 2, the technology of intensive cooling of cast steel was applied from the beginning of the mould filling. The weight of cast ingots was 1690 kg. After solidifying in a mould after approx. 60 minutes, the two ingots were stripped and placed in an annealing furnace for soft annealing at a temperature of 770 °C for 4 hours, followed by slow cooling in the furnace.

longitudinal axial sections I, II, III and IV. For these samples, the cast ingot macro-structure was evaluated. Samples were taken from cross-sections marked as cross-section A, B and C. In these samples, the chemical composition from the ingot edge to its centre was determined and its macro-structure also evaluated. The diagram of the ingot cutting with sampling points and their marking is shown in Fig. 1.

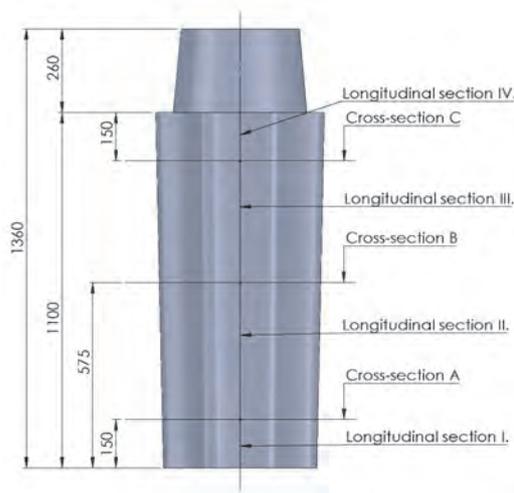


Fig. 1 Removing and marking of metal samples for evaluation in the longitudinal and transverse direction

Obr. 1 Odebrání a značení vzorků kovu k hodnocení jak v podélném, tak v příčném směru

## 2. Evaluation of achieved results

Evaluation of the Experiment Part 1 was carried out in a published paper by the authors [1]. The ingots were transversely to the longitudinal axis cut into four samples on which the above parameters were examined in

### 2.1 The macrostructure evaluation

The evaluation of macrostructure was carried out using an accredited test QI-ISO-LAB4-40-01 "Macrostructure Testing with Etchings." The macrostructure of all examined samples was induced by etching in 10% HNO<sub>3</sub>.

The actual macro-structural evaluation of the Experiment, Part 2, was carried out for each longitudinal section I through IV, followed by arranging these macro-structural analyses in sequence according to the location of individual sections of the longitudinal axis

section of the ingot (Fig. 2). In addition, the macro-structures in cross-sections A, B and C were evaluated, which corresponded to the findings obtained in the longitudinal axis of the ingot. For illustration, these cross sections with macrostructure are shown in Fig. 3.

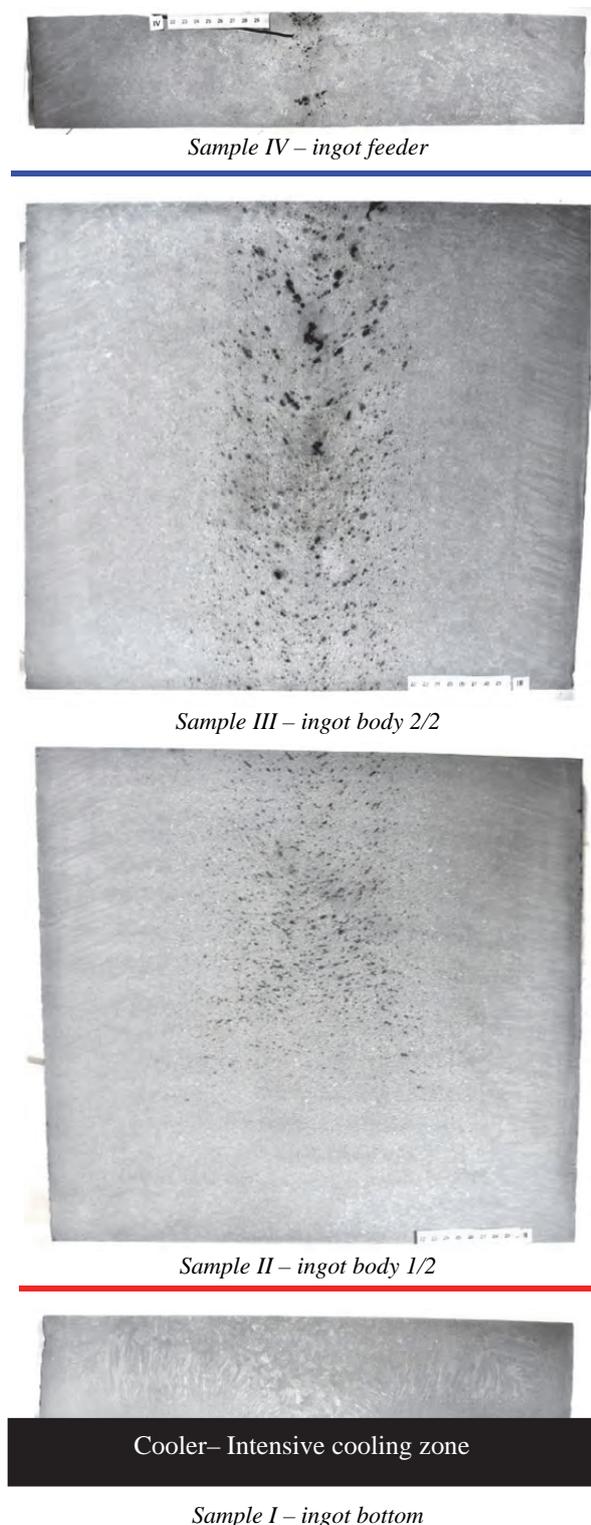


Fig. 2 Macrostructure in four zones of the axial longitudinal section through an ingot  
Obr. 2 Makrostruktura ve čtyřech zónách osového podélného řezu ingotu



Sample C – cross-section through the ingot feeder



Sample B – cross-section through the ingot body



Sample A – cross-section through the ingot bottom

Fig. 3 The macrostructure in the cross sections of an ingot  
Obr. 3 Makrostruktura v příčných řezech ingotu

In the macrostructure of individual samples, the sizes of equiaxed and columnar crystals and grains in the central section, referred to as the zone of "coarse-grained" or equiaxed crystals, were measured. We also analysed areas with the highest porosity. The observed sizes of grains in each zone along the height of the ingot are shown in Tabs. 2 and 3.

Tab. 2 Analysis of the macrostructure in the ingot axis  
Tab. 2 Analýza makrostruktury v ose ingotu

Sample	Equiaxed crystal thickness	Columnar crystal thickness <sup>1)</sup>	Porosity width in axis area
	(mm)		
IV – ingot feeder	0 to 5	55	60
III – ingot body 2/2	5	60	150
II – ingot body 1/2	5 to 15	75	180
I – ingot bottom	20	70 <sup>2)</sup> / 110 <sup>3)</sup> / 185 <sup>4)</sup>	xxx

Note: <sup>1)</sup> measured in the direction away from the surface  
<sup>2)</sup> measured vertically from the cooling pipe  
<sup>3)</sup> measured vertically  
<sup>4)</sup> measured horizontally

Tab. 3 Analysis of the macrostructure in the cross-sections of an ingot  
Tab. 3 Analýza makrostruktury v příčných řezech ingotu

Sample	Equiaxed crystal thickness	Columnar crystal thickness <sup>1)</sup>	Porosity width in axis area
	(mm)		
Cross-section C	5	60	130
Cross-section B	5	70	160
Cross-section A	15	75	0

Note: <sup>1)</sup> measured in the direction away from the surface

The evaluation of the macrostructure in Fig. 2 shows that there is a thin strip of surface equiaxed crystals in the ingot axis, which is located 20 to 5 mm deep from

the bottom of an ingot to the ingot feeder. This strip continuously changes into a zone of highly regulated columnar crystals. The zone of columnar crystals is most significant in sample I (the ingot bottom). In this sample, the thickness of columnar crystals ranges from 70 to 185 mm, which can be justified by the intense cooling of the ingot mould during the crystallization and solidification process of the ingot. From the bottom toward the feeder of the ingot, thickness of this layer decreases in the range of 75 to 55 mm. Both above noted layers are followed by the area of coarse-grained and then of finer-grained equiaxed crystals found in the axial area of the ingot.

Fig. 2 shows the occurrence of numerous, mostly tiny cavities in the axial area stretching from the ingot feeder to a depth of approximately 765 mm, while the most significant porosity has been identified in a/the sample II (an ingot body 1/2). However, the tiny cavities in the axial area do not occur in sample I (an ingot bottom) and only partially occur in sample II (an ingot body 1/2) up to a height of about 335 mm, which is related to the effect on crystallization and solidification of the ingot due to intense cooling. The above-mentioned distribution of respective zones was also confirmed on transverse sections (Fig. 3).

When comparing the macrostructure of a non-cooled (Fig. 4) and cooled ingot (Fig. 5), the effect of intensive heat transfer is evident, especially on the shape of columnar crystals and the porosity, which starts 100 mm higher in the axial section in the case of the cooled ingot compared to the non-cooled one. The measured dimensions of respective zones along the height of both ingots are shown in Fig. 6 and 7. The main features of the macrostructure (porosity and the occurrence of columnar crystals) of the two ingots are compared in Fig. 8.

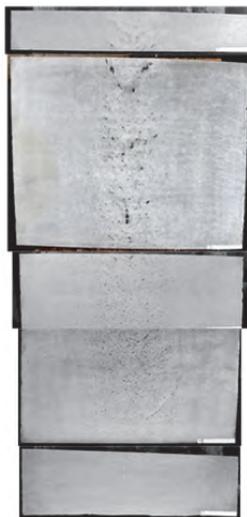


Fig. 4 Macrostructure in the ingot axis, Experiment Part 1  
Obr. 4 Makrostruktura v ose ingotu, experiment část 1



Fig. 5 Macrostructure in the ingot axis, Experiment Part 2  
Obr. 5 Makrostruktura v ose ingotu, experiment část 2

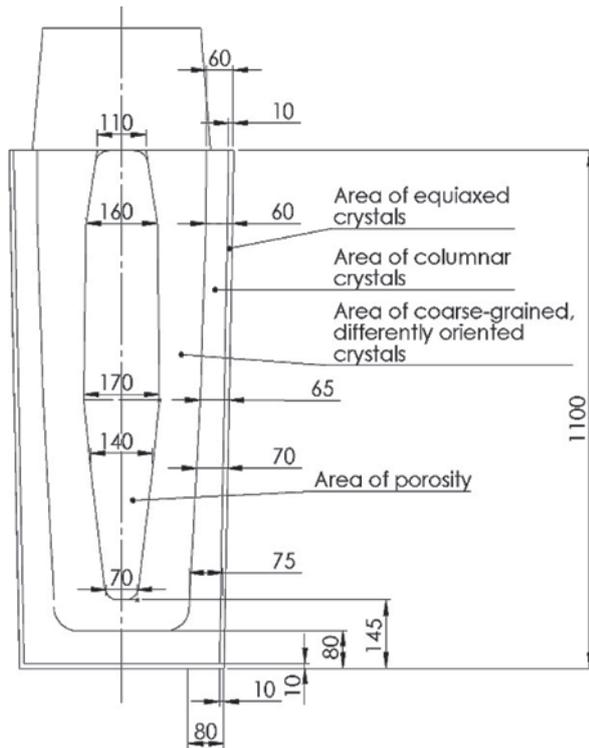


Fig. 6 Schematic analysis of macrostructure in the ingot axis; Experiment Part 1  
Obr. 6 Schématická analýza makrostruktury v ose ingotu, experiment část 1

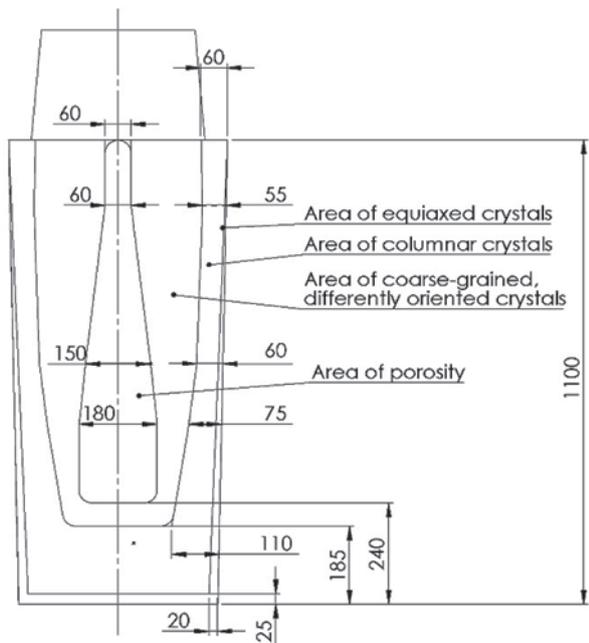


Fig. 7 Schematic analysis of macrostructure in the ingot axis; Experiment Part 2  
Obr. 7 Schématická analýza makrostruktury v ose ingotu, experiment část 2

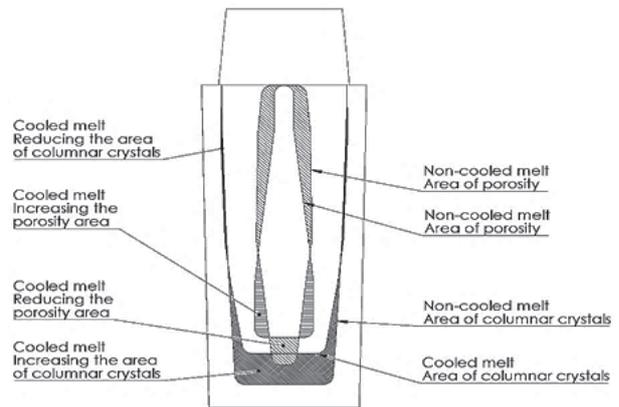


Fig. 8 Schematic analysis of macrostructure in the ingot axes; Experiment Part 1 and Part 2  
Obr. 8 Schématická analýza makrostruktury v osách ingotů, experiment část 1 a 2

#### Macrostructure characteristics: Experiment Part 1:

The zone of equiaxed crystals (the edge of the ingot) extends to a depth of approx. 10 mm from the edge.

The zone of columnar crystals along the ingot height ranges from 75 mm (ingot bottom) to 60 mm (upper part of the ingot body). In the ingot axis, the columnar crystals extend 80 mm from the bottom into the ingot body.

In the centre of the ingot there is a zone of coarse-grained or equiaxed crystals with significant porosity, which is 110 mm wide in the upper part of the ingot, widens to 160-170 mm towards the centre and decreases in the bottom down to 70 mm.

#### Macrostructure characteristics: Experiment Part 2:

The zone of equiaxed crystals (the edge of the ingot) extends to a depth of 20 mm from the edge near the bottom, and along the height of the ingot decreases down to 0 mm under the topping.

The zone of columnar crystals along the ingot height ranges from 110 mm at the ingot bottom to 55 mm near the topping. In the ingot axis, the columnar crystals reach 185 mm from the bottom to the ingot's body.

In the centre of the ingot there is a zone of coarse-grained i.e. equiaxed crystals with significant porosity, which is 110 mm wide in the upper part of the ingot, expands to 160 - 170 mm towards the centre and decreases in the bottom down to 70 mm.

At the centre of the ingot, there is a zone of coarse-grained i.e. equiaxed crystals with significant porosity that is 60 mm wide at the top of the ingot, extends to 180 mm at the centre of the ingot and then abruptly tapers and no longer occurs at the bottom of the ingot.

Also, macrostructure analysis was performed in cross-sections A, B and C, which corresponded to the findings obtained from macrostructure analysis in longitudinal sections of the ingot axis.

The assessment of the macrostructure of the floor of the ingots revealed that in both cases, the pores were closed due to solidification of the ingot body and the topping zone. This points to an inadequate function of the feeder to refill the ingot body with molten metal. This finding resulted in optimization of the shape and size of the ingot feeder.

## 2.2 Evaluation of chemical composition

To evaluate the chemical composition, the accredited test QI-ISO-LAB1-10-09 "Determination of Carbon and Sulphur Content" using the LECO CS 230 analyser and also the accredited test QI-ISO-LAB1-10-04 "RTG Spectrometry Practices" using the ARL ADVANT'X Intellipower™ x-ray fluorescence spectrometer were used. To determine the ingot homogeneity, we only determined C, Cr and Mo contents.

Metal samples from the centre of the ingot to its edge were removed from cross-sections A, B and C. In the axis, the samples were marked No. 1 and then evenly removed all the way to the edge of the ingot. The process of change of the element content in the cross-section as well as the degrees of segregation is presented in Tab. 4, which describes the contents of elements both for the Experiment Part 1 and Part 2. For each element, the first column shows the non-cooled melt values (Experiment Part 1) and the second column shows the cooled melt values (Experiment Part 2). The graphical element contents in cross-sections of the ingot are shown in Fig. 9 for the carbon, in Fig. 10 for the chrome and in Fig. 11 for the molybdenum. In Figs. 9 – 11, the values for the Experiment Part 1 are highlighted with a solid blue line; the values for the Experiment Part 2 are highlighted with red.

