

ROČNÍK/VOL. LXXV
ROK/YEAR 2022

5-6

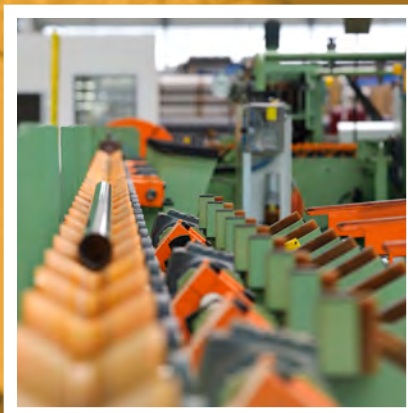
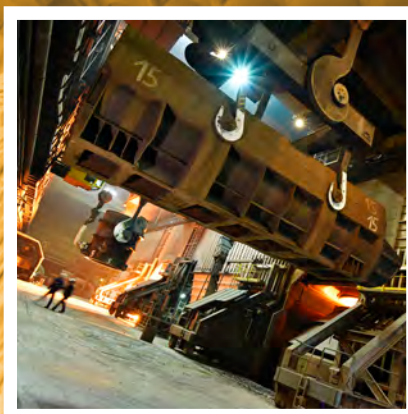


Hutnické listy

METALLURGICAL
JOURNAL

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

WWW.HUTNICKELISTY.CZ
ISSN 0018-8069





METALURGIA S.A.
RADOMSKO

Member of TRINECKÉ ŽELEZÁRNY - MORAVIA STEEL Group

We produce with passion for our customers



bare wires / galvanized wires / PVC coated wires / copper coated wires

knotted wire netting / barbed wires / rods

staple wire / welding wires / bookbinding wires

heat treatment services / surface treatment services of wires and wire rods

METALURGIA SA ul. Św. Rozalii 10/12, 97-500 Radomsko, POLAND,
tel. +48 44 685 41 66, fax. +48 44 685 41 61,
e-mail: metalurgia@metalurgia.pl / www.metalurgia.pl

Registrační číslo / Registration Number

MK ČR E 18087

Mezinárodní standardní číslo / International Standard Serial Number

ISSN 0018-8069

Vydavatel / Publisher

OCELOT s.r.o.
Pohraniční 693/31, 706 02 Ostrava-Vítkovice
IČ: 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

Grafický redaktor / Graphic Editor

Ing. Dana Horáková
tel.: +420 777 047 666
e-mail: hutnickelisy@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 – Chairperson

prof. Ing. Markéta Tkadlečková, Ph.D.

VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, Česká republika

Členové / Members

Ing. Martin Balcar, Ph.D.
Ing. Pavol Beraxa, Ph.D.
Assoc. Prof. Dr. Christian Bernhard
prof. dr. hab. inž. Leszek Blacha
doc. Ing. Branislav Buľko, Ph.D.
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
prof. dr. hab. inž. Henryk Dyja
Ing. Henryk Huczala
prof. Ing. František Kavička, CSc.
Dr. Ing. Zdeněk Kuboň
Ing. Ludvík Martínek, Ph.D.
Ing. Josef Odehnal, Ph.D.
dr. hab. inž., prof. PŠ Mariola Saternus
prof. Ing. Josef Štetina, Ph.D.
Mgr. Daniel Urban
Dr. Ing. Ladislav Válek

ŽDAS, a.s., Žďár nad Sázavou, Česká republika
Výzkum Železáren Podbrezová, Slovenská republika
Montanuniversität Leoben, Rakousko
Politechnika Śląska, Katowice, Polsko
Technical University in Košice, Slovenská republika
VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, Česká republika
Politechnika Częstochowska, Częstochowa, Polsko
TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Trinec, Česká republika
Vysoké učení technické v Brně, Brno, Česká republika
MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. Ostrava, Česká republika
ŽDAS, a.s., Žďár nad Sázavou, Česká republika
Západočeská univerzita v Plzni, Česká republika
Politechnika Śląska, Katowice, Polsko
Vysoké učení technické v Brně, Brno, Česká republika
Ocelářská unie a.s. Praha, Česká republika
LIBERTY OSTRAVA a.s., Česká republika

Vydavatel uplatňuje tzv. Zpožděný otevřený přístup. Po dobu 12 měsíců od vydání aktuálního čísla vydavatel na webových stránkách časopisu zveřejňuje anotace jednotlivých článků (česká nebo slovenská a anglické verze). Po 12 měsících od vydání jsou zveřejněny na webových stránkách plné texty článků.

Časopis vychází 3× ročně. Cena jednotlivého čísla 200 Kč. K ceně se připočítává DPH. Roční předplatné (tištěného vydání) 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.