Tab. 4 Chemical composition of the samples in cross-section A, B and C of the ingot - the first measurement

Tab. 4 Chemické složení vzorků odebraných po průřezu ingotu v řezech A, B a C – první měření

Sampling location	Designation	Element content (wt. %)						Segregation coefficient (1)					
		C splinters		Cr		Mo		C/Co		Cr/Cr		Mo/Mo	
		Non-cooled	Cooled	Non-cooled	Cooled	Non-cooled	Cooled	Non-cooled	Cooled	Non-cooled	Cooled	Non-cooled	Cooled
Ingot bottom	A1	0.95	1.01	1.52	1.54	1.25	1.30	0.95	1.00	0.99	0.99	1.01	1.03
	A2	0.98	1.01	1.52	1.54	1.27	1.29	0.98	1.00	0.99	0.99	1.02	1.02
	A3	0.99	1.01	1.53	1.54	1.28	1.29	0.99	1.00	1.00	0.99	1.03	1.02
	A4	1.03	1.02	1.54	1.55	1.28	1.30	1.03	1.01	1.01	1.00	1.03	1.03
	A5	1.03	1.03	1.55	1.56	1.30	1.31	1.03	1.02	1.01	1.01	1.05	1.04
Ingot body	B1	0.97	0.97	1.50	1.50	1.23	1.22	0.97	0.96	0.98	0.97	0.99	0.97
	B2	1.00	0.99	1.51	1.52	1.24	1.26	1.00	0.98	0.99	0.98	1.00	1.00
	B3	1.02	1.01	1.54	1.55	1.28	1.29	1.02	1.00	1.01	1.00	1.03	1.02
	B4	1.03	1.04	1.55	1.55	1.29	1.30	1.03	1.03	1.01	1.00	1.04	1.03
	B5	1.03	1.02	1.55	1.56	1.29	1.31	1.03	1.01	1.01	1.01	1.04	1.04
Under ingot topping	C1	1.01	1.01	1.51	1.54	1.22	1.30	1.01	1.00	0.99	0.99	0.98	1.03
	C2	1.01	1.03	1.52	1.55	1.26	1.32	1.01	1.02	0.99	1.00	1.02	1.05
	C3	1.02	1.04	1.55	1.56	1.30	1.33	1.02	1.03	1.01	1.01	1.05	1.06
	C4	1.01	1.04	1.55	1.56	1.28	1.31	1.01	1.03	1.01	1.01	1.03	1.04
	C5	0.99	1.01	1.55	1.56	1.29	1.31	0.99	1.00	1.01	1.01	1.04	1.04
Melt in CL		1.00	1.01	1.53	1.55	1.24	1.26	-	-	-	-	-	-

### 2.2.1 Evaluation of chemical composition, Experimental Part 1

Tab. 4 and Figs. 9 – 11 show that the element contents tend to be decreasing in the axis part of the ingot, and vice versa, towards the edge of the ingot are increasing. They also show that C and Cr have a negative segregation at the bottom in the ingot axis, which changes into a positive one toward the edge of the ingot. A similar trend, though smaller, applies to C and Cr in the body of the ingot. Under the ingot feeder, Cr in the axial part of the ingot has a negative segregation, which toward the edge changes into a positive one. In contrast, C shows a predominantly positive segregation across the entire cross-section under the feeder. Mo has a

positive segregation at the bottom of the ingot across the entire cross-section. In contrast, in the body of the ingot and under the feeder of the ingot, Mo shows a negative segregation in the axial part, which changes into the positive toward the edge.

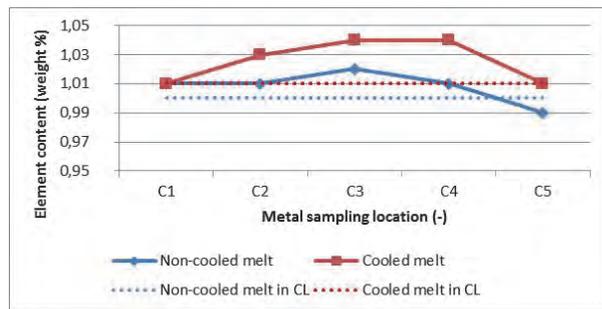
### 2.2.2 Evaluation of chemical composition, Experimental Part 2

Tab. 4 and Figs. 9 – 11 show that the C, Cr and Mo element contents are lower in the ingot body (section B) and in the ingot bottom (section A), and their content increases toward the ingot edge. The same trend of increase in the content of elements from the centre

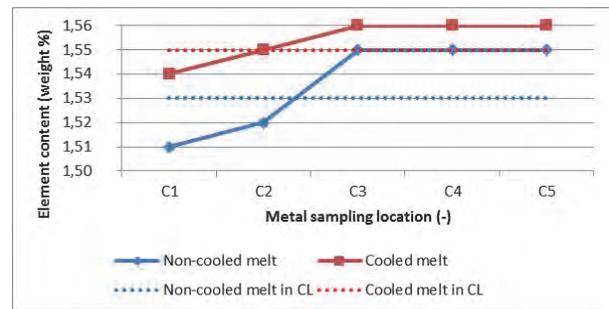
toward the edge of the ingot is also apparent in the section below the ingot topping. In terms of segregation, there is a positive C and Mo segregation across the entire cross-section, both at the bottom of the ingot as well as in the section under the topping and the negative segregation in case of Cr in the central part, which transitions in a positive segregation in the edge part of the ingot. In a central section of the body of the ingot, there is a negative segregation of C, Cr and Mo that switches toward the edge of the ingot in the positive one. The figures show that the greatest differences in the element contents in the body of the ingot can be found between the central and the edge part of the ingot, with this applying for C and Cr, as well as for Mo.

### 2.2.3 Comparison of results of the chemical composition of Experiment Part 1 and Experiment Part 2

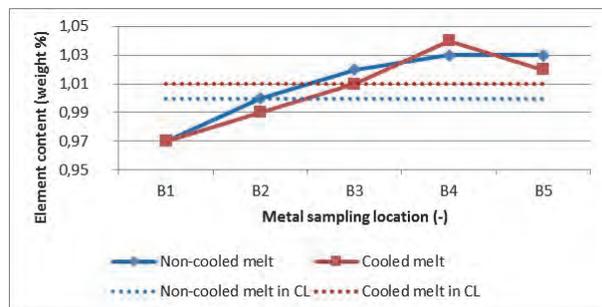
Comparison of the non-cooled and cooled ingot shows that the evaluated C, Cr and Mo elements at the bottom have very little negative segregation due to the intense heat transfer from the melt when the ingot is solidified. A smaller difference in segregation has been observed in the centre along the ingot height. On the contrary, in the section under the topping, the segregation of C and, in particular, of Cr and Mo is lower for the cooled ingot than for the non-cooled.



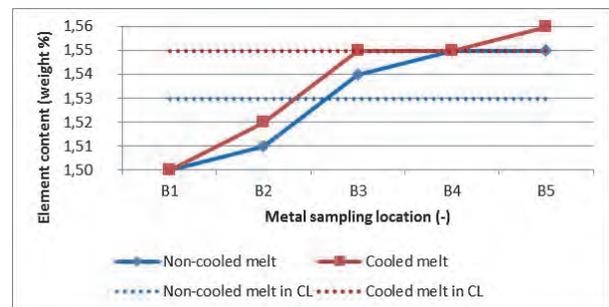
a) Section C - under the ingot feeder  
a) řez C – pod hlavou ingotu



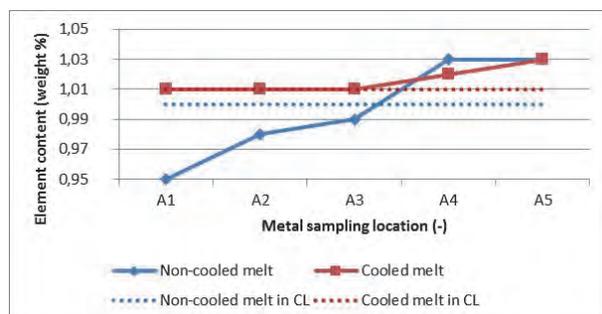
a) Section C - under the ingot feeder  
a) řez C – pod hlavou ingotu



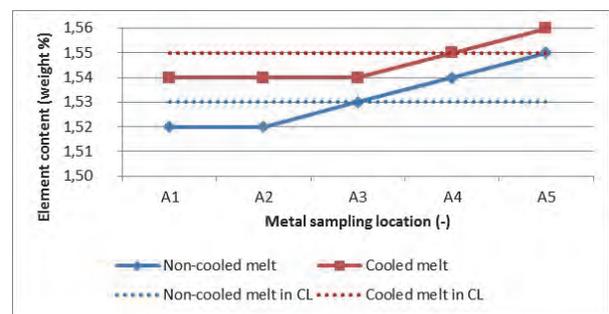
b) Section B – ingot body  
b) řez B – tělo ingotu



b) Section B – ingot body  
b) řez B – tělo ingotu



c) Section A – bottom part of ingot  
c) řez A – pata ingotu



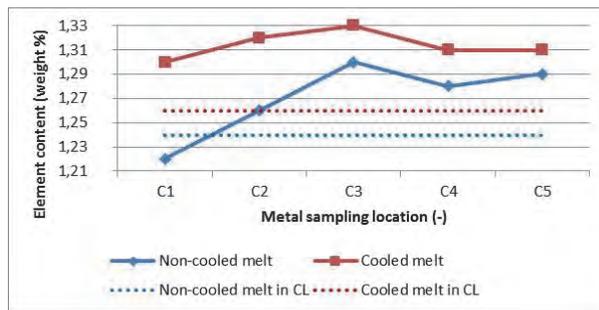
c) Section A – bottom part of ingot  
c) řez A – pata ingotu

Fig. 9 Course of the content of carbon in cross-sections of the ingot (A-bottom, B-body, C-under the topping)

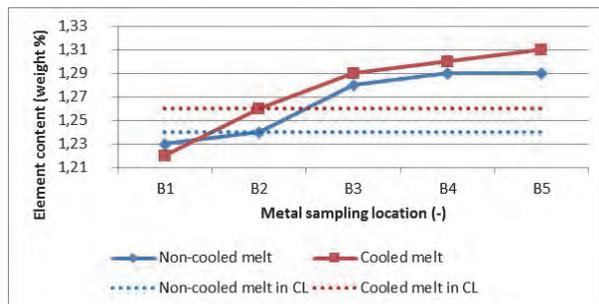
Fig. 10 Course of the content of chromium in cross-sections of the ingot (A-bottom, B-body, C-under the topping)

Obr. 9 Průběh obsahu uhlíku v příčných řezech ingotu, A-pata, B-tělo, C-pod hlavovým nástavcem

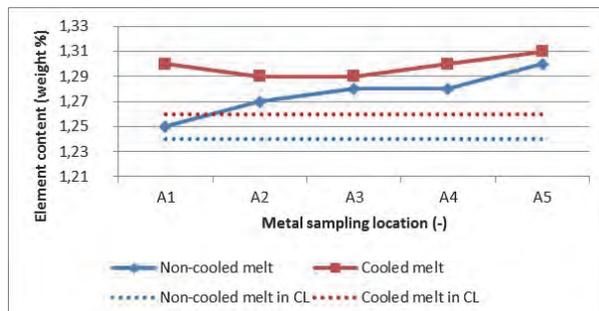
Obr. 10 Průběh obsahu chromu v příčných řezech ingotu, A-pata, B-tělo, C-pod hlavovým nástavcem



a) Section C – under the ingot feeder  
a) řez C – pod hlavou ingotu



b) Section B – the ingot body  
b) řez B – tělo ingotu



c) Section A – bottom part of the ingot  
c) řez A – pata ingotu

Fig. 11 Course of the content of molybdenum in cross-sections of the ingot (A-bottom, B-body, C-under the topping)

Obr. 11 Průběh obsahu molybdenu v příčných řezech ingotu, A-pata, B-tělo, a C-pod hlavovým nástavcem

### 2.3 Evaluation of the thermal score of an ingot mould

For both parts of the experiment, i.e. in the case of non-cooled and cooled ingots, the thermal score of the mould-ingot system was determined. The heat transferred from the mould surface, the heat accumulated in a mould wall and feeder was determined; the heat transferred by the cooling medium was calculated, and finally the enthalpy of the ingot was determined.

To obtain the conditions necessary to determine the heat score items, the ingot mould was equipped with sensors and measuring apparatus that recorded the measured

quantities with a period of one second. The jacketed thermocouples were placed in the wall of the mould as shown in Fig. 12. At three vertical levels, pairs of thermocouples were installed; each time with one measuring joint placed in a borehole at a distance of 5 mm from the inner surface of the mould and with the other mechanically fixed on the outer surface. The first index indicating the measured temperatures in the Figure means the order of a vertical level of the sensors, starting from the casting plate, the second "i" index indicates the sensor at the inner surface, the "e" index indicates the sensor on the outer surface.

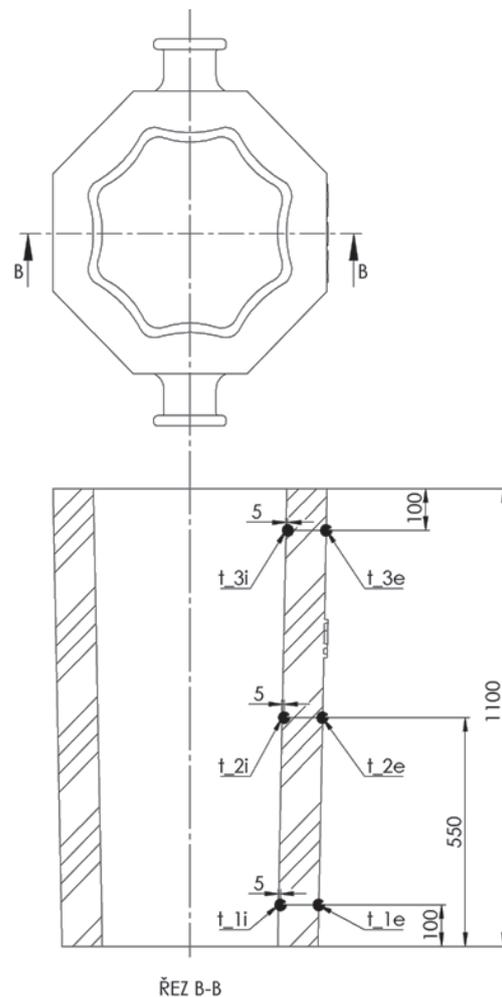


Fig. 12 Placement of thermocouples in the wall of the mould  
Obr. 12 Umístění termočlánků ve stěně kokily

The progress of temperatures measured in the ingot mould wall are in the case of non-cooled ingot plotted graphically in Fig. 13; the measured temperatures in the case of cooled ingot are shown in Fig. 14. The similarity of temperature curves at the horizontal levels no. 2 and no. 3 and simultaneously, the dissimilarity of curves at level no. 1 (especially the dissimilarity of  $t_{1i}$  curves) shows that the influence of additional cooling is significant especially in the lower part of an ingot mould, or an ingot itself.

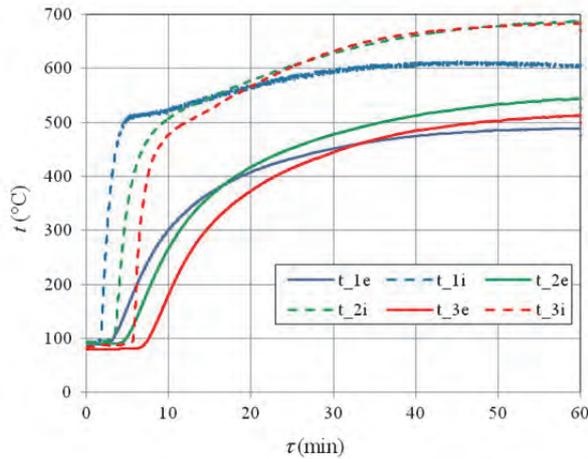


Fig. 13 Temperatures measured in the wall of non-cooled mould  
Obr. 13 Teploty měřené ve stěně nechlazené kokily

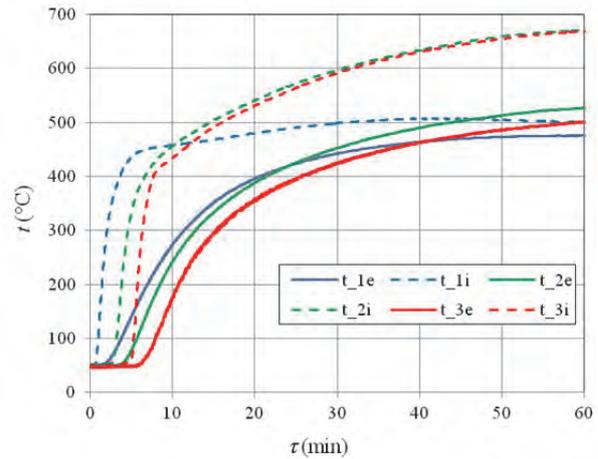


Fig. 14 Temperatures measured in the wall of cooled mould  
Obr. 14 Teploty měřené ve stěně chlazené kokily

In the case of a cooled mould, the flow rate and temperatures of the cooling media, i.e. air and water, were measured. Air-cooling took 30 seconds, after that cooling water was applied. Flow rates were determined by volume method and re-calculated to mass flows of  $0.34 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  of air and  $0.94 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  of water. Temperatures of the cooling media were measured by sensors located on the outer surface of the inlet and outlet piping. The pipe sections near the sensors were thermally insulated against their surroundings. The measured values were corrected to eliminate the influence of the heat capacity of the pipe wall and the transport delay of the medium.

The heat score of ingot can be written in the following equation:

$$\Delta H_{\text{steel}} = Q_{\text{cool}} + Q_{\text{amb}} + Q_{\text{acc}} + Q_{\text{oth}} \quad (\text{J}) \quad (1)$$

where  $\Delta H_{\text{steel}}$  (J) is the heat loss of the enthalpy of the steel,  $Q_{\text{cool}}$  (J) is the heat transferred by the cooling medium,  $Q_{\text{amb}}$  (J) is the heat transferred to the surrounding by the convection and the radiation,  $Q_{\text{acc}}$  (J) is the heat accumulated in the wall of the mould and in the feeder, and  $Q_{\text{oth}}$  (J) are other less important heat items that have been neglected in the calculation, such as accumulated heat in ingot hinges, heat removed from the steel in the inlet system, heat transferred by leading it to the casting plate.

The heat transferred by the cooling medium was determined by continuous integration of the heat flow  $P_{\text{cool}}$  from the beginning of the filling of the mould. The heat flowing to the cooling medium was calculated as follows:

$$P_{\text{cool}} = Q_m \cdot (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \quad (\text{W}) \quad (2)$$

where  $Q_m$  ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) is the mass flow of the cooling medium,  $h_{\text{in}}$  and  $h_{\text{out}}$  ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) are the specific enthalpy of the cooling medium at the inlet and outlet of the cooler at temperatures of the cooling medium  $t_{\text{in}}$  and  $t_{\text{out}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

The specific enthalpies were calculated using the temperature-dependent regression functions according to physical tables [2].

The heat transferred to the surroundings through the ingot mould wall could be determined in the case of stationary process from the density of heat flow in the wall using temperatures measured by thermocouples in the wall. In the given case, however, it was a non-stationary process with significant heat accumulation in the mould wall, and therefore this method could not be used. Heat transferred to the surroundings was calculated from the measured surface temperatures of the mould using physical laws of free convection and radiation. The zonal method was used in the calculations, where the mould was divided into three sections along its height, and the fourth section was formed by a topping.

In each measured moment, values of the Grashof and Prandtl criteria were determined and the Nusselt criterion and subsequently the heat transfer coefficient and the convection heat flow [3] were calculated using the free convection curve equation. The heat flow through radiation was calculated using the theory of radiation between the body and the surrounding surfaces for the emissivity of the mould surface 0.8 and the ambient temperature of  $20^{\circ}\text{C}$ . The heat transferred from the surface of the mould into the surroundings was then obtained by integrating the total heat flow through convection and radiation from the start of casting.

The heat accumulated in the mould wall and in the topping was calculated from the increase of enthalpy in the mould with a topping from the start of casting up to current time:

$$Q_{\text{acc}} = m_m \cdot (h_m - h_{m,0}) \quad (\text{J}) \quad (3)$$

where  $m_m$  (kg) is the weight of an ingot mould with a feeder,  $h_m$  and  $h_{m,0}$  ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) are the specific enthalpies

of the ingot mould with the feeder at that moment and at the start of casting determined for the average mould wall temperatures at that moment  $t_m$  (°C) and at the beginning of casting  $t_{m,0}$  (°C). Average wall temperatures in individual mould sections and in the feeder were interpolated from the measured temperatures both along the mould height and in the radial direction using the theoretical temperature profile in the wall, which was replaced by a cylindrical wall of equivalent cross-section for this purpose. Thermo-physical parameters of cast steel and ingot (specific

enthalpy, density) were determined using temperature-dependent CompuTherm software.

In the charts shown in Figs. 15 and 16, the heights of each colour-coded area in each moment represent the heat accumulated in the wall of the mould  $Q_{acc}$  (J), the heat transferred to the surroundings  $Q_{amb}$  (J), and the heat transferred through a cooling medium  $Q_{cool}$  (J), as a function of time. The total height of all areas approximately represents the loss of the ingot's enthalpy while neglecting the heat of other  $Q_{oth}$  heat items.

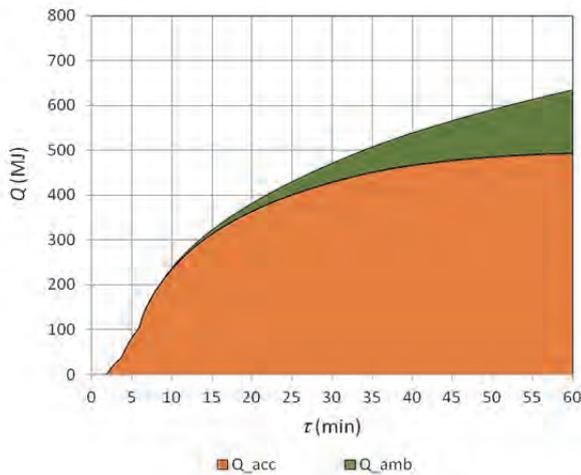


Fig. 15 Items of thermal score of non-cooled ingot  
Obr. 15 Položky tepelné bilance nechlazeného ingotu

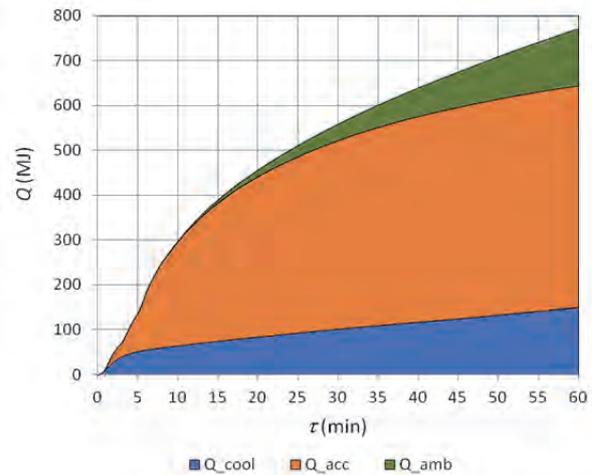


Fig. 16 Items of thermal score of cooled ingot  
Obr. 16 Položky tepelné bilance chlazeného ingotu

The time progress of individual heat score items according to equation (1) and the total enthalpy ingot

curve (marked as  $H_{steel}$ ) are shown in Fig. 17 for a non-cooled ingot, and Fig. 18 for a cooled ingot.

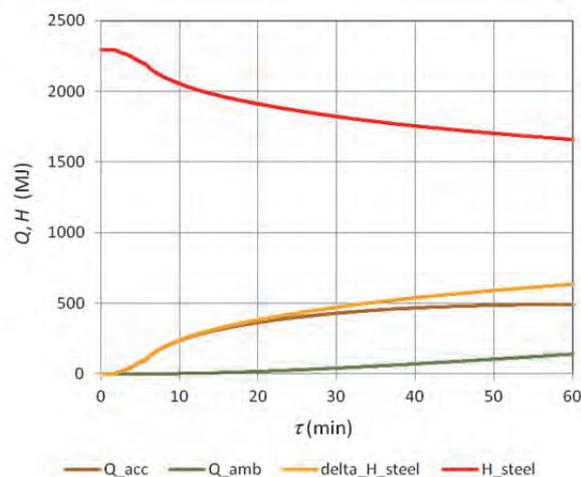


Fig. 17 Items of thermal score of non-cooled ingot and enthalpy of ingot  
Obr. 17 Položky tepelné bilance nechlazeného ingotu a entalpie ingotu

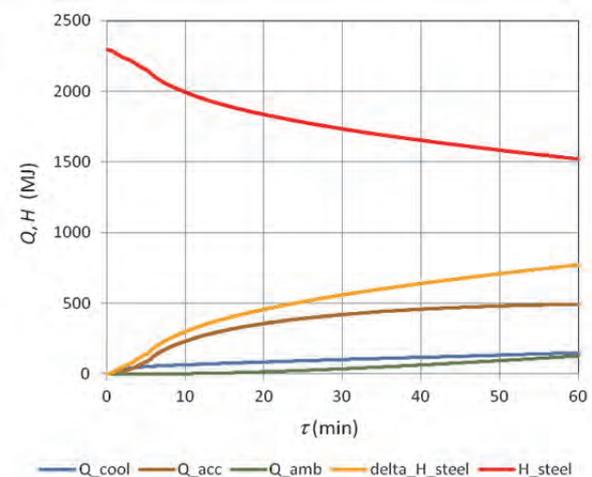


Fig. 18 Items of thermal score of cooled ingot and enthalpy of ingot  
Obr. 18 Položky tepelné bilance chlazeného ingotu a entalpie ingotu

The final values of the heat score items after 60 minutes from the start of casting, supplemented with ingot enthalpy items, specific enthalpy and mean ingot temperatures are summarized in Tab. 5. Average temperature, or specific enthalpy of the ingot

corresponds to the average proportion of the solid phase  $f_s$  for the entire ingot. Since the ingot temperature is not homogeneous, the value 100 % does not necessarily mean that the steel is solid throughout the entire ingot volume.

Tab. 5 Items of thermal score of a cooled mould, and enthalpy and temperature in an ingot after 60 min. of solidification

Tab. 5 Položky tepelné bilance chlazení kokily, entalpie a teplota ingotu po 60 min. tuhnutí

Quantity	Designation	Non-cooled ingot	Cooled ingot
Heat removed by cooling	$Q_{cool}$ (MJ)	0	151
Heat accumulated in mould	$Q_{acc}$ (MJ)	494	493
Heat transferred to surroundings	$Q_{amb}$ (MJ)	141	128
Loss of enthalpy of ingot	$\Delta H_{steel}$ (MJ)	635	772
Resulting enthalpy of ingot	$H_{steel}$ (MJ)	1658	1521
Resulting specific enthalpy of ingot	$h_{oc}$ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	981	900
Resulting average temperature of ingot	$t_{steel}$ (°C)	1342	1243
Resulting average proportion of solid phase	$f_s$ (%)	86	100

Comparison of the heat scores of both the non-cooled and the cooled ingot means that approx. 20% more heat was transferred from the cooled ingot than from the non-cooled ingot within the same period of time, i.e. 772 MJ from the cooled ingot versus 635 MJ from the non-cooled ingot.

The heat accumulated in a mould wall and in a feeder was approximately of the same size in both cases, making up for the largest amount of heat transferred from the solidifying steel; for a non-cooled ingot it was 78 % (i.e. 494 MJ from a total of 635 MJ), for a cooled ingot it was 64 % (i.e. 493 MJ from a total of 772 MJ). The heat transferred to the surroundings from the surface of the mould by convection and radiation amounted to 22 % of the heat transferred from the steel in the case of non-cooled ingot (i.e. 141 MJ from a total of 635 MJ) and 16 % in the case of cooled ingot (i.e. 128 MJ from a total of 772 MJ).

The heat transferred to the cooling medium from the cooled ingot represented approximately 20 % from the heat removed the ingot, i.e. 151 MJ from a total of 772 MJ. This was due to a direct contact of the cooler with the solidifying steel. The thermal resistance in the ingot material increases linearly with the distance through which the heat is transported to the cooler, therefore additional cooling predominantly affects the bottom part of the ingot, as also visible from the progress of temperatures measured in the wall of the mould.

## Conclusions

The macro-structural characteristics and the analysis of chemical heterogeneity of a 14209Mo steel ingot cast into a V2A mould set as well as the calculations of the thermal scores were carried out.

The evaluation results of macrostructure in ingot sections show that the effect of intensive cooling of the cast ingot manifested itself greatly in the bottom of the ingot, where the zone of columnar crystals increased. The evaluation of the macrostructure also shows that in the cooled ingot compared to the non-cooled one, a porous area was increased in the ingot's lower part while this area in the ingot's upper part was significantly reduced. This may be due to an insufficient feeder function due to the intense cooling of the lower part of ingot.

Comparison of the chemical composition in ingot sections along its height and cross-section shows that the intense heat removal during casting and solidification of the ingot has a major effect on reducing the segregation of C, Cr and Mo elements.

Comparison of the calculated heat scores showed that in a given period of time approximately 20% of more heat was removed from a cooled ingot than from a non-cooled ingot. The highest increase in heat removal was detected at the bottom of the ingot.

**The developed technology is protected by Czech patent No. 306 775.**

## Acknowledgements



*The paper was completed within the framework of the project "Support of Science and Research in the Moravian-Silesian Region 2015."*

## Literature

- [1] PINDOR, J., KURKA, V., ŠTEFANIŠINOVÁ, Š., SOCHA, L. Makrostruktura a chemická homogenita ocelového ingotu. *Hutnické listy*, 69 (2016) 4, 20–27. ISSN 0018-8069.
- [2] BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*, 2. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0828-5.
- [3] PŘÍHODA, M., RÉDR, M. *Sdílení tepla a proudění*, 2. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1748-4.

## Na míru strážené bramy

*Westdeutsche Allgemeine*

14.03.2017

Nabízet více než ocel je cílem Thyssen-Krupp Steel. Nabídka ocelářského koncernu je dnes rozšířena o další službu, umožněnou novou adjustáží, která byla uvedena do provozu v Beeckerwerthu. Mohou tam být zpracovávány bramy podle individuálních přání zákazníků. Bramy mohou být přizpůsobovány přesně podle přání zákazníka na šesti tzv. „stolech“, autorem i stavitelem tohoto zařízení je Thyssen-Krupp Mill Services & Systems. V budoucnu zde má být zpracováno až 150 000 tun bram.

## Hodnocení povrchu desek krystalizátoru s využitím znalostního systému

### Evaluation of Surface of the Mould Plates with the Use of the Knowledge System

Ing. Vladislav Šťastný; doc. Ing. Jiří David, Ph.D.

VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálové inženýrství, katedra automatizace a počítačové techniky v metalurgii 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika

*Krystalizátor je nejvíce namáhanou částí zařízení plynulého odlévání. Opořebení desek krystalizátoru je způsobeno mechanickými a chemickými procesy. Kombinací různých druhů opořebení vznikají dolíky, prohlubeniny a rýhy v materiálu desek krystalizátoru. Příspěvek se zabývá jedním z možných dostupných způsobů identifikace a hodnocení povrchových vad krystalizátoru. V příspěvku je popsáno navržené a sestavené ruční měřicí zařízení pro povrchové vady desek krystalizátoru s laserovým snímačem optoNCDT 1401-50 s přesností statického měření  $\pm 0,02$  mm. Současně s měřicím zařízením byl navrhnout a realizován expertní systém hodnocení povrchových vad využívající fuzzy množinové teorie. Hlavním cílem je posouzení míry opořebení desek krystalizátoru s maximální eliminací chyby měření v důsledku lidského faktoru, který patří k nejvíce rizikovým faktorům při tomto hodnocení. Současně je cílem maximalizace využití potenciálu desek krystalizátoru, tzn. oddělit maximálního počtu taveb bez nutnosti renovace desek s respektováním hranice bezpečnosti a kvality produkce.*

**Klíčová slova:** desky krystalizátoru, expertní systémy, kontinuální odlévání, laserové měřidlo, povrchové vady materiálu.

*The increasing complexity of production equipment and increasing demands to productivity and production quality involve the need for high reliability of equipment and efficient control of maintenance actions with usage of the systems ensuring reliability and maintenance control. Maintenance control systems providing the necessary support for planning and controlling all the actions interconnected with maintenance of equipment from its installation till start of preventative or operative servicing. Benefits ensuing from introduction of these systems can be found in improvement of decision making processes, when the system considerably simplifies creation of the information base for planning the maintenance actions and evaluation of economical indexes. The mould is one of the most stressed parts of the continuous steel casting machine. Weariness of the mould surfaces depends on a combination of mechanical and chemical processes. Pits, hollows and scratches occur as a result of combination of various types of abrasion affecting the mould surface. The paper deals with one of the available ways of identification and evaluation of the surface defects. The paper describes the proposed and set up of the handheld measuring device for evaluation of surface defects based on laser sensor NCDT 1401-50 with measurement accuracy of  $\pm 0.02$  mm. Handheld laser measurement device ZMPV-01 with visualization of the measured data and with communication interface for PC can fully replace currently used less accurate measurement methods, eliminate human factor and it can provide precise results even on shiny mould surfaces. Realized model ZMPV-01 presented is in figure 2. "ZMPV-01" with documentation is used at the steel plant of the ArcelorMittal company in order to verify its operational effectiveness and real usability. An expert system for evaluation of surface defects was also developed and realized. Its principle is based on fuzzy theory. The main goal is to assess the level of weariness of the mould plates with maximum elimination of errors caused by human factor, which is the most risky factor of these types of evaluations. The quality of human decisions is influenced for example by their actual psychic state and their level of knowledge. In order to eliminate these faults and to simplify human decision, the process based on the so called expert systems was developed, which among others uses the experiences gained from operational process. The secondary goal was the maximization of the safety level and production quality.*

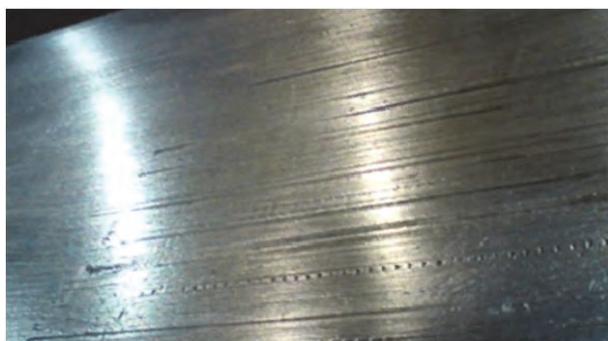
**Key words:** mould plates, expert systems, continuous casting, laser system, surface material defects

Mezi hlavní cíle automatizace zahrnujeme nejen zefektivnění procesů, ale také maximální eliminaci člověka jako nejvíce rizikového faktoru systému řízení. Člověk jako součást řízení je ovlivněn mnohými faktory. Kvalita rozhodování člověka je ovlivněna například

momentálním psychickým stavem a množstvím jeho znalostí současně se zkušenostmi. Z důvodu eliminace chyb a usnadnění rozhodovacího procesu člověka se na podkladě získaných zkušeností vyvíjejí expertní systémy.

Expertní systémy se používají ve všech odvětvích. Zvláště vysoký přínos mají při nemožnosti stanovit přesná vstupní data pro numerický výpočet, například při kontinuálním odlévání [1].

Plynulé odlévání oceli je jedním z pilířů hutního průmyslu současnosti. Při plynulém odlévání je mnoho rizikových faktorů od vysokých licích rychlostí až po vysoké teploty spojené s tímto výrobním procesem [8, 11]. Z pohledu chlazení tekuté oceli při kontinuálním lití je nejvíce zatěžován krystalizátor. V prostoru krystalizátoru dochází na deskách k vysokému odvodu tepla z tekuté oceli, a tím k jejímu povrchovému tuhnutí. Pro výrobu desek krystalizátoru se používá měď s legujícími přísadami. Z důvodu vysokého povrchového opotřebení v průběhu kontinuálního lití, se desky vyrábějí i ve variantě s povrchovou úpravou znázorněnou na obr. 1 [2].



Obr. 1 Použitá deska krystalizátoru  
Fig. 1 Used mould plate

Opotřebení desek krystalizátoru je kombinací mechanických a chemických procesů. Desky krystalizátoru jsou namáhány například abrazí, erozí, korozí, kavitací atd. Abrazivní opotřebení způsobuje opticky nejvýraznější porušení povrchové vrstvy desek krystalizátoru a projevuje se formou rýh. Kombinací různých druhů opotřebení vznikají dolíky, prohlubeniny a rýhy v materiálu desek krystalizátoru [2]. V projektu FR-TI1/319 byla řešena problematika hodnocení a identifikace povrchových vad diagnostikovaných desek krystalizátoru pro profilové předlitky čtvercového nebo obdélníkového tvaru s využitím laserového měřidla pro měření hloubky povrchových vad a s využitím expertního fuzzy systému pro bezchybné vyhodnocení vad. Eliminace chyby lidského faktoru při měření hloubky povrchových vad a následné správné vyhodnocení vad je nutné pro objektivní posouzení míry opotřebení desek krystalizátoru a může vést k zvýšení efektivnosti využití desek krystalizátoru, a tedy k prodloužení jejich životnosti a oddálení renovace. Pro posouzení vad bylo využito „Katalogu vad desek krystalizátoru“ vytvořeného v rámci řešení výše uvedeného projektu pro firmu ArcelorMittal Ostrava a.s., který byl základem pro navrženou metodiku vyhodnocování pomocí expertního fuzzy systému.