Etický kodex

Časopis Hutnické listy se při svém vydávání řídí etickým kodexem, který stanovuje pravidla pro publikaci příspěvků. To se týká jak posuzování autorských příspěvků, tak následného recenzního řízení. Jeho zněním jsou povinni se řídit autoři, recenzenti i redakce. (Celé znění etického kodexu je zveřejněno na www.hutnickelisty.cz)

© OCELOT s.r.o., 2022

Časopis je zařazen do databáze recenzovaných časopisů Publons.

The publisher uses the so-called delayed open access. For a period of 12 months from the publication of the current issue, the publisher publishes abstracts of individual articles (in Czech or Slovak, and English versions) on the journal website. The full text of the articles is published on the website after 12 months of publication.

The journal is published three times a year. Price of a single issue is CZK 200 without VAT. Net price of basic annual subscription (printed edition) 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 distributed electronically without written permission of the publisher.

Ethical Code

The Hutnické listy (Metallurgical Journal) is governed by an ethical code that sets out rules for the publication of papers. This concerns both the assessment of author's papers and the subsequent peer-review process. The authors, reviewers, and editors must follow its wording. (The full text of the ethical code is published on our website www.hutnickelisty.cz)

© OCELOT s.r.o., 2022

The journal is included in the database of peer-reviewed journals Publons.

Obsah / Content

Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D. Úvodník	4
---	---

Hlavní články (recenzovaná část) / Principal Papers (Peer-reviewed Part)

Recenzované vědecké články / Peer-reviewed Scientific Papers

Ing. Šárka Hermanová; Dr. Ing. Zdeněk Kuboň; Ing. Petr Čížek, Ph.D. Materiálové vlastnosti a creepová odolnost plechu z oceli AISI 316L vyrobeného aditivní technologií (3D tiskem) Material Properties and Creep Resistance of AISI 316L Plate Produced by Additive Technology (3D Printing)	6
doc. Ing. Karel Gryc, MBA, Ph.D.; doc. Ing. Ladislav Socha, MBA, Ph.D.; Ing. Roman Kubeš; Václav Sochacký; Ing. Kamil Koza; Ing. Jaromír Trobl Zajištění stabilní produkce tenkostěnných odlitků ze slitiny ZP0410 při implementaci využití vratného materiálu Ensuring Stable Production of Thin-walled Castings of Alloy ZP0410 during the Implementation of the Utilization of Returnable Material	14
prof. Ing. Jaroslav Purmenský, DrSc.; doc. Ing. Peter Bernasovský, Ph.D. Netradiční pohled na čistotu oceli Untraditional View on the Purity of Steel	20

Recenzované výzkumné články / Peer-reviewed Research Papers

Ing. Jiří Cibulka, Ph.D.; Ing. Marek Cienciala Studium solidifikačního chování oceli během plynulého odlévání pomocí teplotního modelu Study of the Solidification Process during Continuous Casting of Steel by means of Thermal Model	24
doc. Ing. Richard Fabík, Ph.D.; Ing. Tomáš Kubina, Ph.D.; Ing. Michal Sauer; prof. Ing. Ivo Schindler, CSc.; Ing. Stanislav Rusz, Ph.D. Fyzikální a matematická simulace spojitého válcování a ochlazování HSLA oceli Physical and Mathematical Simulation of Continuous Controlled Rolling and Cooling of HSLA Steel	32
doc. Ing. Ladislav Socha, MBA, Ph.D.; doc. Ing. Karel Gryc, MBA, Ph.D.; Ing. Kamil Koza; doc. Ing. Josef Odehnal, Ph.D.; Ing. Bc. Jana Sviželová, Ph.D.; Ing. Miroslav Chmiel; Ing. Petra Fronková Porovnání polévací metody a metody plněného profilu při výrobě litiny s kuličkovým grafitem v provozních podmínkách Comparison of the Pouring Method and Cored Wire Method in Production of Ductile Cast Iron under Operating Conditions	41
Ing. Ladislav Kander, Ph.D.; doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.; Ing. Jan Kander; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D. Development of the Structure and Properties of Aluminum Alloy EN AW 6082 after Severe Plastic Deformation Vývoj struktury a vlastností slitiny hliníku EN AW 6082 po extrémní plastické deformaci	48

Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.; Ing. Ondřej Kotásek; Petr Teplárek	53
Experimentální výzkum snižování obsahu škodlivých příměsových prvků z kovové taveniny v přetlaku argonu Experimental Research of Reducing the Content of Harmful Impurity Elements from Metal Melt in Argon Overpressure	