## 1. Ruční měření

Z důvodu vyřazení poškozených desek krystalizátoru při plánovaných opravách zaměstnanec pověřený a poučený provádí na demontovaných deskách krystalizátoru ruční měření. Každé měření je již ovlivněno chybou lidského faktoru. Bylo navrženo a sestaveno ruční měřicí zařízení pro povrchové vady desek krystalizátoru s laserovým snímačem optoNCDT 1401-50 s přesností statického měření  $\pm 0,02$  mm [3]. Vyhodnocovací řetězec laserového snímače pracuje s operačním zesilovačem LM 358.

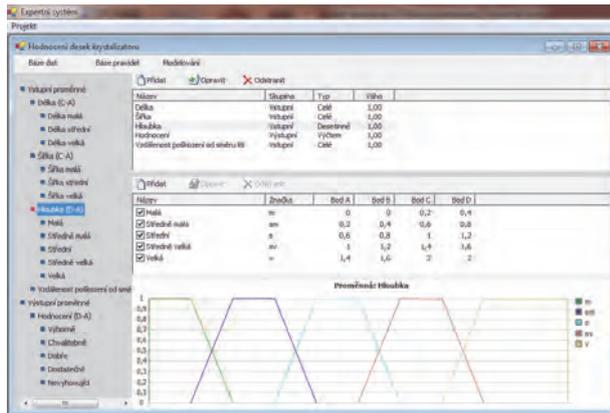


Obr. 2 Laserový ruční měřicí přístroj  
Fig. 2 Laser hand-held measurement instrument

Ruční laserové měřidlo ZMPV-01 s vizualizací měřených dat a komunikačním portem pro PC plně nahrazuje současné nepřesné metody měření, eliminuje lidský chybový faktor a dosahuje přesných výsledků i na lesklých plochách desek krystalizátoru. Realizovaný model ZMPV-01 na obr. 2 s dokumentací byl předán do firmy ArcelorMittal Ostrava a.s. k provoznímu testování a využití.

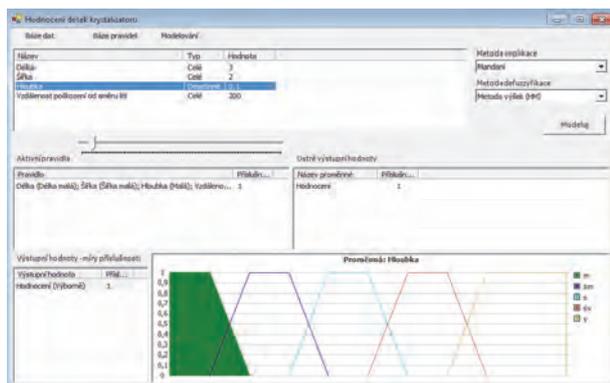
## 2. Expertní fuzzy systém

Naměřená data charakterizující poškození desek krystalizátoru jsou následně vkládána do vytvořeného expertního systému [4, 8], jehož jedna z obrazovek je znázorněna na obr. 3. Způsob hodnocení míry opotřebení desek krystalizátoru pro expertní fuzzy systém vychází z metodiky posouzení vad zavedené v „Katalogu vad desek krystalizátoru“. Oproti původně navržené verzi expertního systému pro hodnocení míry opotřebení současná verze expertního systému byla zpřesněna využitím vzdálenosti hloubky poškození od směru lití ve dvou místech největšího poškození se zohledněním sklonu povrchové úpravy vzhledem k poškození desky krystalizátoru.



Obr. 3 Fuzzy množiny - rozdělení  
Fig. 3 Fuzzy sets - distribution

Navržený expertní systém vychází z architektury diagnostického expertního systému [5, 7]. Po zadání naměřených hodnot do expertního systému tedy expertní systém na podkladě znalostní databáze provádí rozhodovací činnost o stupni hodnocení desek krystalizátoru, jak ukazuje obr. 4.



Obr. 4 Vyhodnocení expertního systému  
Fig. 4 Evaluation by an expert system

Metodika navržená pro expertní systém plně nahrazuje specialistu nutného pro ohodnocení poškození desek krystalizátoru. Expertní systém eliminuje možnou chybu lidského faktoru při ohodnocení povrchového poškození a tímto způsobem zvyšuje efektivitu využití desek krystalizátoru [6, 10], a tedy i prodlužuje faktickou životnost desek krystalizátoru nebo zamezuje neúmyslnému podhodnocení poškození povrchu. Tím je zabráněno snížení kvality povrchu předliték kontinuálního lití.

## Závěr

Navržený a realizovaný model laserového ručního měřidla ZMPV-01 s vizualizací měřených dat a komunikačním portem pro PC plně nahrazuje současné nepřesné metody měření, eliminuje lidský chybový faktor a dosahuje přesných výsledků i na lesklých plochách desek krystalizátoru. Realizovaný model ZMPV-01 je nyní používán v provozním testovacím režimu ve

firmě ArcelorMittal Ostrava a.s. Uplatnění metod umělé inteligence pro hodnocení a podporu řízení životnosti desek krystalizátoru je v souladu s dnešním koncepčním přístupem Industry 4.0 směřující k plně automatizaci jednotlivých dílčích procesů. I v tomto případě jsou výsledky práce podkladem pro vývoj automatického laserového skenovacího zařízení s vlastním vyhodnocovacím systémem, jehož cílem je využití lidské obsluhy pouze pro potřeby nezbytné manipulace.

## Poděkování

Práce vznikla za podpory specifického univerzitního výzkumu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky, projekt č. SP2017/63.

The work was supported by the specific university research funded by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic No. SP2017/63.

## Literatura

- [1] KOKOT, G., BURCZYŃSKI, T., JOHN, A. Advanced numerical simulations of selected metallurgical units. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 55 (2012) 2.
- [2] WILK-KOŁODZIEJCZYK, D., ROJEK, G., REGULSKI, K., The Decision Support System in the Domain of Casting Defects Diagnosis. *Archives of Foundry Engineering*, 14 (2014) 3, 107–110.
- [3] *Senzory a snímače* [online]. MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG, [cit. 6.11.2016]. Dostupné z: <<http://www.micro-epsilon.cz/index.html>>.
- [4] DAVID, J., ŠVEC, P., FRISCHER R. Modelling of crystallizer wear. *Archives of Materials Science and Engineering*. 58 (2012) 2, 193–198.
- [5] GORNY, Z., KLUSKA-NAWARECKA, S., WILK-KOŁODZIEJCZYK, D. Attribute-Based Knowledge Representation in the Process of Defect Diagnosis. *Archives of Metallurgy and Materials*. 55 (2010) 3, 819–826.
- [6] DAVID, J., ŠVEC, P., FRISCHER, R., GARZINOVÁ, R. The Computer Support of Diagnostics of Circle Crystallizers. *Metalurgija*. 53 (2014) 2, 193–196.
- [7] BHATTACHARYA, A.K., CHITHRA, K., JATLA, S.S.V.S., SRINIVAS, P.S. Fuzzy diagnostics system for breakout prevention in continuous casting of steel. *Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on Hangzhou, China, China* [cit. 6.11.2016]. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1343100/>>.
- [8] JALALI, P. N., LOPEZ, P. E. R., NILSSON, C., HIETANEN, P., JÖNSSON, P. Diagnosis and optimisation of continuous casting practices through numerical modelling. *La Metallurgia Italiana*, 2 (2016), 43–49.
- [9] PYSZKO, R., PRÍHODA, M., ČARNOGURSKÁ, M. Monitoring of solidification in the continuous casting mold by temperature sensors. *AIP Conference Proceedings*, 1745 (2016) 1.
- [10] KUMAR S. *An System to Diagnose Quality Problems in the Continuous Casting of Steel Billets*. The University of British Columbia, 1991.
- [11] HEMY, P., SMYLIÉ, R., SRINIVASAN, C. Analyzing Casting Problems by the On-line Monitoring of Continuous Casting Mold Temperatures. *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, [cit. 6.11.2016]. Dostupné z: <<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0201/Hemy/Hemy-0201.html>>.

# Zprávy z HŽ, a.s.

## Hutní výroba v ČR a SR

### Meziroční porovnání měsíčních a postupných hutních výrob roku 2017 a 2016

	Výroba *)			Výroba	Index	Výroba	Index	Výroba	Index
	březen	duben	leden-duben	březen		duben		leden- duben	
	2017	2017	2017	2016	2017/16	2016	2017/16	2016	2017/16
	tis. t			tis. t	%	tis. t	%	tis. t	%
<b>KOKS</b>									
<b>CELKEM</b>	300,55	282,54	1 148,92	264,69	113,55	260,67	108,39	997,07	115,23
z toho (HŽ) ČR	160,39	150,92	613,55	129,54	123,82	129,51	116,53	474,66	129,26
(HŽ) SR	140,16	131,62	535,36	135,15	103,71	131,16	100,35	522,40	102,48
<b>AGLOMERÁT</b>									
<b>CELKEM</b>	814,40	794,49	3 193,23	815,13	99,91	797,50	99,62	3 171,67	100,68
z toho ČR	497,80	463,09	1 907,93	511,83	97,26	523,20	88,51	2 002,87	95,26
SR	316,60	331,40	1 285,30	303,30	104,39	274,30	120,82	1 168,80	109,97
<b>SUROVÉ ŽELEZO</b>									
<b>CELKEM</b>	671,61	656,39	2 690,84	708,91	94,74	655,97	100,06	2 615,82	102,87
z toho ČR	347,19	309,42	1 329,98	361,41	96,06	342,89	90,24	1 372,72	96,89
SR	324,42	346,97	1 360,86	347,49	93,36	313,08	110,82	1 243,10	109,47
<b>SUROVÁ OCEL</b>									
<b>CELKEM</b>	849,05	796,59	3 317,84	883,04	96,15	839,00	94,95	3 269,80	101,47
z toho ČR	446,89	396,49	1 690,12	467,59	95,57	440,49	90,01	1 752,78	96,42
SR	402,15	400,10	1 627,72	415,45	96,80	398,50	100,40	1 517,02	107,30
<b>KONTISLITKY</b>									
<b>CELKEM</b>	810,31	766,15	3 184,75	842,65	96,16	803,22	95,38	3 121,52	102,03
z toho ČR	408,76	366,65	1 559,43	427,94	95,52	405,45	90,43	1 607,46	97,01
SR	401,55	399,50	1 625,32	414,71	96,83	397,77	100,43	1 514,06	107,35
<b>BLOKOVNY</b>									
<b>CELKEM</b>	56,18	56,02	223,71	55,70	100,86	55,29	101,32	210,92	106,07
z toho ČR	56,18	56,02	223,71	55,70	100,86	55,29	101,32	210,92	106,07
SR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>VÁLCOVANÝ MATERIÁL</b>									
<b>CELKEM</b>	824,67	785,81	3 186,78	839,28	98,26	815,54	96,35	3 091,45	103,08
z toho ČR	450,13	412,48	1 724,32	469,73	95,83	449,06	91,85	1 733,07	99,50
SR	374,54	373,33	1 462,46	369,55	101,35	366,48	101,87	1 358,38	107,66
<b>TRUBKY</b>									
<b>CELKEM</b>	62,67	60,19	226,96	57,48	109,03	64,86	92,81	235,13	96,53
z toho ČR	40,42	38,96	144,14	39,04	103,52	45,64	85,38	161,88	89,04
SR	22,26	21,23	82,82	18,44	120,69	19,22	110,44	73,25	113,06
<b>TAŽENÁ, LOUPANÁ, BROUŠENÁ OCEL</b>									
<b>CELKEM = (HŽ) ČR</b>	22,79	18,60	82,57	21,52	105,90	20,71	89,80	85,01	97,13
<b>STUDENÁ PÁSKA KLASICKÁ</b>									
<b>CELKEM = (HŽ) ČR</b>	1,48	1,26	5,42	1,23	120,65	1,25	100,64	4,82	112,40

POZNÁMKA: \*) Za poslední měsíc jsou údaje předběžné.

Zpracoval: Hutnictví železa, a.s. - Ing. Ludvík Vala

## Hutní výroba v ČR a SR

### Meziroční porovnání měsíčních a postupných hutních výrob roku 2017 a 2016

	Výroba *)			Výroba	Index	Výroba	Index	Výroba	Index
	duben	květen	leden- květen	duben		květen		leden- květen	
	2017	2017	2017	2016	2017/16	2016	2017/16	2016	2017/16
	tis. t			tis. t	%	tis. t	%	tis. t	%
<b>KOKS</b>									
<b>CELKEM</b>	282,54	294,41	1 443,32	260,67	108,39	274,88	107,10	1 271,95	113,47
<b>z toho (HŽ) ČR</b>	150,92	156,04	769,59	129,51	116,53	134,60	115,93	609,26	126,32
<b>(HŽ) SR</b>	131,62	138,37	673,73	131,16	100,35	140,29	98,63	662,69	101,67
<b>AGLOMERÁT</b>									
<b>CELKEM</b>	794,49	692,35	3 885,58	797,50	99,62	889,44	77,84	4 061,11	95,68
<b>z toho ČR</b>	463,09	391,75	2 299,68	523,20	88,51	556,14	70,44	2 559,01	89,87
<b>SR</b>	331,40	300,60	1 585,90	274,30	120,82	333,30	90,19	1 502,10	105,58
<b>SUROVÉ ŽELEZO</b>									
<b>CELKEM</b>	656,39	642,04	3 332,88	655,97	100,06	718,43	89,37	3 334,25	99,96
<b>z toho ČR</b>	309,42	282,82	1 612,80	342,89	90,24	374,73	75,47	1 747,46	92,29
<b>SR</b>	346,97	359,22	1 720,08	313,08	110,82	343,70	104,52	1 586,79	108,40
<b>SUROVÁ OCEL</b>									
<b>CELKEM</b>	796,59	800,76	4 118,60	839,00	94,95	892,28	89,74	4 162,08	98,96
<b>z toho ČR</b>	396,49	365,86	2 055,98	440,49	90,01	484,64	75,49	2 237,42	91,89
<b>SR</b>	400,10	434,90	2 062,62	398,50	100,40	407,64	106,69	1 924,66	107,17
<b>KONTISLITKY</b>									
<b>CELKEM</b>	766,15	768,75	3 953,50	803,22	95,38	854,02	90,02	3 975,53	99,45
<b>z toho ČR</b>	366,65	334,45	1 893,88	405,45	90,43	447,11	74,80	2 054,56	92,18
<b>SR</b>	399,50	434,30	2 059,62	397,77	100,43	406,91	106,73	1 920,97	107,22
<b>BLOKOVNY</b>									
<b>CELKEM</b>	56,02	55,26	278,97	55,29	101,32	53,54	103,22	264,46	105,49
<b>z toho ČR</b>	56,02	55,26	278,97	55,29	101,32	53,54	103,22	264,46	105,49
<b>SR</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>VÁLCOVANÝ MATERIÁL</b>									
<b>CELKEM</b>	785,81	778,33	3 965,11	815,54	96,36	843,85	92,24	3 935,30	100,76
<b>z toho ČR</b>	412,48	387,74	2 112,06	449,06	91,85	487,29	79,57	2 220,37	95,12
<b>SR</b>	373,33	390,60	1 853,05	366,48	101,87	356,56	109,55	1 714,93	108,05
<b>TRUBKY</b>									
<b>CELKEM</b>	60,19	60,51	287,48	64,86	92,81	63,93	94,65	299,07	96,12
<b>z toho ČR</b>	38,96	39,47	183,61	45,64	85,38	42,97	91,85	204,85	89,63
<b>SR</b>	21,23	21,05	103,86	19,22	110,44	20,96	100,39	94,22	110,24
<b>TAŽENÁ, LOUPANÁ, BROUŠENÁ OCEL</b>									
<b>CELKEM = (HŽ) ČR</b>	18,60	19,69	102,26	20,71	89,80	19,33	101,84	104,35	98,00
<b>STUDENÁ PÁSKA KLASICKÁ</b>									
<b>CELKEM = (HŽ) ČR</b>	1,26	1,57	6,99	1,25	100,64	1,33	118,20	6,15	113,65

POZNÁMKA: \*) Za poslední měsíc jsou údaje předběžné.

Zpracoval: Hutnictví železa, a.s. - Ing. Ludvík Vala

# Z hospodářské činnosti podniků, institucí a řešitelských pracovišť

## Realizace nové výrobní linky pro válcování a tvarování listů parabolických pružin

### Building of New Production Line for Taper Rolling and Forming of Leaves for Parabolic Springs

Tomáš Grulich

HŽP a.s., Dolní 3137/100, 796 01 Prostějov, Česká republika

*Při vyslovení slova pružina si většina z nás představí drát nebo strunu, navinutou do tvaru šroubovice, sloužící k akumulaci energie či tlumení vibrací ve všemožných zařízeních. V některých aplikacích dokonce takové pružiny plní ve spojení s vhodnou povrchovou úpravou estetickou funkci. Za hranicí této představy ale existují konstrukce pružin, plnící různé specifické funkce. Tímto typem je právě parabolická pružina, užívaná nejčastěji v systémech vypružení silničních i kolejových vozidel. Výroba těchto pružin závisí z velké části na schopnosti výrobce co nejpřesněji natvarovat listy tak, aby kopírovaly tvar ideální matematické paraboly a současně je bylo možno na podvozek tvarově uchytit. Proces, navržený společností HŽP a.s., to umožňuje provádět velmi efektivně jak z pohledu spotřeby lidské práce, tak z pohledu energetické náročnosti. Společnost v současné době implementuje tento proces a buduje pro něj novou automatickou výrobní linku.*

**Klíčová slova:** parabolická pružina; válcování; stáčení ok

*Speaking about springs, most of the people will imagine helically coiled piece of wire, which accumulates energy or absorbs vibration in different kinds of machines. Some of the springs in connection with convenient surface treatment make also visual appearance more attractive. Behind this general imagination, many specific designs of spring exist. Parabolic spring is such specific example. It is widely used in suspension systems of vehicles for roads as well as for railways. Production of parabolic springs is connected with ability of the producer to form leaves of the spring to precise shape of parabolic curve and subsequently adjust the design in a way it is possible to fit on chassis. Process, which company HŽP a.s. has developed, allows to make it in extremely effective way in term of productivity as well as energy consumption. The company is now implementing this process and builds new production line.*

**Key words:** parabolic spring; taper rolling; eye rolling

V loňském roce společnost oslavila 65 let od zahájení výroby pružin. Od počátku byla společnost zaměřena na výrobu listových pružin pro široké spektrum odběratelů z oblasti automobilního a železničního průmyslu. Automobilky a výrobci kolejových pružin využívají listové pružiny ve svých podvozcích ke kompenzaci vibrací, vznikajících jízdou. Na rozdíl od šroubových pružin umožňují ty listové navíc efektivně přenášet síly a momenty v příčných směrech. Nezanedbatelnou vlastností je též tlumení, které díky tření jednotlivých listů mezi sebou pohlcuje část mechanické energie.

Parabolické provedení listových pružin považujeme za dosud nejzásadnější inovaci v oblasti listových pružin, v HŽP a.s. byla první válcovací stolice uvedena do provozu v 70. letech minulého století. V současné době činí parabolické pružiny cca 80 % celkové produkce listových pružin.

Dlouhodobým podnikatelským cílem, který se HŽP a.s. daří naplňovat, je dodávat parabolické pružiny vyspělým výrobcům nákladních automobilů a kolejových vozidel. Investice do nové výrobní linky na válcování

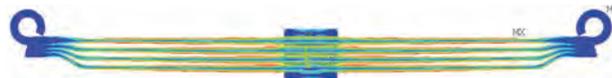
a tvarování listů umožní efektivně vyrábět nové typy parabolických pružin s inovovanými vlastnostmi.

## 1. Parabolické pružiny

Konstrukce klasických listových pružin spočívá v sepnutí několika listů konstantní tloušťky do svazku, který potom v praxi funguje jako pružný nosník, zatížený uprostřed a podepřený v koncích. Čím větší počet listů je použitý, tím lépe se napětí rozkládá po délce listu.

Základním znakem parabolických pružin je, že každý list je válcován do tvaru nosníku konstantní pevnosti, jehož ideálním matematickým vyjádřením je křivka parabola. Listy se dotýkají pouze v koncích, napětí v celé délce listu je konstantní (obr. 1).

Základním motivem k vyvinutí parabolické pružiny je výrazná úspora hmotnosti a možnost výrazně lepšího zpracování povrchu pružiny, které je základním předpokladem pro dosažení vysoké životnosti.



Obr. 1 Typické rozložení ohybového napětí v parabolické pružině

Základním požadavkem na pružiny je schopnost dlouhodobě přenášet vysoká zatížení beze změny výchozího tvaru. Za tímto účelem jsou vyráběny ze středně legovaných ocelí na bázi Cr-V, příp. Cr-Mo-V. Tyto oceli jsou tepelně zpracovávány na pevnost typicky  $R_m > 1400 \text{ MPa}$  s mezí kluzu  $R_{p0,2} > 1150 \text{ MPa}$ . Existují i aplikace, u které je pevnost výrazně vyšší.

## 2. Výroba parabolických pružin

Základní výrobní postup spočívá ve válcování parabolického tvaru za tepla, následném tvarování konců za tepla, zušlechtnění, povrchové úpravě a montáži.

Při klasickém zpracování jsou jednotlivé tvarovací operace prováděny na samostatných linkách se samostatnými ohřevy. Příklad existující linky ukazuje Obr. 2. Výhodou tohoto postupu je univerzálnost, nevýhodou ale nízká produktivita, horší energetická náročnost a kvalita povrchu spojená s opakovanými ohřevy.



Obr. 2 Existující samostatná linka stáčení ok

## 3. Nová výrobní linka pro válcování a tvarování listů

Rozhodnutí HŽP a.s. investovat do nové výrobní linky souvisí s potřebou rozšířit výrobní kapacity pro inovované typy pružin a nové zákaznky.

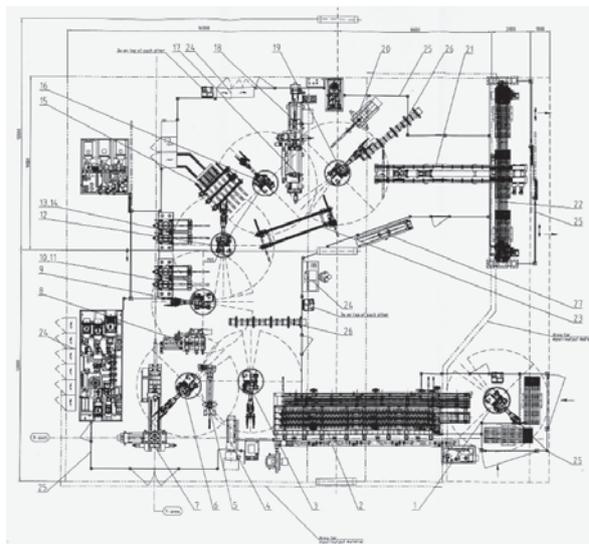
Technická koncepce linky minimalizuje spotřebu lidské práce na logistiku, seřizování a nezbytnou kontrolu, manuální práce operátora je odstraněna. Spotřeba energií na ohřev je rovněž minimalizována.

Těchto efektů je dosaženo spojením dříve samostatných linek s vlastními ohřevy, obsluhou a vstupně/výstupními úložišti do jedné štíhlé linky s robotickou manipulací tak, aby chládnutí mezi jednotlivými operacemi bylo minimální stejně jako potřeba dohřevu. Prakticky je použit výchozí ohřev v plynové krokové peci a 1 indukční dohřev před operací stáčení.

Manipulace je řešena 7 průmyslovými roboty, celá linka je obsluhována 1 operátorem.

Novým prvkem je kalibrace ok, která umožní snížit potřebu následného obrábění na přesné rozměry. Schéma linky je znázorněno na obr. 3.

Celková investice do linky je ve výši 111 mil. Kč, linka bude zprovozněna v polovině roku 2018 ve výrobním závodě společnosti v Prostějově.



Obr. 3 Schématický layout nové linky

## 4. Závěr

Článek popisuje procesní inovaci v oblasti výroby parabolických pružin ve společnosti HŽP a.s. Využitím vysokého stupně automatizace a vhodným prostorovým uspořádáním strojů bude vybudována štíhlá výrobní linka. Proti existujícímu řešení bude výrazně produktivnější, úspornější z pohledu energií a umožní výrobu náročnějších pružin.

### Literatura

[1] Interní podklady a nabídky dodavatelů.

## Transformace Hutnictví železa na Ocelářskou unii

Praha, 6. června 2017 – Svaz Hutnictví železa, který vznikl před 25 lety s cílem zastupovat zájmy českých a slovenských oceláren, prošel významnou organizační a personální změnou a transformoval se od 1. června 2017 do nově vzniklé Ocelářské unie. Cílem proměny je lépe hájit zájmy podniků a reagovat na aktuální výzvy, jako je dovoz oceli z Číny a dalších zemí za dumpingové ceny, nebo obrana před příští regulací v souvislosti s reformou emisních povolenek v EU. Novým statutárním ředitelem byl zvolen Jan Rafaj.

Ocelárny, které dnes zaměstnávají v Česku přímo 16 tisíc lidí a umožňují existenci dalších desítek tisíc pracovních míst, mají novou organizaci hájící jejich zájmy. Podniky se v posledních letech namísto zvyšování konkurenceschopnosti, vylepšování ekologického fungování výroby a vývoje stále častěji utkávají s politickou regulací a neférovými obchodními praktikami. „Proto jsme se rozhodli transformovat Hutnictví železa, které nás zastupovalo 25 let, a přicházíme s novou organizací, kterou jsme pojmenovali Ocelářská unie,“ říká k důvodům proměny Jan Czudek, předseda správní rady Ocelářské unie a generální ředitel Třineckých železáren.

Ocelářská unie bude schopným partnerem nejen národním institucím, ale bude intenzivněji spolupracovat a artikulovat české zájmy i v rámci EU. „Stále více se o prostředí, v němž fungujeme, rozhoduje na nadnárodní úrovni. Proto akcionáři zvolili nové vedení, které se v mezinárodním prostředí už pohybuje,“ říká nově zvolený statutární ředitel Ocelářské unie Jan Rafaj a místopředseda představenstva ArcelorMittal Ostrava.



Ilustrační foto: archiv

Dosavadní vedení odvedlo velký kus práce a provedlo hutnické firmy obdobím privatizací a restrukturalizací, asistovalo českým podnikům ve chvílích, kdy potřebovaly obhájit svou konkurenceschopnost v globálním měřítku, a také obdobím významných investic do technologií a ekologizace výroby za současného tlaku proměnlivých cen surovin, energií a rostoucí regulace.

„Čeká nás velký kus práce, jejíž výsledek bude zásadní pro udržení primární výroby oceli v Česku a Evropě obecně. Významnou oporou pro nás bude, pokud se budeme moci spolehnout na pevnou pozici našich národních ministerstev a politiků, kteří budou hájit průmysl před neférovými praktikami třetích zemí,“ dodává na závěr Jan Rafaj.

*Daniel Urban, ocelarskaunie.cz*

## Růst produkce oceli táhl export, pokles cen znamenal pro oceláře snížení tržeb o 5,4 %

Ceny ocelových výrobků v roce 2016 klesly o 7,9 %. Propad způsobený nadprodukcí nejen v Evropě, ale především ve třetích zemích znamenal pro české ocelárny pokles tržeb o 5,4 % na 79,5 mld. Kč. Díky nárůstu objemu výroby se podařilo nepatrně navýšit zisk před zdaněním na 2,7 mld. Kč. Firmy se potýkaly s politickými problémy včetně rizika ukončení antidumpingových cel na dovoz oceli z Číny nebo nové podoby obchodování s emisními povolenkami po roce 2021.

České hutní firmy mají za sebou náročný rok 2016. Nesl se ve znamení rizika uznání tržního statusu Číny, nových antidumpingových řízení a vyjednávání o podobě systému obchodování s povolenkami v letech 2021–2030. „Rozhodování v EU na politické úrovni, které zásadně ovlivňují fungování a budoucnost hutních podniků v Česku bohužel zabraly velkou část našeho úsilí v roce 2016,“ řekl Jan Czudek, generální ředitel a předseda představenstva Třineckých železáren.

Objem výroby českých hutních podniků se v roce 2016 zvýšil: výroba surového železa stoupla o 3,3 % na 4,17 mil. tun a výroba surové oceli se zvýšila o 0,8 % na 5,31 mil. tun. Výroba válcovaného materiálu meziročně

vzrostla o 6,5 % na 5,21 mld. tun a k mírnému poklesu o 4,7 % na 553,5 tisíce tun došlo u ocelových trubek vlivem snížené zahraniční poptávky.

#### Přehled objemů výroby hutní produkce (tis. tun)

Výrobek	2015	2016	Změna
Surové železo	4031	4165	3,3 %
Surová ocel	5262	5306	0,8 %
Válcovaný materiál	4894	5210	6,5 %
Ocelové trubky	581	554	-4,7 %
Ostatní výrobky	1094	1130	3,3 %

Ekonomické výsledky podniků sdružených v Ocelářské unii zaznamenaly meziroční pokles tržeb o 4,5 mld. Kč na 79,5 mld. Kč. Zisk před zdaněním vzrostl o 27 mil. Kč na 2,7 mld. Kč. „Za udržení zisku před zdaněním vděčíme optimalizaci nákladů a také nárůstu exportu o 7,9 %. České ocelářské firmy v roce 2016 vyvezly přes 5 mil. tun oceli,“ říká Ashok Patil, generální ředitel a předseda představenstva ArcelorMittal Ostrava. Naprostá většina vývozu, celkem 92 %, směřovala do zemí EU (Německo, Polsko, Slovensko, Itálie, Maďarsko nebo Rakousko).

Meziročně se globální produkce surové oceli po poklesu v roce 2015 zvýšila v roce 2016 o 0,9 % na 1,63 mld. tun. Na tomto vývoji se nejvíce podílela Čína s 808 mil. tun (+1,2 %) a další asijské země. Ve druhé polovině roku 2016 došlo k nárůstu cen vstupních surovin pro hutní průmysl, což se významněji promítne do výsledků roku 2017. Celkově za rok 2016 došlo k růstu cen energetického uhlí (+14,5 %) a významnému růstu ceny železné rudy, která zdražila ze 40 USD na začátku roku 2016 až na 79 USD v prosinci 2016. Naopak z pohledu celého roku zlevnil například šrot (-9 %), jehož podíl ve výrobě se dlouhodobě pohybuje kolem 40 %.

#### Politické otázky výroby oceli

Velkým tématem uplynulého roku byl **boj proti udělení statusu tržní ekonomiky Číně**, které by zásadně oslabilo ochranu EU před dumpingem subvencované oceli. Čeští oceláři se zapojili do celoevropské kampaně spojující politiky, podniky i odbory z ocelářství, ale i z jiných odvětví. Evropský průmysl zatím nachází zastání v Evropském parlamentu, a to i díky práci českých europoslanců, ale bohužel nikoliv u řady národních vlád.

Čína se kvůli rozhodnutí EU neudělit jí status tržní ekonomiky obrátila se stížností na WTO. Spor bude trvat minimálně rok, a tak i nadále bude na straně evropských firem přetrvávat nejistota související s účinnou obranou proti neférovým praktikám čínských firem a vlády.

Problém dumpingu se ale netýká jen Číny. Odhadovaná nadkapacita ve světě je 400 – 500 mil. tun oceli. Mnohé státy se proto cíleně a dlouhodobě snaží o podporu domácího průmyslu. Írán například oznámil plán navýšit výrobní kapacity z 28 na 55 mil. tun oceli ročně. Vlády těchto zemí uměle chrání své trhy před dovozem ze třetích zemí a významné národní podniky podporují pomocí levných úvěrů či laxních environmentálních předpisů. Pro české a evropské ocelářské firmy je velmi obtížné v takovém prostředí konkurovat. „Import oceli z těchto zemí ovlivňuje české oceláře, byť nepřímo. Ocel se díky naší vnitrozemské poloze sice nedostává na tuzemský trh, ale vytlačuje naše produkty z trhů v EU i jinde,“ říká k dovozu oceli za dotované ceny Dmitrij Ščuka, předseda představenstva Vítkovice Steel.

Další obrovskou hrozbou je probíhající revize **evropského systému obchodování s emisními povolenkami (EU ETS)**. Pokud revize dopadne tak, že české ocelářské firmy budou nuceny dokupovat kolem roku 2030 až 40 % povolenek na volném trhu, stoupnou místní výrobní náklady nad únosnou míru. Výsledkem revize EU ETS tak může být únik uhlíku, tedy situace, kdy se průmyslová výroba přesune do zemí třetího světa, které na tunu vyrobené oceli vypouští až o 50 % více CO<sub>2</sub> než evropské firmy. Bohužel současný stav vyjednávání v Radě není pro oceláře příznivý, i přes snahu Evropského parlamentu špatný návrh vylepšit.

České ocelárny investovaly do svých výrobních provozů od roku 1993 přes 100 mld. Kč z vlastních prostředků: 60 mld. do modernizace výroby a 40 mld. do ekologických opatření. Právě díky dlouhodobým investicím do ekologizace dosáhly podniky významných úspěchů. Emise tuhých znečišťujících látek snížily za toto období o 94 %, SO<sub>2</sub> o 72,8 %, oxidů dusíku o 68 %. Při výrobě 1 tuny oceli vyprodukují až o 50 % CO<sub>2</sub> méně, než podniky mimo Evropu.

Čeští oceláři se snaží prosadit:

- snížení aukčního podílu povolenek až o 5 %, aby bylo možné bezplatné přidělování pro odvětví průmyslu ohrožená únikem uhlíku,
- ochranu nejohroženějších odvětví před škodlivým dopadem aplikace mezisektorového korekčního faktoru,
- uznání ekologičnosti opětovného používání odpadních plynů pro výrobu elektřiny v podobě bezplatných povolenek.

## Vize ocelářství v ČR do budoucna

S ohledem na proměnu prostředí a nové výzvy se členové asociace rozhodli, že oborové sdružení Hutnictví železa projde k polovině roku 2017 transformací. Na první pohled je viditelná změna názvu na Ocelářská unie a zcela nové logo asociace. „Dosavadní posádka asociace pod vedením Jaroslava Raaba odvedla velký kus práce a aktivně a erudovaně pomáhala prosazovat společné zájmy všech členů. Nyní sice dochází k nutné generační výměně, ale i nadále bude naše asociace hájit zájmy ocelářů jak v České republice, tak na půdě evropských institucí,“ říká nový statutární ředitel Ocelářské unie Jan Rafaj.

Aby mohlo ocelářství v Česku nadále fungovat, musí se vypořádat s několika výzvami. „Firmy musejí přizpůsobit své kapacity poptávce a soustředit se na výrobu nejprogresivnějšími technologiemi. K tomu ale potřebujeme jistotu ve věcech, jako jsou ceny energií nebo budoucí podoba systému obchodování se skleníkovými plyny. Máme chuť a sílu konkurovat výrobcům oceli z celého světa, ale potřebujeme k tomu rovné podmínky. Ocel je 100% a donekonečna recyklovatelný materiál, čímž je v porovnání s ostatními materiály unikátní. Spolu se zásadním snížením vlivu na životní prostředí takto může ocelářství zaujímat významné místo v průmyslové výrobě v ČR a EU v 21. století,“ dodává na závěr Jan Czudek.