Ing. Ondřej Kotásek; Ing. Marek Dobiáš; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.; Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.	57
Numerická simulace odlévání a tuhnutí 1,6t ingotu z nástrojové oceli pomocí softwaru THERCAST Numerical Simulation of Casting and Solidification of 1,6t tool steel ingot in THERCAST Software	

Informační články / Informative Articles

Ing. Ivana Žižková	62
Strojírny a stavby Třinec, a.s. se podílely na dodávce dvou ocelových lávek a silničního mostu pro město Hlučín	

Maximus Akuh; Tim Nitsch; Guido Plicht; Felix Steinbach	64
Inteligentní dusíko-methanolová vstřikovací tryska pro nauhličování a kalicí atmosféry. Případová studie.	

Ing. Petr Matuszek, ředitel společnosti ENERGETIKA TŘINEC, a.s.	70
Energetika Třinec ukončila revizi vysokopecního plynojemu	

Zprávy z Ocelářské unie a.s. Praha / Information of Steel Union a.s. Praha

Meziroční porovnání měsíčních a postupných hutních výrob roku 2021 a 2022 v České republice Jiří Dufek	73
--	----

EUROPEAN GREEN DEAL

Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D.	76
------------------------------------	----

Ze života škol / Information on Activities of Universities

XXIX. International Scientific Conference „IRON AND STEELMAKING“ Modern Metallurgy	86
--	----

Aktuality v hutnictví / Newsreel in Metallurgy	88
---	----

Inzerce

- BRAINTRAS, s.r.o.
- Metalurgia - Polsko
- Messer Technogas s. r. o.
- Messe Düsseldorf GmbH

Úvodník

Vážení čtenáři Hutnických listů,

dostává se Vám do ruky poslední číslo roku 2022. Myslím si, že je vydařené a obsahuje mnoho informací z výzkumné oblasti, průmyslové sféry i problematiky "uhlíkové neutrality" a jejího řešení.

Dovolte mi, abych Vás seznámil s aktuální situací vydávání Hutnických listů. V letošním roce bylo velmi obtížné získávat relevantní příspěvky do Hutnických listů včetně zajištění financí. Jednoznačně se na této situaci podepsala energetická krize a zdražování, což se odrazilo v ochotě přispívat do Hutnických listů. Myslím si, že se nám však tuto nepříznivou situaci podařilo překonat, rok 2022 jsme zvládli a podmínky pro rok 2023 vypadají poměrně optimisticky. Chtěl bych touto cestou velmi poděkovat všem společnostem, vysokým školám i výzkumným organizacím, které se podílely na dodání příspěvků a reklam, nesmírně si toho vážím. Zároveň bych chtěl poděkovat za práci všem spolupracovníkům z redakční rady, kteří se podílejí na vydávání Hutnických listů.

Přesto jsme připravili, po dohodě dozorčí rady společnosti OCELOT s.r.o., která zajišťuje vydávání Hutnických listů, pro rok 2023 jednu významnou změnu. Vzhledem k současné situaci v tomto roce vyjdou pouze 2 čísla: č. 1-3/2023 a č. 4-6/2023. Předpokládáme, že obě čísla budou velmi obsáhlá. Chceme jít dál cestou odborného časopisu, který se bude zaměřovat na aktuální problematiku v oblasti metalurgie a materiálového inženýrství, a seznamovat naše čtenáře s nejnovějšími poznatky ve výzkumu a vývoji a s možností aplikovatelnosti výsledků v průmyslové praxi.

V letošním roce jsme ukončili spolupráci s panem Ing. Janem Počtou, CSc., který dlouhou dobu zastával funkci vedoucího a v posledních letech technického redaktora a s panem Ing. Borisem Škanderou, který se podílel na recenzi anglických textů. Jménem kolektivu Hutnických listů jim tímto chci poděkovat za práci pro Hutnické listy a přeji jim do dalších let hodně zdraví a spokojenosti.

Mám ještě jednu milou povinnost. Letos oslavil "osmdesátiny" pan prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., dr. h. c. Pan prof. Dobrovský byl dlouholetým děkanem Fakulty materiálově-technologické VŠB-Technické univerzity Ostrava. S redakcí časopisu Hutnické listy spolupracuje desítky let a významnou měrou přispívá k tomu, že se v dnešní složité době Hutnické listy vydávají. Pana profesora si nesmírně vážím pro jeho odborné znalosti, lidský, otevřený a kamarádský přístup. Za společníky společnosti OCELOT s.r.o. a její dozorčí radu včetně celého redakčního kolektivu Hutnických listů děkuji panu profesorovi za dosavadní práci pro časopis Hutnické listy a přeji mu do dalších let hodně zdraví a spokojenosti.