### Čísla za rok 2016

- Podíl šrotu ve výrobě oceli – **40 %**
- Od roku 1993 ocelářské **podniky investovaly z vlastních zdrojů 100 mld. Kč.** 60 miliard do modernizace výroby a **40 miliard do projektů na ochranu životního prostředí.**
- Počet pracovníků v ocelářských podnicích – **15 550**
- Průměrný plat v ocelárnách – **31 500 Kč/měsíc**
- V EU v ocelářství pracuje **350 000 pracovníků a nepřímo je navázáno 1,5 mil. pracovních míst**
- Ročně vyprodukují ocelárny v EU **170 mil. tun výrobků**
- Odhadovaná **nadkapacita celosvětově – 400 mil. tun oceli**

### Ocelářská unie

Ocelářská unie sdružuje celkem 15 ocelářských firem. Klíčovými členy jsou Trinecké železářny, ArcelorMittal Ostrava a Vítkovice Steel. S celkovými tržbami ve výši 80 mld. korun a téměř 16 tisíci zaměstnanci jde o významnou odvětvovou asociaci s hlavním těžištěm výrobních aktivit v Moravskoslezském kraji.

*Daniel Urban*

## Budoucnost oceli v Evropě se jmenuje inovace

*Börsen-Zeitung*

25.03.2017

Wolfgang Eder: „Evropa má u oceli ještě náskok. Neměla by ho ale dávat všanc a riskovat jeho ztrátu díky přehnaným povinnostem při ochraně klimatu“. Má výroba oceli v Evropě a v Německu budoucnost? Tato otázka je kladena stále častěji, alespoň v nadpisech v hospodářských médiích, krizové scénáře, vyvolané globálními i evropskými přebytečnými kapacitami, dumping z Číny a realitě vzdálené představy o ochraně klimatu. Co ale v této souvislosti až příliš často padá pod stůl, je fakt, že ocel sama o sobě není žádným problémovým příkladem, nýbrž má dokonce i po staletích vývoje stále neuvěřitelně velký vývojový potenciál. Ještě stále disponuje Evropa dobrými předpoklady. Od začátku industrializace je kontinent na špičce, pokud jde o technologii a inovace. Až do devadesátých let minulého století byl náskok ještě výrazný, nejen vzhledem k rozvíjejícím se trhům, ale i vůči jiným etablovaným průmyslovým regionům. Tento náskok se ovšem v posledních 15 letech výrazně snížil, protože trvale menší profitabilita mnoha výrobců oceli v Evropě nepřipouští větší investice. Důvody tohoto vývoje leží jak v podnikatelské, tak také v politické oblasti. Jedna věc je jistá: budoucnost úspěšného ocelářského průmyslu v Evropě neleží ve výrobě masových výrobků, nýbrž jen v soustředění se na výrobky v technologicky vyzyvavých oblastech.

# Ze života škol



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH**

## **Zmena názvu Hutníckej fakulty na Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie**

Hutnícka fakulta Technickej univerzity v Košiciach (HF TUKE) je jednou zo zakladajúcich fakúlt súčasnej Technickej univerzity v Košiciach, pričom tohto roku oslavuje spolu s univerzitou 65. výročie svojho založenia. Jej vznik v roku 1952 bol podmienený vtedajšími požiadavkami doby a priemyslu a súvisel hlavne s industrializáciou Slovenska. Počas svojej 65. ročnej histórie úspešne vychovala veľké množstvo odborníkov, ktorí sa výborne etablovali v ťažkom priemysle celého Československa.

Po politických a ekonomických zmenách a vznikom samostatnej Slovenskej republiky, zmenou a vznikom novej legislatívy sa situácia v Európskej únii a teda i na Slovensku dramaticky zmenila. Filozofia mohutného centrálne riadeného ťažkého priemyslu sa zmenila do koncepcie diverzifikovanej výroby a spracovania špecializovaných materiálov. Tento dej je postupný a aj zasiahol oblasť vysokého školstva a teda aj Hutnícku fakultu. Táto v snahe podchytiť vývin a požiadavky doby postupne rozšírila svoje portfólio aktivít a začala ponúkať viacero rozličných moderne koncipovaných pedagogických a vedeckovýskumných aktivít, aj odlišných od pôvodného hutníckeho zamerania. Toto vyústilo do organizačnej zmeny s platnosťou od 1.2.2016, výsledkom ktorej bola transformácia pôvodných ôsmich katedier do troch ústavov, Ústavu metalurgie, Ústavu materiálov a Ústavu recyklačných technológií, ktorí aj reprezentujú gró aktivít fakulty.

Celý proces vyvrcholil legislatívnym procesom, ktorého výsledkom je od 1. júla 2017 zmena pôvodného názvu Hutníckej fakulty do nového názvu

## **Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie (FMMR)**

Najmä pojem “recyklácia” premietnutý do názvu fakulty znamená významný posuv hlavne s ohľadom na stratégiu Európskej únie v oblasti kritických surovín, kritických kovov a potreby recyklácie. Toto je vyvrcholením významných aktivít fakulty, reprezentovaných Ústavom recyklačných technológií v oblasti materiálovej recyklácie odpadov, pedagogických aktivít, domácej a medzinárodnej spolupráce, vedecko výskumných aktivít, publikačnej aktivity a riešením domácich a európskych vedeckých projektov. Pojem “recyklácia” sa momentálne nevyskytuje v žiadnom názve fakulty v Európskej únii.

Zmena názvu fakulty sa premietne postupne aj do zmeny jej kontaktných adries, web stránok a podobne, o čom vás budeme včas informovať v snahe udržať kontinuitu našej súčasnej a prípadne budúcej spolupráce.



*Prof. Ing. Tomáš Havlík, DrSc., děkan Fakulty materiálov, metalurgie a recyklácie*

## International Students' Day of Metallurgy 11. – 13. května 2017 – ISDM 2017

Rakouské město Leoben je historicky spjato se silnou tradicí v hutnickém průmyslu a Montanuniversitat Leoben, jejíž kořeny sahají až do roku 1840, je tak nezbytnou součástí současného montánního vzdělávání, proto již po páté hostilo studenty metalurgie a příbuzných oborů na mezinárodní studentské konferenci ISDM 2017. Více jak 200 účastníků z TU Freiberg, FH Wels, TU Berlin, RWTH Aachen, Silesian University of Technology, Czestochowa University of Technology, TU Gratz, Univesitat Duisburg – Essen a TU v Košiciach se zúčastnilo této studentské konference.

24. ročník opět nabídl přednášky mladých vědců, kteří prezentovali výsledky své vědecké práce, diskusi nad výsledky, zajímavé dotazy pedagogů, či starších kolegů. Součástí byla také posterová sekce, která byla zajímavá svou soutěží o nejlepší poster. V průběhu celé konference mohli studenti navštívit propagační stánky celkem 20 firem, které nabízeli studentům praxe, nebo práci právě v jejich podniku. I zde nešlo si nevšimnout obecného nedostatku kvalifikovaných a vzdělaných odborníků v metalurgických i materiálových oborech.



Foto: Michal Hvězda

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství vyslala na tuto akci početnou skupinu studentů. Dvě studentky Bc. Petra Skříšová a Ing. Taťána Radková uspěly v soutěži Posterové sekce, jejich postery zaujaly natolik, že v soutěži obsadily 2. a 3. místo. Fotografie, stejně jako video z průběhu akce naleznete na facebookových stránkách Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství - #fmiostrava.

– doc. Ing. Adéla Macháčková, Ph.D. –  
proděkan pro vnější vztahy

## Kvízy ze slévárenství obohatily program Festivalu v ulicích v Ostravě

Festival v ulicích, doprovodný program Colours of Ostrava, který už posedmé oživil centrum Ostravy hudbou, divadlem, workshopy, stánky a programem pro rodiny, se letos uskutečnil již ve dnech 30. 6. a 1. 7. 2017. Program se odehrával nejen na Masarykově náměstí, Černé louce, v přilehlých ulicích a na břehu řeky Ostravice, ale poprvé také na Slezskoostravském hradě. A právě zde byl také stánek VŠB – Technické univerzity Ostrava, jedno z popularizačních stanovišť zabezpečila i Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra metalurgie a slévárenství, jejíž studenti spolu s pracovníky katedry připravili pro hosty festivalu program



v podobě slévárenských kvízů a odlitkového pexesa. V rámci stánku byla rovněž prezentována samotná katedra, fakulta a možnosti studia v oborech zajišťovaných katedrou metalurgie a slévárenství. Program stánku byl určen pro širokou veřejnost. Do naučně-popularizačních aktivit se zapojila řada návštěvníků bez rozdílu věku.



– Ing. Ivana Kroupová –  
katedra metalurgie a slévárenství

# Výstavy, veletrhy, konference

## Mezinárodní konference NanoOstrava již po páté

Mezinárodní konference NanoOstrava se letos v květnu konala již po páté v prostorách Nové auly VŠB-Technické univerzity Ostrava. Hlavním organizátorem konference bylo Centrum Nanotechnologií VŠB-TUO spolu s Ústavem geoniky AV ČR v Ostravě. Konferenci v úterý 23.5.2017 zahájil ředitel Centra nanotechnologií prof. Ing. Jaromír Pištora, CSc., prorektor pro studium, pověřený zastupováním rektora, prof. Ing. Petr Noskovič, CSc., prorektor pro vědu a výzkum prof. Ing. Petr Praus, Ph.D., proděkanka pro vědu a zahraniční vztahy UJEP, dlouholetá ředitelka Centra nanotechnologií prof. RNDr. Pavla Čapková, DrSc. a nastupující ředitel ÚG Ing. Josef Foldyna, CSc.

Z celkového počtu 140 účastníků byla třetina ze zahraničí a to nejen z okolních evropských států, ale i z Austrálie, Indie, Malajsie, Turecka a Ruska. V šesti odborných sekcích

rokovali odborníci na téma nanostrukturované materiály, terahertzové a fotovoltaické nanotechnologie, nanotechnologie pro medicínu a farmacii, bioinspirované materiály a nanomateriály. V těchto sekcích vystoupili excelentní vědci se zvanými přednáškami jako prof. Mahler z Queensland university v Austrálii a nebo prof. Akbulut ze Sakarya University v Turecku. Nemalé zastoupení mladých vědců a studentů z řad účastníků konference dostává v každém ročníku konference šanci zúčastnit se soutěže o nejzdařilejší posterovou prezentaci výsledků výzkumu. V letošním ročníku první tři místa obsadili K. Čabanová, M. Mahmud a V. Holišová, kteří byli odměněni peněžitou cenou.

Konferenci doprovázel bohatý program v podobě poznávacího výletu do Ostravského planetária a na konferenčním společenském večírku zpříjemnila atmosféru cimbálová muzika Lipka. Konferenční vědecké úsilí bude zúročeno v podobě konferenčních článků, které budou letos publikovány ve třech odborných zahraničních časopisech Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Photonics and Nanostructures a Materials Today: Proceedings.

- js -

## 27. ročník mezinárodní vědecké konference IRON AND STEELMAKING se uskuteční začátkem října v Beskydech

Ve dnech 4.–6. října 2017 se v hotelu DUO na Horní Bečvě uskuteční již 27. ročník mezinárodní vědecké konference IRON AND STEELMAKING, jejímž pořadatelem je letos VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a

materiálového inženýrství, katedra metalurgie a slévárenství. Hlavním partnerem konference jsou Třinecké železárny, a. s., mezi partnery patří také společnost OCELOT a časopis Hutnické listy.

Na konferenci vystoupí přední odborníci z oboru metalurgie a jejich přednášky budou tematicky zaměřené na tyto oblasti: • Teoretické zákonitosti metalurgických procesů. • Technologie výroby a zpracování surového železa. • Technologie výroby a zpracování oceli. • Výroba a rafinace kovů. • Ekologické aspekty výroby surového železa a oceli. • Modelování metalurgických pochodů.

Registraci lze provést na webových stránkách

<http://konference.fmmi.vsb.cz/iasm2017>

# Hutnictví ve světě

## Ocelářský průmysl: Na pokraji obchodní války

USA a Evropská unie učinily další krok ve směru k obchodní válce. Jako odpověď na výhrůžku amerického ministerstva obchodu zavést trestná cla proti dvěma německým ocelářským firmám (Salzgitter a Dillinger Hütte), zkoumá nyní Evropská komise, zda by mohla zavést vlastní ochranná cla proti americkým výrobcům oceli. „Musí to být ovšem požadováno od některého postiženého evropského ocelářského podniku,“ říká jeden vysoce postavený člen vedení EU. Poté by takové protiopatření mohlo být rychle (během několika měsíců) schváleno Evropskou komisí. To by se mohlo stát nezávisle na event. žalobě, podané u WTO, která by se mohla táhnout po dobu několika let. Prezident WV Stahl Hans Jürgen Kerkhoff protestuje proti nařčení ministerstva obchodu USA, členské podniky napadají americké oceláře dumpingovými cenami. Říká: „Německé ocelářské podniky agitují na světových trzích o tržně hospodářských pravidlech, a Američané nemohou částečně naši kvalitu vůbec vyrábět“. Viní Američany, že se nedrží pravidel WTO pro posuzování dumpingů a varuje před protekcionismem USA. Začíná to u pravidel, kterými je americkým podnikům nařizováno, například u projektů plynovodů používat jen polotovary, vyrobené v USA.

## Začíná se nedostávat oceli

Radost a žalost leží v ocelářském odvětví často blízko sebe. Ještě před několika málo měsíci se výrobci oceli kvůli přílivu oceli z Číny a pádu cen viděli krátce před propastí. Nyní se situace naprosto otočila. Alespoň německé hutě pracují s vytižením přes 90 % na hranici svých možností, navíc EU svými antidumpingovými opatřeními dovozy oceli z Dálného východu omezila, a tím se postarala o zvýšení cen. Zotavení ocelářského průmyslu vhání ovšem do problémů jiné odvětví: zpracovatelské. „Vývoj cen oceli žene do likviditních problémů první subdodavatele,“ varuje například průmyslový svaz tváření plechů (IBU). „Situace je dramatická,“ podtrhuje jednatel IBU Benhard Jacobs v rozhovoru s novinami „Die Welt“. Ohrožuje to mimo jiné velké výrobce automobilů. Další problém vzniká u ploché oceli, přesněji řečeno u širokých pásů, válcovaných za tepla, u níž v uplynulých několika měsících stoupla cena o téměř 75 %. Na spotovém trhu stojí dnes za tepla válcované plechy kolem 570 € za tunu, to je o 240 € víc, než před rokem. Ceny zde příkře stoupají od listopadu 2016 na nejvyšší hodnotu za posledních 6 let. Zatížení pro mnohé subdodavatele jde

tak do milionů. Kupuje-li dnes podnik například 7000 tun za tepla válcovaných plechů, leží vícenáklady u 1,8 mil. €. Pro středostavovské podniky je to dramaticky mnoho. Cenové skoky zvyšují požadavky na likviditu a přetěžují úvěrové limity. Výsledkem jsou insolvence. Postiženo je zatím kolem 500 firem, které dodávají tvářené díly z oceli především výrobcům automobilů a systémovým dodavatelům, ale také elektrotechnickému průmyslu, strojírenství a výrobcům lékařské techniky, praček, ledniček, zámků a kování.

## Výroba oceli se zvýšila

Výroba surové oceli v Německu v březnu vzrostla oproti březnu 2016 o 1,9 % na 3,9 mil. tun. Výroba oceli v prvním čtvrtletí 2017 je o téměř 2 % vyšší než před rokem. Konjunktura v množství vyrobené oceli tak pokračuje ve svém mírném zotavovacím kurzu, který byl předznamenán vývojem v množství zakázek v minulém roce. Konstatuje to Hospodářské sdružení Ocel (WV Stahl) z Düsseldorfu, které zastupuje 99 % výrobců surové oceli v Německu a k tomu řadu dalších evropských producentů. K ocelářskému průmyslu v Německu patří zhruba 70 podniků s 90 000 zaměstnanci.

## ArcelorMittal investuje 80 milionů Kč do výroby pružinové oceli

CIA News informují, že ArcelorMittal plánuje investovat do rekonstrukce lůžek pro řízené chlazení ve střední válcovně. Kontrakt za 80 mil. Kč byl zadán dceřinou společností ArcelorMittal Engineering Products v Ostravě. Rekonstrukce zajistí lepší vlastnosti pružinové oceli pro automobilní průmysl a nákladní dopravu. Ostravská ocelárna vyvinula tento produkt s vysokou přidanou hodnotou v roce 2016. Zahájení výroby si vyžádalo celkovou investici přes 210 mil. Kč.

## Trump dostává ocelářské odvětví pod tlak

V ocelářském sporu s USA varovala spolková vláda a odvětvový svaz v Německu vládu ve Washingtonu před izolováním trhu. „Znalecké posudky nejsou žádné zákony nebo opatření, ale ukazují směr k protekcionistickým tendencím, které my rozhodně nemůžeme přivítat,“ sdělila spolková ministryně hospodářství Brigitte Zypries. President Trump ohlásil předtím další obranná opatření k ochraně domácího ocelářského

průmyslu. Nechá totiž prověřit, zda dovozy v tomto sektoru neohrožují národní bezpečnost. Jaká opatření ze strany USA z těchto prohlášení vyplynou, bude spolková vláda ostře sledovat, oznámila dále ministryně. Bude problém konzultovat s ministrem obchodu USA Wilburem Rossem. Průmysl v Německu se obává, že by mohlo trh v EU zaplavit ještě více oceli. „Pokud by administrativa v USA opravdu široce izolovala domácí trh, bylo by to spojeno s masivními změnami obchodu směrem do otevřeného trhu EU. Protekcionismus není žádné řešení pro strukturální problémy na světovém trhu, nýbrž by mohl jen dále přispět k tomu, aby se deformace v mezinárodní soutěži ještě více prohloubily,“ prohlásil prezident WV Stahl Hans Jürgen Kerkho.

## Trh s ušlechtilou ocelí opět roste

Odvětví ušlechtilých ocelí hledí do budoucna většinou optimisticky. To vyplývá z bilance Dnů ušlechtilých ocelí 2017, na které se sjelo zhruba 150 účastníků. Podle Wolfganga Lippa, analytika Steel Market Intelligence GmbH, počítá se v Evropě tento rok s růstem 2 %, což odpovídá přírůstku výroby kolem 115 000 tun. Důležitý faktor vidí Lipp v antidumpingových clech, uvalených v roce 2015 na dovoz ušlechtilých ocelí z Číny. Určité riziko pro vývoj trhu vidí Lipp v politickém klimatu. Mohou se totiž výrazně zostřit restrikce pro globální obchod např. v USA a Velké Británii. Velká pozornost musí být věnována technologickým změnám v automobilním průmyslu, především přechodu na elektromobily a nejnověji i všeobecným ústupem od dieselových motorů.

## Inovace oceli určují budoucnost

Na 21. výročním jednání deníku Handelsblatt „Ocelářský trh 2017“ v únoru v Düsseldorfu byly kromě témat a diskusních okruhů k aktuální strukturální a politikohospodářské situaci ocelářského průmyslu představeny také inovativní řešení s ocelí. Přednáškový blok prezentoval aktuální projekty a inovace týkající se vysoce výkonného materiálu ocel. Německo disponuje jedinečnou výzkumnou sítí, zabývající se ocelí, která zahrnuje univerzitní, mimouniverzitní a průmyslový vývoj a výzkum. Výzkumná síť ocelářského výzkumu sahá od dobývání rudy až k užitému produktu a zapojeny jsou všechny články řetězce tvorby hodnot. Výzkumná agenda má tři těžiště: technologie k omezení a využívání CO<sub>2</sub>, optimalizace procesních řetězců (strategie nulových chyb, průmysl 4.0) a přidaná hodnota díky používání oceli. V Evropě se dnes vyrábí kolem 2500 normovaných ocelí. Každý rok je cca 150 ocelí v jejich vlastnostech vylepšeno a nově vyvinuto. Výkonnost oceli se dobře ukazuje na těchto čtyřech příkladech: a) karoserie z vysokopevných ocelí zachycují v průběhu několika milisekund výraznou pohybovou energii a optimálně chrání cestující ve vozidle.

Strukturální prvky z inovativních ocelí mají až o 30 % vyšší schopnost přijímat energii a to při snížené deformaci, b) písty pro dieselové motory osobních aut z vysokopevných zušlechťených ocelí mají díky vyšší mechanické a tepelné zatížitelnosti až o 30 % menší konstrukční výšku než hliníkové písty. Ocelové písty poskytují podstatný příspěvek k plnění stále náročnějších předpisů k emisím CO<sub>2</sub>, c) potravinářské plechovky jsou vyráběny z ultratenkého bílého plechu o tloušťce 0,13 mm. Při stejném plnicím množství je tak plechovka o polovinu tenčí a těžší. Recyklační kvóta je s 90 % největší na světě, d) oba vnitřní podvozky Airbusu A380 vydrží díky použití vysokopevných zušlechťených ocelí zátěž 520 tun při přistání. To odpovídá váze 400 aut VW Golf.

## Podniková rada Tata je proti fúzi s ocelářskou divizí Thyssenkrupp

Zaměstnanci Tata Steel mobilizují proti možné fúzi s ocelářskou divizí Thyssenkrupp. Ve včera zveřejněném sdělení celopodnikové rady Tata Steel Nederland stojí, že rada je toho mínění, že „tato fúze ignoruje zájmy zaměstnanců“. Rada mluví o podstatných následcích pro zaměstnance a obtížné spolupráci vzhledem k obrovským kulturním rozdílům v obou podnicích.

## IG Metall se bojí o 4050 pracovních míst u Thyssenkrupp

Thyssenkrupp představil na zasedání závodních rad první cíle a limity plánované přestavby ocelářské divize. Podle údajů managementu nepokrývá divize již celé roky kapitálové náklady a musí být proto restrukturalizována. Šéf divize Andreas Goss stanovil pro ocelářskou divizi do roku 2020 výkonnostní rozdíl ve výši 1,6 mld. €, 500 mil. euro má být v příštích třech letech ušetřeno. Kromě toho má být snížen počet zaměstnanců a mají být odstavena některá zařízení u hrubých plechů. Šéf představenstva Thyssenkrupp Heinrich Hiesinger zdůraznil v minulosti již několikrát nutnost přestavby a konsolidace. „Již roky nevyděláváme na naše náklady. A to i přesto, že Steel Europe patří ke dvěma nejrentabilnějším výrobcům oceli v Evropě. Úsporné programy nám dávají jen možnost vydechnutí,“ prohlásil Hiesinger na valné hromadě. Provozní, surovinové a dopravní náklady se dají stlačit jen těžko. Jinak je tomu u personálních nákladů, které tvoří zhruba čtvrtinu celkových nákladů. Ty by měly brzy stoupnout, protože v nejdůležitějším závodě v Duisburgu se bude přecházet z 31hodinového týdne zpět na 35hodinový. Koncern chce ale personální náklady snížit o více než 200 mil. euro, což je o více než 10 %. Podniková rada se obává odbourání tisíců pracovních míst a dále i úplné uzavření některých provozů a lokalit. S těmito záměry vyslovila nesouhlas. Jako o ohrožených provozech či závodech se mluví

o válcovně v Bochumi a provozech v Kreuztalu a Gelsenkirchenu. Diskutuje se také o Hüttenwerke Krupp-Mannesmann (HKM), které patří společně s koncernem ThyssenKrupp, Salzgitter a Vallourec. Od roku 2016 se jedná o fúzi s Tata Steel. Joint Venture 50:50 by byl řešením, konec jednání se ale zdá být v nedohlednu. V důsledku fúze by vznikl druhý největší výrobce oceli v Evropě za ArcelorMittal s 50 000 zaměstnanci a obratem 20 mld. €. Podíl na trhu s lukrativní ocelí pro automobilový průmysl by tvořil čtvrtinu.

## Železářny Košice jsou nyní v čínských rukou

Je to nyní již podruhé, co je evropská ocelárna, patřící dříve US Steel, odkoupena čínským ocelářským koncernem. Podle Radia Ö1 Morgenjournal převzala východoslovenské železářny Košice čínská He Steel. Před téměř přesně jedním rokem převzala čínská Hebei Iron and Steel Group (HBIS) srbskou ocelárnu Smederevo poté, co ji Srbsko od US Steel odkoupilo zpátky. Pár měsíců po převzetí se ocelárna stala druhým největším exportérem země. Železářny Košice jsou se svými 14 000 zaměstnanci jeden z největších podniků Slovenska. Zda Číňané dali těmto spolupracovníkům garance zaměstnanosti, není známo. Rovněž kupní cena není známa, spekuluje se o 1,4 mld. €. V každém případě se slovenská vláda při jednáních velmi snažila udržet a zvýšit v podniku vliv státu. Čínský investor by neměl ocelárnu využívat jako základnu pro odbyt v Číně vyrobených ocelářských výrobků. Železářny byly před 17 lety koupeny koncernem US Steel, nepřinesly však Američanům velký úspěch. Jen díky velkým subvencím odvrátila vláda prodej hutí v roce 2013. Situaci má nyní zachránit He Steel, druhý největší výrobce oceli v Číně s 33 000 zaměstnanci.

## Schoeller Werk vyrábí přímé roury o délce 36 m

Chladicí systém je centrální součástí elektrárny. Horká pára, která je nutná pro výrobu proudu, musí být za turbínou ochlazená a následně znovu přivedena do systému. Se stoupajícím výkonem elektráren se zvětšuje také sekundární okruh k chlazení systému a tam používané roury jsou delší. Ty musí současně odolávat zvýšeným požadavkům, protože jsou vystaveny silným zátěžím vysokých teplot a tlaku a každý defekt může vést ke škodám na zdraví, životnímu prostředí a věcným škodám. „Větší efektivita a větší výkonnost při maximální bezpečnosti. Tato devíza platí v energetickém odvětví již dlouho. My s našimi cennými řešeními problémů trub podporujeme naše zákazníky při optimalizaci funkční bezpečnosti jejich elektráren,“ říká Markus Zimmermann, šéf týmu u Schoeller Werk. Podle specifikace zákazníka mají roury průměr od 15 do 25,4 mm a sílu stěny od 0,8 do 2,11 mm. Pro jejich

výrobu se používá široká paleta austenitických a feritických ocelí. Ty jsou nejen obzvláště korozivzdorné. Ale také odolné proti vysokým teplotám.

## Elektromobilita s podvozkem z lehké konstrukce

Elektromobilita získává soustavně na významu. Přitom hraje jednu z rozhodujících rolí redukce hmotnosti dílů vozidla, která vede k vyšší efektivitě a ochraně zdrojů. Zde nabízí lehké konstrukce s využitím oceli různá řešení. Specialista koncernu ThyssenKrupp Precision Steel v Hohenlimburgu nyní pomocí superlehké trubkové konstrukce vyvinul nový konstrukční díl pro podvozek elektromobilu. Použita je vysokopevná ocel HBS 800. Menším nasazením materiálu u této optimalizované komponenty podvozku dochází k úspoře hmotnosti o více než 34 %, tzn., že díl je o třetinu lehčí. Další výhodou inovativní konstrukce je kratší doba výroby a podstatně menší prostřih. Další součástí nové koncepce vozidla jsou také moderní trubkové stabilizátory z mangan-bórové oceli, kde inovativní řešení vede k úspoře hmotnosti až 45 %.

## Salzgitter platí trestná cla USA

V antidumpingovém procesu USA proti evropskému ocelářskému podniku potvrdil druhý největší německý výrobce oceli Salzgitter placení trestného cla. „Od 30. března to nabylo právní účinnosti a náš výrobek hrubý plech je od té doby zatížen trestným clem ve výši 22,9 %,“ řekl mluvčí koncernu Salzgitter. Cla nebyla uvalena se zpětnou platností. Koncern rozhodně odmítl proti němu směřované výtky, jeho obrat v obchodu s USA činí zhruba 6 % z celkového obratu.

## Rozloučení Audi s autem z hliníku

Zná pokrok jen jeden směr? Na spirále se můžete pohybovat stejně směrem nahoru i dolů. To se domnívali inženýři z Audi, když nadchnuti zapáleným technickým Ferdinandem Piechem, když vyvinuli v roce 1994 pro druhou generaci velké limuzíny A8 první velkosériově vyráběnou celohliníkovou karoserii. Použitím tohoto lehkého kovu snížili hrubou váhu hrubé karoserie na pouhých 249 kg. Lehčí auta, tak pravila naděje, potřebují jen menší motor a ne tak silné brzdy a tlumiče. S novým A8, které bude představeno na IAA ve Frankfurtu nad Mohanem, proběhne rozloučení s čistě hliníkovým A8, které bylo mezitím kopírováno mnoha výrobci. Dnes bude z různých druhů hliníku již jen 58 % hrubé karoserie, jakož i dveře, kryt motoru a kryt zavazadlového prostoru. Nové kouzelné slůvko zní: „smíšený způsob konstrukce“. Zvláštní roli při tom hrají za tepla tvářené oceli, ty tvoří jádro přední kostry prostoru pro cestující, které chrání jezdce a spolujezdce

před nárazem. „Postavíme-li pevnost do relace s hmotností, leží za tepla tvářená ocel dnes před hliníkem“, vysvětluje Bernd Mlekusch, šéf centra pro lehké konstrukce v Audi.

## Nový online-shop by měl dát odbytu Severstalu křídla

S novou webovou stránkou bude nákup ocelářských výrobků tak jednoduchý jako stažení e-knihy nebo nákup nových bot. To v každém případě slibuje podnik, patřící ruskému miliardáři Alexeji Mordaševovi. První testy v listopadu 2016 byly zřejmě tak úspěšné, že Severstal chce již v roce 2018 prodávat 3,5 mil. tun oceli online, třetinu celkového odbytu z roku 2016. Ačkoliv je internetový prodej ocelářských výrobků stále oblíbenější, především v Číně a v Indii, je většina online-shopů provozována obchodníky a ne výrobci. Severstal chce zpočátku nabízet online jen standardní výrobky, potom ale krok za krokem i speciální výrobky.

## Čínské hospodářství silně roste

Pokud věříme vládě v Pekingu, roste čínské hospodářství s fenomenální stabilitou. Výkon ekonomiky stoupl v prvním čtvrtletí běžícího roku ve srovnání se stejným obdobím předcházejícího roku o 6,9 %. Podle oficiálních čísel kolísaly hodnoty růstu v uplynulých jedenácti čtvrtletích v úzkém rozmezí od 7,2 do 6,8 %. Ekonomové vyjádřili v minulosti domněnku, že čínská úřední statistika v letech, kdy hospodářství skutečně silně expandovalo, uměle výkony snižovala. To Pekingu umožňuje, že v časech, kdy skutečnost není tak dobrá, statistiku upravit, aniž by to zpochybnilo nebezpečně celý obraz. Nová dobrá čtvrtletní data z Číny jsou ovšem podložena dalšími dobrými konjunkturními hlášeními. Pro čínské hospodářství velmi důležitý trh s nemovitostmi sice roste méně razantně, ale pořád ještě s dvoumístnými procentními hodnotami. Také před několika dny zveřejněný silný růst exportu podporuje dojem prosperity. Prodeje motorových vozidel se v prvním čtvrtletí zvýšily o 7 % oproti stejnému období minulého roku, i když Peking znovu snížil daňové výhody pro kupce. Vzestup čínského hospodářství začátkem letošního roku, který je o 0,2 % vyšší než v předcházejícím období, může ale být výsledkem státních subvencí.

## Trump staví importy oceli na zkušební stojan

Prezident USA Donald Trump nechá přezkoumat, zda importy oceli např. z Číny a Německa nenarušují národní bezpečnostní zájmy. „Ocel je rozhodující jak pro naše hospodářství, tak také pro naše vojsko,“ řekl Trump ve Washingtonu po podpisu memoranda, kterým je

ministerstvo obchodu pověřeno přezkoumáním importů oceli. Přitom se musí ministerstvo obchodu domlouvat s Pentagonem. „Dumping se stal v této zemi obrovským problémem,“ stěžuje si Trump. „Do USA jsou importována obrovská množství oceli a tato množství neškodí jen naší zemi, ale také našim podnikům“. USA si „nemohou dovolit“ být závislé na jiných zemích, varoval prezident. Trump současně zdůraznil, že se nejedná o opatření proti Číně. „To nemá s Čínou nic společného, dumping je spíše celosvětový problém“. Ministr obchodu USA Wilbur Ross, který dříve pracoval pro koncern ArcelorMittal, řekl před novináři, že ve hře je přežití amerických výrobců oceli. Jen v prvních dvou měsících letošního roku stouply dovozy oceli do USA o 19,6 % a tvoří dnes čtvrtinu oceli na trhu USA. Američtí výrobci jsou přitom vytíženi jen ze 71 %.

## Suroviny tlačí kurzy dolů

Politika má finanční trhy i nadále pevně v rukou: poté, co britská premiérka Mayová překvapivě oznámila ve Velké Británii nové volby, spadl burzovní index FTSE 100 o 1,7 %. Sestupnému trendu se nevyhnuly ani německé akcie. Největším poraženým byl ocelářský koncern Thyssenkrupp, který ztratil 2,5 %. Tuto ztrátu pomohl vytvořit pád ceny železné rudy v Číně, který činil 6,5 %. Poptávku po železných rudě dusil přebytek nabídky oceli. Cena oceli klesla na burze v Šanghaji o 3,7 %. Vývoj, kterému neunikla ani konkurence Thyssenkrupp v Německu – Salzgitter, ztratil více jak 2,5 %, ArcelorMittal šel dokonce o 5 %. Od poloviny března ztratily tyto tři koncerny již 9–21 % na burzovní hodnotě. Podobně se nedařilo i důlním koncernům (Glencore, Rio Tinto). Optimisticky hledí ale investoři na Turecko. Po svém vítězství v referendu si Erdogan upevnil svoji pozici a burza reagovala proti evropskému kurzu směrem vzhůru. Podle názoru Commerzbank bude mít ale zotavení turecké měny a burzovních cen jen krátké trvání.

## Izolace á la Trump

V duchu Trumpova hesla „America first“ slíbil ministr financí USA Steve Mnuchin, že bude bránit práva Spojených států a jmenoval jako příklad rozhodný postup proti dumpingu u oceli. Proti intervencím vlády USA se ale musí připravit i jiná odvětví. Že to vláda myslí vážně, o tom podniky nepochybují: jak se Handelsblatt dozvěděl z podnikatelských kruhů, vyzvala vláda právníky jednotlivých firem, aby žádaly zavedení omezení dovozu. Mezi nimi zejména zástupce ocelářského, hliníkářského a solárního odvětví. Opatření se mají směřovat zejména proti Číně, mohou ale postihnout také importéry z jiných zemí. Vláda míní podle dostupných informací zavést tzv. „Safeguards“. Tato ochranná opatření umožňují podle pravidel WTO krátkodobě omezit import příslušných výrobků dovozními kvótami nebo dovozními cly, a sice nezávisle na tom, odkud tyto výrobky pocházejí. Jinak

než při jiných antidumpingových opatřeních zde vláda nemusí dokazovat neférové praktiky zahraničních dovozců. Konečné rozhodnutí je na prezidentovi USA. U koncernu Thyssenkrupp i druhého největšího výrobce oceli v Německu Salzgitter již o těchto plánech nepřímo slyšeli. Protože se jedná o drakonické opatření, předpokládá WTO od roku 1994 pro Safeguard přísná opatření. Aby se dostalo předpisům, musí podniky a úřady USA prokázat, že domácí průmysl v důsledku krátkodobého a nepředpokládaného zvýšení importu utrpěl těžké škody. Vláda přitom předpokládá, že jí podniky dodají přesvědčivé důkazy. Trump není první americký prezident, který by chtěl zavést taková opatření. Zkoušel to i George W. Bush v roce 2001, kdy chtěl u některých ocelářských výrobků zvýšit cla až o 30 %. Obchodní partneři s tím ale nebyli srozuměni a podali žalobu u WTO a vyhráli. Je zde ale jeden problém: mezi zavedením opatření a rozsudkem WTO uběhne poměrně dlouhá doba, v tomto období opatření Safeguard platí. V roce 2001 činila tato doba dva roky. Kromě toho není jasné, zda by Trump takový rozsudek vůbec akceptoval. V Bruselu a v Berlíně panují velké obavy, že Washington mezinárodní systém pravidel pohrbí.