Na závěr mi dovolu, abych Vám popřál do nového roku 2023 hodně zdraví, štěstí, úspěchů a spokojenosti. Ať je ten nadcházející rok lepší než ten minulý.

Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D.
jednatel společnosti OCELOT s.r.o.

GIFA

METEC

**THERM
PROCESS**

NEWCAST

NI
worldwide

12–16 June 2023
Düsseldorf
Germany

The Bright World of Metals

Technologies Processes Applications Products

Go for Metallurgy!
The Bright World of Metals. The top event surrounding foundry technology, metal production and processing as well as thermo process technology. Technologies for a climate-friendly and sustainable, successful metal industry. ecoMetals and ecoMetals Trails – paths to decarbonisation + circular economy.

Compound synergy
Gateways for transfer of know-how: the technological forums at GIFA, METEC; THERMPROCESS and NEWCAST

See you in Düsseldorf!

www.tbwom.com

eco Metals
SUSTAINABLE PROCESSING SOLUTIONS

Informace pro návštěvníky,
prodej vstupenek, komplexní cestovní služby:
Veletřhy Brno, a. s. – Miroslav Kožnar – Výstaviště 1 – 603 00 Brno
Tel. +420 541 159 190 – GSM +420 602 594 810
mkoznar@bvz.cz

**Messe
Düsseldorf**

Recenzované vědecké články

Materiálové vlastnosti a creepová odolnost plechu z oceli AISI 316L vyrobeného aditivní technologií (3D tiskem)

Material Properties and Creep Resistance of AISI 316L Plate Produced by Additive Technology (3D Printing)

Ing. Šárka Hermanová; Dr. Ing. Zdeněk Kuboň; Ing. Petr Čížek, Ph.D.

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM, s.r.o., Pohraniční 31/639, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

Přestože se aditivní výroba (3D tisk) kovových materiálů velmi rychle vyvíjí, jde stále o relativně novou technologii a stále neexistuje dostatek informací zabývajících se chováním velkých součástí a/nebo produktů vyrobených 3D tiskem. Tato práce je proto zaměřena na srovnávací studium materiálových vlastností včetně odolnosti proti tečení bloku z oceli AISI 316L vyrobeného aditivní technologií a zkoušeného ve dvou alternativách (přímo po 3D tisku a po rozpouštěcím žíhání) ve srovnání s plechem vyrobeným konvenčním válcováním za tepla. Zkoušení mechanických a creepových vlastností bylo doplněno o rozbor mikrostruktury a fraktografickou analýzu lomových ploch. Společně s konvenční tahovou zkouškou byly pro hodnocení mechanických vlastností použity i penetrační SP zkoušky a výsledky obou metod byly navzájem srovnány. Výsledky provedených zkoušek prokázaly, že mechanická i creepová odolnost 3D tištěného bloku této oceli je vynikající a dobře srovnatelná s plechem válcovaným za tepla. Bylo také zjištěno, že 3D tištěná ocel má nižší plasticitu, což je výsledkem přítomnosti většího množství defektů ve struktuře 3D tištěného materiálu. Její struktura se tak přibližuje více svarovému kovu než tvářenému základnímu materiálu.

Klíčová slova: 3D tisk; technologie SLM; austenitická ocel; materiálové vlastnosti; creep; zkoušení malých vzorků

Although additive manufacturing (3D printing) of metallic materials is developing very quickly, it is still a relatively new technology and there is not enough information about the behaviour of large parts and/or real products produced by 3D printing. This work is focused on the study of the material properties, including creep resistance, of a block of AISI 316L steel produced by additive technology and tested in two states (in the as-printed state and after solution annealing) in comparison to a plate of the same steel produced by hot rolling. The testing of mechanical and creep properties was supplemented by the analysis of the microstructure and the fracture surfaces. Together with the conventional tensile tests, small punch tests were also used to evaluate the mechanical properties, and the results of both methods were compared. The results showed that the mechanical and creep resistance of the 3D printed block of this steel is excellent and compares well with the hot rolled plate. It was found that the 3D printed steel has lower plasticity, which is the result of presence of more defects in the structure of the 3D printed material and its microstructure is similar more to the weld metal than to the wrought base material.

Key words: 3D printing; SLM technology; austenitic steel; material properties; creep; small punch tests

Trojrozměrný (3D) tisk je relativně nová technologie aditivní výroby, při kterém vzniká výrobek vytvářením trojrozměrného objektu z digitálního souboru (CAD) nanášením materiálu ve vrstvách, které se vzájemně spojují např. lepením nebo tavením. Umožňuje tak vyrábět složité tvary, které nelze vyrobit konvenčními metodami. Tento způsob výroby byl nejdříve použit pro plasty a výrobu modelů, resp. prototypů. Historie procesu 3D tisku, která sahá do 80. let minulého století, je popsána například v [1-3]. Jednou ze dvou nejčastěji používaných technologií 3D tisku pro kovy je metoda tavení práškového kovu (Selective Laser Melting – SLM)

dle klasifikace ISO/ASTM 52900 [4], která využívá data z 3D CAD modelu virtuálně rozřezaného na velmi tenké 2D vrstvy. Pro každý takový řez je nejprve na podkladovou desku přesně nanesena rovnoměrná vrstva jemného práškového kovu, který je pak roztaven laserem. Tento postup se opakuje vrstvu po vrstvě, dokud není celý výrobek hotový. 3D tisk kovových materiálů je tak velmi perspektivní cestou, jak zefektivnit zejména výrobu tvarově složitých dílů při významné úspoře nákladů jak materiálových, tak i zpracovatelských. Než však bude možné zařadit tyto inovativní technologie, byť jen do malosériové výroby, musí být známy vlastnosti takto

vyrobených dílů a také musí být garantována jejich shoda s požadavky příslušných materiálových norem.

Protože hlavní výhoda technologie SLM spočívá ve výrobě malých a tvarově složitých výrobků, kdy vlastnosti materiálu nelze testovat standardizovanými zkušebními tělesy, je vhodné mít k dispozici i další možnosti studia mechanických vlastností buď v dodaném stavu, nebo i za provozu. Jedním ze způsobů, jak testovat součástky malých rozměrů, je metoda SPT (Small Punch Test) [5]. SPT je progresivní zkušební metoda miniaturních zkušebních vzorků a velmi často se používá například v jaderných elektrárnách a elektrárnách na fosilní paliva pro stanovení zbytkové životnosti jejich klíčových částí [6, 7]. K dispozici jsou rozsáhlé a dlouhodobé zkušenosti s jejím použitím u tvářených i litých ocelí a objevují se také informace o jejím využití i pro aditivně vyráběné (3D tištěné) materiály [8, 9].

Je všeobecně známo, že ocel vyráběná 3D tiskem obsahuje více či méně pórů, které mají významný vliv na její pevnost i lomové vlastnosti. Ocel vyráběná touto technologií má také speciální texturu s mikrostrukturou velmi podobnou svarům [10], proto jsou materiálové vlastnosti v různých směrech tisku odlišné [11], a to včetně creepu [12] a únavy [13], přičemž se udává zejména nižší životnost materiálů vyrobených 3D tiskem ve srovnání s konvenční výrobou. V literatuře je také mnoho informací o vlivu poréznosti, směru tisku, rychlosti a výkonu laseru na materiálové vlastnosti, které byly získány na záměrně touto technologií připravených zkušebních tělesech, ale jen málo o vlastnostech skutečných produktů. Je známo a prokázáno, že na mikrostrukturu a vlastnosti má vliv rychlost ochlazování spojená mimo jiné s odvodem tepla, který závisí také na

velikosti produktu. To je důvod, proč bylo rozhodnuto zkoumat rovněž dlouhodobé chování austenitické oceli na bloku vyrobeném SLM technologií a studovat rozdíl mezi záměrně vyrobenými vzorky a masivním blokem.

Tento článek shrnuje a porovnává materiálové vlastnosti bloku vyrobeného z oceli AISI 316L technologií SLM s plechem stejné jakosti válcovaným za tepla jak pomocí konvenčních zkušebních metod, tak i s využitím zkoušek SPT.

2. Experimentální materiál a postup

Pro účely materiálových analýz byl metodou SLM vyroben blok z austenitické korozivzdorné oceli AISI 316L s rozměrem tiskové základny (tloušťka x délka) 15 × 280 mm a výškou 170 mm. Blok byl vyroben v centru 3D tisku Protolab VŠB – TU Ostrava na zařízení Renishaw AM400 za použití prášku SS 316L-0407 téhož výrobce. Parametry SLM výroby byly: výkon laseru 200 W, tloušťka vrstvy 50 μm , rychlost skenování 650 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a pro výrobu byla použita šachovnicová strategie bez nosných prvků. Takto vyrobený blok byl rozřezán na dvě poloviny, první zůstala ve stavu po vytištění (dále označovaná jako 3D) a druhá (dále označovaná jako 3DS) byla podrobena rozpouštěcímu žihání v elektrické peci při teplotě 1050 °C s dobou výdrže 15 minut a následným ochlazením ve vodě. Srovnávacím zkušebním materiálem byl za tepla válcovaný plech z téže oceli a s podobnými rozměry jako 3D tištěný blok (tloušťka 16 mm). Plech byl dodán ve stavu po rozpouštěcím žihání u výrobce při teplotě 1050 °C s ochlazením ve vodě. Chemické složení obou zkušebních kusů je uvedeno v tab. 1 spolu s požadavky na ocel AISI 316L.