### **Ugitech: kapacity v zajišťování kvality zvýšeny o 50 %**

Je jedno, zda se jedná o brzdové systémy, vstříkovač trysky nebo tlakové senzory v airbagu – u těchto výrobků z oceli pro bezpečnostní konstrukční prvky platí v automobilním průmyslu princip nulových chyb. Aby se splnila stoupající poptávka na bezvadnou ušlechtilou ocel, investoval Ugitech kolem 2 mil. € do nového ultrazvukového zkušebního zařízení. Tím dceřiný podnik švýcarského koncernu Schmolz+Bickenbach výrazně navýšil své kapacity v oboru zajišťování kvality. Dnes Ugitech, jako významný dodavatel součástek z ušlechtilé oceli pro automobilní průmysl, prověřuje ročně kolem 35 000 tun ocelových tyčí na vnitřní a povrchové vady a přispívá tak významně ke zvyšování kvality automobilních součástek.

### **Dillinger Hütte má milionovou ztrátu**

Dillinger Hütte vykázala i přes dobré vytížení v uplynulém roce před zdaněním a úroky ztrátu 80 mil. €. V roce 2015 vykázala firma ještě v bilanci malý zisk 10 mil. €. Podnik sice v roce 2016 zvýšil odbyt válcoven v Dillingenu a Dunkerque z 1,86 mil. na 1,88 mil. tun, obrát ale klesl z 1,84 mld. na 1,76 mld. €. Jako důvody firma uvádí celkově špatnou situaci v odvětví. Aby se firma udržela i přes trvající krizi v oblasti hrubých plechů fit, vyhlásila restrukturalizační program „Dillinger 2020“. Náklady půjdou dolů, předpokládá se snížení počtu zaměstnanců o 400. V roce 2020 by měla huť zaměstnávat již jen 4700 lidí. Nepůjde ale o masové

provozní propouštění, spíše o neobsazování uvolněných míst a propouštění do důchodu.

### **Velkozakázka pro firmu Europipe z Mühlheimu**

Společný podnik firem Salzgitter Mannesmann Grobblech (MGB) a Mühlheim Pipecoatings si mohly zapsat do zakázkových knih znovu objemný obchod: provozovatel dálkových vedení Cascade si objednal u Europipe 635 000 tun velkých trub pro plynovod z německého Baltu do České republiky. Plynovod půjde z Lubminu u Greifswaldu, kde ústí baltský plynovod z Ruska, přes Meklenbursko, Braniborsko a Sasko do České republiky. Na území východního Německa se bude stavět celkem 485 km plynovodu. Polovinu hrubého plechu dodá Europipe jako vedoucí světová značka a druhou polovinu dodá Dillinger Hütte. O povrstvení trub o průměru 56 coulů se postará Mühlheim Pipecoatings. Zakázka posune odbourávání pracovních míst u Europipe ještě hlouběji do šuplíku.

### **Nové vzkříšení British Steel**

Nově založená ocelářská skupina British Steel disponuje historicky významným jménem. Vedena je manažerem Rolandem Junckem, sídlícím v Curychu, který se zapřísáhl, že ve strukturálně slabém severu Anglie vytvoří nové pracovní příležitosti. Pro novou British Steel hraje důležitou roli evropský vnitřní trh. Denně jezdí dva vlaky mezi sídlem firmy v Scunthorpe se 4200 zaměstnanci do francouzské pobočky v Hayange, kde 400 zaměstnanců vyrábí z ocelových bloků z Anglie železniční koleje převážně pro francouzské dráhy SCNF. Kromě velkých ocelových nosníků pro budovy tvoří právě kolejnice hlavní produkt British Steel. Nejdůležitějším konkurentem firmy v obchodu s kolejnicemi je rakouský ocelářský koncern VoestAlpine. Oba závody (Scunthorpe i Hayange) získala British Steel od Tata Steel jako vysoce ztrátové provozny. Ztráta v uplynulých letech dosahovala ročně 80 mil. liber. Nový majitel však doufá, že již v roce 2017 přejde firma do černých čísel.

### **Vyvinuta ocel s podobnými vlastnostmi, jako mají kosti**

Mezinárodní tým vědců v Max-Planck institutu pro výzkum železa v Düsseldorfu (MPIE) vyvinul novou ocel, inspirovanou vlastnostmi lidských kostí. Tato ocel, legovaná manganem, niklem a hliníkem vykazuje mimořádně vysokou odolnost proti únavě a zastavuje v oceli rozšiřování únavových trhlin již velmi brzy na mikro - a nanoúrovni.

# Historický seriál

## Historie výroby kovů a její obraz v bibli

### 5. část: Speciální technologie

Kromě základních technologií výroby a tváření kovů zvládli dávní hutníci i řadu speciálních technologií. Jednou z nich bylo **zpracování polymetalických rud**, které se vyskytují poměrně často. Časté jsou například rudy obsahující olovo a stříbro. Po jejich redukci se získá roztavená slitina olova a stříbra. Po dlouhá staletí měli lidé zájem pouze o stříbro. Na taveninu proto dmýchali vzduch, olovo přednostně zoxidovalo, protože má větší afinitu ke kyslíku než stříbro, přešlo do strusky na povrchu a po opakovaných takovýchto krocích nakonec zbylo jen roztavené surové stříbro. Tento postup se používal až do novověku a řadí se k pyrometalurgickým technologiím. U starých hutí se proto nacházely haldy strusky s vysokým obsahem olova a případně i dalších kovů. V pozdější době, kdy již byl o olovo zájem, se začaly zpracovávat i staré strusky. Zpracování polymetalických rud měl zřejmě na mysli prorok Ezechiel, když napsal: "Lidský synu, dům izraelský se mi stal struskou, všichni jsou pouhá měď a cín, železo a olovo uvnitř tavicí pece, stali se struskou po tavbě stříbra ... Jako se shromažďuje stříbro a měď, železo, olovo a cín dovnitř tavicí pece a kolem ní se rozdmýchává oheň k tavbě, tak vás shromáždím ve svém hněvu a rozhořčení, vložím do pece a roztavím." (Ez 22,18 a 20)



**Obr. 1** Bojová drátěná košile spletená z 20 tis. železných kroužků; nález v bažině Vimase, ostrov Fyn, Dánsko, 2. – 3. stol. [1] (archív red.)

Již ve starověku bylo zvládnuto **tažení drátu**, ovšem jen z neželezných kovů, především stříbra, zlata a slitin mědi. Kov se táhl se přes provrtané kameny. Naproti tomu tažení ocelových drátů, které vyžaduje mezioperační žhání, pečlivé odstranění okují a dobré mazání průvlaků z tvrdokovů, bylo zvládnuto až v moderní době. Dráty na drátěné košile bojovníků [1] (obr. 1) se ve středověku vyráběly kovářským prodlužováním na kovářských kladkách. Získávaly se tak kusky drátů v délkách 20 až 30 cm a tyto výkovky se svařovaly v ohni.

O **kalení** oceli píše již Homér ve své Odysseji (800 let př. Kr.). I v Bibli je zmínka o kalení nástrojů v 1. knize Saulově, což by dokonce odpovídalo r. 1040 př. Kr., avšak nástroje z té doby nemají ještě typickou základnou strukturu. Struktura oceli totiž jasně nedokazuje, zda předmět byl zakalen. Nejstarší nástroje byly zakalené buď jen na povrchu, nebo vůbec ne. Snad byla dosažena jen nízká teplota ohřevu nebo tento výraz tehdy označoval jiný postup, možná ostření. Archeologické nálezy svědčí o tom, že kalení, které dává oceli martenzitickou nebo bainitickou strukturu, se začalo praktikovat v Řecku v 5. stol. př. Kr. Podle některých autorů ho však vynalezli Skythové a staří Řekové od nich postup převzali. Skytové, kteří byli ve vojenském i obchodním vztahu s Řeky v oblasti severního Černomoří již v předhelénském období (dokládá to Hérodotos ve svých *Dějínách – Histories apodeixis* a iónské

keramické vykopávky), ovládali totiž vysoce rozvinuté technologie hutnictví drahých kovů i železa a výrobků z nich [2]. Bohaté archeologické zdroje v hradišti Kamenskoje dokládají u Skytů v oboru hutnictví železa používání kovářského svařování, cementace nebo tepelného zpracování za účelem dosažení jemnozrnné perlitické struktury.

Ve stejné době nebo snad dříve bylo kalení zavedeno i v Indii. V Indii byla zvládnuta výroba vysokých sloupů a jiných objemných předmětů kování. Nejznámější z nich je sloup v Delhi (obr. 2, 3). Má výšku 7,3 m (nad zemí 6,5 m) a hmotnost 6,5 t. Byl vykován zřejmě mezi roky 375 a 415. Udává se, že ho kovalo 120 kovářů. Postup kování a manipulace při kování zůstávají neobjasněny.



**Obr. 2** Ocelový sloup v Delhi



**Obr. 3** Nápis na detailu sloupu v Delhi

V Indii před příchodem Evropanů neznali vodní kolo, řemeslníci vše prováděli ručně. Další podobné sloupy jsou v Kapurhale a ve Dharu. Druhý z nich je dokonce 15 m vysoký a má průměr 200 mm. Všechny tyto sloupy stojí pod širým nebem a nevykazují stopy koroze. Na jejich povrchu je vidět, že byly vyrobeny kovářským svařováním slitků o hmotnosti asi 20 – 25 kg. Odolnost proti korozi se vysvětluje zvýšeným obsahem fosforu.

Při výrobě malých zvonečků či šperků se používala další speciální technologie, a to odlévání s využitím vytavitelného **voskového modelu**. Podle [3] používali tuto technologii při výrobě šperků již Sumerové v Mezopotámii. Podle archeologických vykopávek z hradiště Kamenskoje na Dněpru [1] ji ovládali i tamní řemeslníci před rozvinutím hutnictví v Evropě. Technologii voskového modelu používali také Aztekové a Inkové v době objevení Ameriky.

**Velké zvony** se začaly odlévat až ve středověku. Odlévaly se ze zvonoviny, což je bronz obsahující 78 % mědi a 22 % cínu. V minulosti se tyto zvony odlévaly na staveništi kostela. Tehdy byla rozšířena pověra, že přídavek zlata a stříbra zlepšuje zvuk zvonu. Lidé proto házeli šperky do otvoru v peci. Ty však cíleně padaly do jamky pod pecí, nikoliv do tavené lázně a byly vítaným materiálním přínosem hutě. Pokud se provede chemická analýza takto odlitého historického zvonu, žádné drahé kovy se v něm nenajdou. Podobných technologických mýtů kolovalo v historii mnoho.

Mnohé pověry se vázaly na operaci kalení. Například se udávalo, že některé nástroje je třeba kalit v panenské moči. Zde je třeba připomenout, že při kalení se musí dosáhnout určitá rychlost ochlazování, aby vznikla základná struktura. Při vyšším obsahu legur (v historii se používala jediná legura, a to uhlík), tedy při vyšším obsahu uhlíku, stačí nižší rychlost ochlazování. Naopak, při vysoké rychlosti ochlazování je u výkovků s vysokým obsahem uhlíku a vyšší tloušťkou nebezpečí vzniku trhlin při kalení. Menší rychlost ochlazování se dosahuje ve slané vodě, moči nebo oleji. Jiná metoda se používala a stále ještě používá při kalení japonských samurajských mečů zvaných katana. Před kalením se na povrch meče nanese vrstva kašičky, jejímž základem byl kaolin nebo jíl pojený např. vodním sklem. Tato ochranná vrstva se nanášela na hřbet a stěny v souvislé vrstvě. Ostří zůstávalo v pásmu o požadované šířce obnažené jak pro působení teploty ohřevu, tak pro zrychlený odvod tepla při kalení. Na povrchu vznikl charakteristický optický reliéf. Ještě i dnešní kováři na svých předváděcích akcích kovou tyto meče podle původní technologie. Na obr. 4 je meč připravený pro kalení ostří, obr. 5 ukazuje vlastní kalení.

Plinius starší († r. 79 při evakuaci obyvatelstva Pompejí před erupcí Vesuvu) ve svém díle *Historia naturalis* (r. 77) uvádí, že slitina electrum tvořená třemi díly zlata a jedním dílem stříbra, která se používala na výrobu pohárů, má zvláštní vlastnost: „*Octne-li se v poháru vyrobeném z elektrá jed, objeví se na kovu oblouky jako na nebeské duze a ozve se praskání ohně.*“ Tuto pověru, vymyšlenou patrně nějakým zlatníkem za účelem zlepšení odbytu, převzala od Plinia

Staršího řada antických autorů. Ve starých dobách se jim běžně věřilo. Mnohé z nich ještě dnes nalezneme ve zcela vážně míněných publikacích. V Bibli však je nenalezneme a když se zde nacházejí mnohé narážky na práci hutníků a kovářů, pak v těchto narážkách nejsou věcné chyby. Vysvětlení je jednoduché: výrobu kovových ozdob a bohoslužebných předmětů pro chrám prováděli přímo kněží. Šlo o předměty určené pro Boží dům. Kněží tedy byli obeznámeni s hutními technikami. Obdobně v pravoslavné církvi nemůže psát ikony (ikony se nemalují, ale píší) běžný malíř (v historii řazený mezi obyčejné řemeslníky), ale jen mnich či člověk, který je dokonale seznámený s daným odvětvím religionistiky.



**Obr. 4** Jílová izolace na čepeli meče připraveného pro kalení ostří, které je ponecháno bez izolace; ukázka z předvádění technologie na VŠB-TU Ostrava, 2017 (foto red.)



**Obr. 5** Vlastní kalení japonského meče; ukázka z předvádění technologie na VŠB-TU Ostrava, 2017 (foto red.)

Ing. Ladislav Jilek, CSc.  
Ing. Jan Počta, CSc.

## Literatura

- [1] SCHELTTE, F. *Germáni mezi Thorsbergem a Ramennou* (čes. překl. Košnar, L. z něm. orig. *Germanen zwischen Thorsberg und Ravcenna*, Leipzig: Urania Verlag, 1971). Praha: Orbis, 1977, 303 s. (archiv red.)
- [2] SMIRNOV, A. P. *Skytové* (čes. překl. Vlášek, J. z rus. orig. *Skify*, Moskva: Nauka, 1966). Praha: Panorama, 1980, 204 s. (archiv red.)
- [3] SMITH, R. L.: The Impact of Metals on Society, part I: Antiquity. *Journal of Metals*, April 1998, s. 66–67.



## NABÍDKA DOKTORSKÉHO STUDIA V AKADEMICKÉM ROCE 2017/2018

*Jdi za svým cílem...*

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství VŠB – TU Ostrava nabízí uchazečům s ukončeným navazujícím magisterským vzděláním studium ve studijních programech doktorského studia:

### METALURGIE

Doktorský studijní program Metalurgie zahrnuje tři studijní obory: **Metalurgická technologie, Chemická metalurgie a Tepelná technika a paliva v průmyslu.** Pokrývá tedy celou šířku problematiky výroby a zpracování tekutých a pevných materiálů na bázi železa a neželezných kovů, chemických aspektů procesů přípravy kovových materiálů a jejich teoretických zákonitostí a rovněž fyzikální podstaty procesů souvisejících se sdílením tepelné energie a průmyslovými palivy včetně ekologických aspektů metalurgické výroby. Studijní program Metalurgie vychovává špičkové odborníky, kteří se budou schopni uplatnit ve vědecké, výzkumné, vývojové i výrobní sféře ve vysoce odborných i vedoucích funkcích.

### MATERIÁLOVÉ VĚDY A INŽENÝRSTVÍ

Program vychovává vysoce erudované odborníky širokého interdisciplinárního zaměření se širokým přírodovědným základem. Je koncipován na hlubokém poznání struktury klasických i speciálních materiálů, jejich užitečných vlastností, vztahů mezi strukturou i vlastnostmi i mechanismů jejich degradace. Rovněž zahrnuje oblast hodnocení mechanických vlastností, diagnostiku chemické konstituce i struktury materiálů, včetně diagnostiky materiálových vad. Seznamuje s moderními metodami výroby technických materiálů a jejich recyklací.

### PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor je zaměřen na vědeckou a samostatnou tvůrčí činnost v oblasti disciplín chemického a procesního inženýrství zahrnujících jak teoretickou práci, tak práci experimentální s využitím pokročilých výzkumných technik. Absolventi doktorského studijního programu naleznou uplatnění ve výrobních podnicích chemického, potravinářského i farmaceutického průmyslu a v oblasti ochrany životního prostředí, dále jako vědečtí, vývojoví nebo pedagogičtí pracovníci na vysokých školách, ve výzkumných ústavech a výzkumných institucích a ve státní správě.

### ŘÍZENÍ PRŮMYSLOVÝCH SYSTÉMŮ

Studijní program vychází ze systémového, integrálního pojetí řízení průmyslových aktivit a procesů v podmínkách tržní ekonomiky. Jako vyvážené propojení znalostí průmyslové podnikatelské ekonomiky, teorie a metodologie průmyslového managementu se znalostmi technickými a technologickými, je studijní program orientován zejména na výrobní systémy ve sféře metalurgické, chemické a strojírenské, avšak zasahuje i do oblasti nevýrobní sféry.

#fmmiostrava

### ZAÚJALY VÁS DOKTORSKÉ STUDIJNÍ PROGRAMY NA FMMI?

S podrobnou charakteristikou jednotlivých studijních programů a oborů se můžete seznámit na webu [www.fmmi.vsb.cz](http://www.fmmi.vsb.cz). Absolventi doktorského studia FMMI se uplatní v materiálových, metalurgických, chemických a ekonomických oborech, ale také ve vědecko-výzkumných organizacích či organizacích státní správy.

**PŘIHLÁŠKU KE STUDIU** lze podat elektronickou formou prostřednictvím formulářů dostupných na [www.fmmi.vsb.cz](http://www.fmmi.vsb.cz) nebo písemně na adresu studijního oddělení:  
FMMI, VŠB-TUO, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba.

17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava - Poruba, +420 597 325 552, [monika.barcova@vsb.cz](mailto:monika.barcova@vsb.cz)

[www.fmmi.vsb.cz](http://www.fmmi.vsb.cz)

Facebook, Instagram: fmmiostrava