Tab. 1 Chemické složení testovaných výrobků (hm. %)

Tab. 1 Chemical composition of tested products (mass. %)

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	O	N
SLM	0,025	0,49	0,66	0,016	0,005	16,60	12,70	2,36	0,039	0,001	<0,001
Plech	0,019	1,85	0,26	0,037	0,0014	16,99	10,00	2,02	-	-	0,0298
316L	≤0,03	≤2,00	≤1,00	≤0,045	≤0,030	16,0-18,0	10,0-14,0	2,0-3,0	-	≤0,10	≤0,10

Z obou materiálů byla vyrobena zkušební tělesa a byly provedeny srovnávací materiálové analýzy zahrnující:

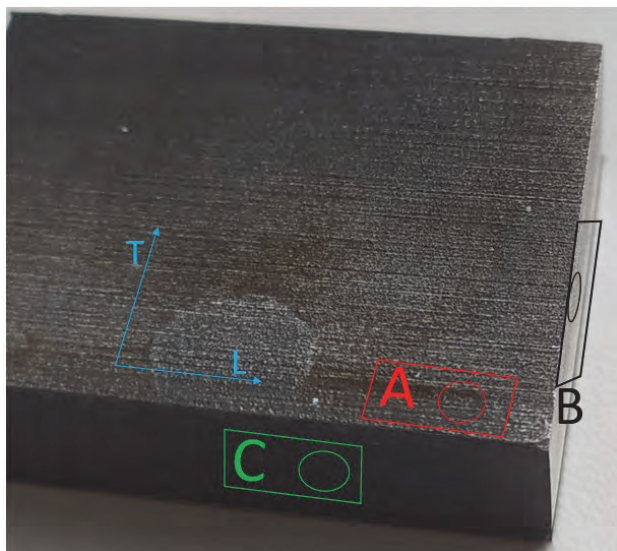
- zkoušku tahem při pokojové teplotě, zkoušky SPT, stanovení profilu tvrdosti HV30,
- zkoušky rázem v ohybu,
- analýzu mikrostruktury,
- analýzu substruktury zaměřenou na nalezení rozdílů v množství, velikosti a distribuci sekundárních částic mezi oběma vzorky,
- creepové zkoušky do lomu a srovnání mezí pevnosti při tečení
- fraktografickou analýzu lomových ploch zkoušek SPT a creepových zkoušek.

2.1 Analýza mechanických vlastností

Studium vlivu použité technologie na mechanické vlastnosti plechu, resp. 3D tištěného bloku, bylo provedeno konvenčními zkouškami tahem a také pomocí zkoušek SPT. Zkušební tělesa pro konvenční zkoušku tahem byla z 3D i 3DS tištěného bloku odebrána v rovnoběžném (L) a kolmém (T) směru k základně tisku, obr. 1. V případě plechu byly vyrobeny vzorky s orientací v podélném (L) a příčném (T) směru ke směru válcování. Zkušební vzorky SPT byly ve tvaru disku o průměru 8 mm a tloušťce 0, mm připraveny z každého směru a obou stavů tištěného materiálu čili 3D i 3DS, z planžet odebraných rovnoběžně s povrchem (A), z příčného směru (B) a podélného směru (C), obr. 1. Základna tisku je označena písmenem C, výška

tisku T a směr tisku L. SPT vzorky plechu pak byly připraveny pouze z povrchu (A), jak uvádí zkušební norma [5]. Bylo připraveno a testováno pět vzorků SPT pro stejný stav a směr, aby se získala rovněž informace o rozptylu hodnot.

Výsledky tahových zkoušek (mez kluzu – $R_{p0,2}$, mez pevnosti – R_m , tažnost – A, kontrakce – Z) a zkoušek rázem v ohybu (nárazová práce – KV) provedených na konvenčních zkušebních tělesech při pokojové teplotě jsou uvedeny v tab. 2.



Obr. 1 Orientace odběru těles SPT a těles pro zkoušku tahem z 3D a 3DS desky

Fig. 1 Orientation of specimens for SPT and tensile test from 3D and 3DS block

Tab. 2 Výsledky zkoušek tahem a rázem v ohybu při pokojové teplotě
Tab. 2 Results of tensile and Charpy-V tests at room temperature

Vzorek	Směr	$R_{p0,2}$	R_m	A	Z	KV
		[MPa]		[%]		[J]
3D	L	557	690	46,5	59,5	82
	T	473	591	22,0	35,0	67
3DS	L	373	621	46,5	46,5	91
	T	352	532	22,5	30,5	-
Plech	L	259	644	79,0	80,5	394
	T	258	643	76,0	81,5	298

Zásadní rozdíl mezi 3D tištěným a za tepla válcovaným materiálem je v hodnotách meze kluzu, která je u vzorku 3D dvakrát vyšší ve srovnání s plechem válcovaným za tepla a u vzorku 3DS vyšší o více než 100 MPa. Rozdíl v hodnotách meze pevnosti v tahu je naopak zcela nepatrný. Zatímco materiálové vlastnosti za tepla válcovaného plechu jsou prakticky totožné bez ohledu na směr zkoušení, dochází u 3D tištěného bloku v obou stavech tepelného zpracování k poklesu meze kluzu i pevnosti v tahu v příčném směru (T) ve srovnání s podélným směrem (L). Výrazný pokles byl zaznamenán také u plasticity a vrubové houževnatosti, kdy tažnost 3D

tištěného materiálu byla jen asi poloviční v podélném směru a dokonce jen čtvrtinová v příčném směru oproti za tepla válcovanému plechu. Rozpouštěcí žhánění pak dále snížilo mechanické vlastnosti (mez kluzu i pevnost v tahu) a dokonce snížilo i hodnotu tažnosti a kontrakce. Výsledky zkoušek rázem v ohybu také ukazují, že 3D tištěný materiál dosáhl pouze 30 % hodnot absorbované energie za tepla válcovaného plechu, a dokonce nedošlo téměř k žádnému zvýšení vrubové houževnatosti po rozpouštěcím žhánění 3D tištěného bloku.

Výsledky zkoušek SPT pak potvrdily vyšší mez kluzu a velmi dobře srovnatelnou pevnost v tahu u 3D tištěného bloku ve srovnání se za tepla válcovaným plechem, viz tab. 3. Pokles houževnatosti u 3D tištěného materiálu oproti desce je asi 22 %, křivky SPT i jejich výsledky vykazují navíc velký rozptyl výsledků. Nicméně z pohledu praktického uplatnění této zkušební metody na reálných výrobcích je pozitivním zjištěním to, že nejmenší rozptyl výsledků byl zjištěn u vzorků orientovaných rovnoběžně s povrchem desky (směr A), tedy u vzorků se stejnou orientací, jakou mají vzorky odebrané in situ z povrchu reálné součásti a třeba i za provozu.

Tab. 3 Výsledky zkoušek SPT při pokojové teplotě
Tab. 3 Results of SPT tests at room temperature

Vzorek	3D			3DS		Plech
	A	B	C	A	C	
$R_{p0,2}$ [MPa]	602	578	595	436	413	283
R_m [MPa]	798	788	776	723	723	637

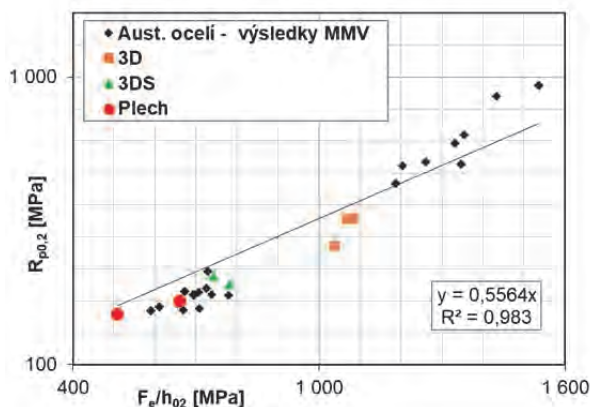
Pevnostní charakteristiky získané z SPT zkoušek jsou stanoveny na základě korelace mezi výsledky konvenčních tahových zkoušek a SPT zkoušek malých vzorků podle rovnic (1) a (2):

$$R_{p0,2} = \alpha \cdot \frac{F_e}{h_0^2} = 0.5564 \cdot \frac{F_e}{h_0^2} \text{ [MPa]} \quad (1),$$

$$R_m = \beta \cdot \frac{F_m}{h_0 \cdot d_m} = 0.4089 \cdot \frac{F_m}{h_0 \cdot d_m} \text{ [MPa]} \quad (2),$$

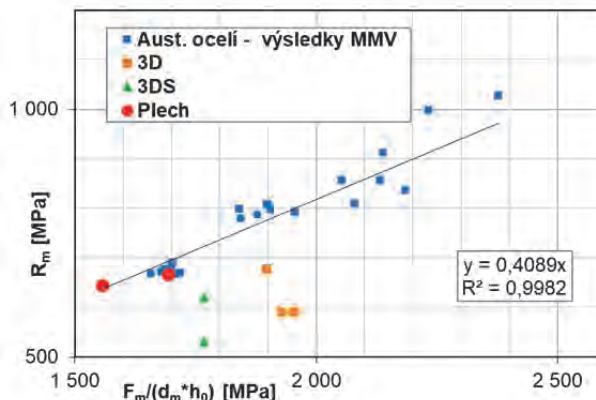
kde $R_{p0,2}$ a R_m jsou mez kluzu a pevnost v tahu, h_0 je přesně změřená tloušťka každého vzorku před zkouškou, F_e je síla odpovídající přechodu z elastické do plastické oblasti deformace, F_m je maximální síla při SPT zkoušce a d_m představuje posunutí hrotu razníku, které odpovídá síle F_m . α a β jsou korelační koeficienty.

Na obr. 2 jsou ukázány příslušné korelace mezi tahovými a SPT zkouškami trubek z austenitických korozivzdorné oceli vytvořené ve společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. (MMV) a ty jsou doplněny o výsledky zkoušených vzorků. Z obrázků je zřejmé, že tyto výsledky leží pod příslušnými korelacemi, což znamená, že při použití této korelace dochází bohužel k silnému nadhodnocení reálných výsledků, jak je ostatně patrné i ze srovnání dat v tab. 2 a 3.



Obr. 2a Korelace výsledků SPT a konvenčních tahových zkoušek pro austenitické oceli; závislost pro mez kluzu

Fig. 2a Correlation between SPT and conventional tensile test for austenitic stainless steel – chart for yield strength



Obr. 2b Korelace výsledků SPT a konvenčních tahových zkoušek pro austenitické oceli - závislost pro mez pevnosti

Fig. 2b Correlation between SPT and conventional tensile test for austenitic stainless steel – chart for tensile strength

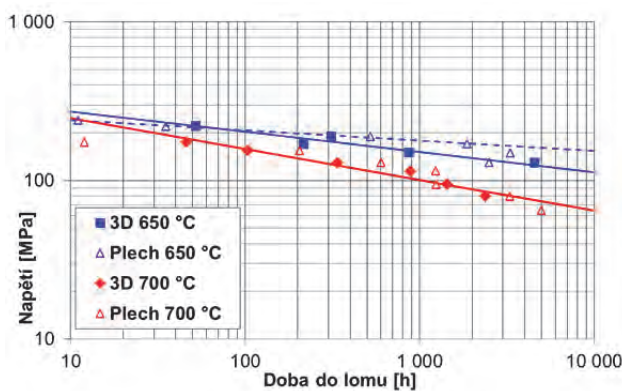
2.2 Výsledky analýzy creepových zkoušek do lomu

Srovnání creepové odolnosti 3D tištěného bloku (ve stavu as-printed) a za tepla válcovaného plechu bylo provedeno creepovými zkouškami do lomu při 650 a 700 °C a jejich výsledky jsou vyneseny na obr. 3 jako napětíová závislost doby do lomu, kterou lze popsat Nortonovou rovnicí ve tvaru:

$$t_r = A_r \cdot \sigma^{-n_r} \quad (3),$$

kde A_r a n_r jsou teplotně závislé konstanty

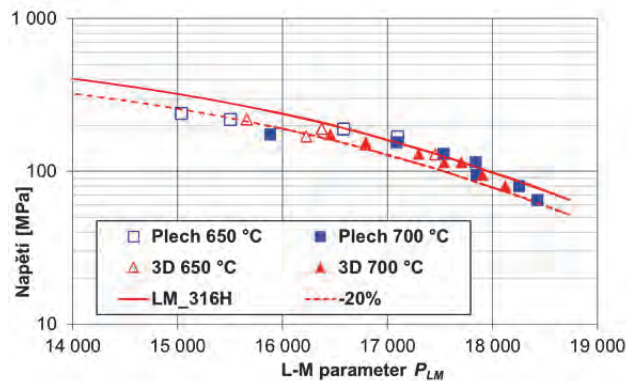
Bez ohledu na malou závislost napětí na době do lomu při 650 °C u válcovaného plechu (obr. 3 modrá přerušovaná čára), která může být způsobena pouze omezeným rozsahem experimentálních dat a relativně krátkými dobami do lomu ukončených zkoušek, jsou výsledky creepových zkoušek do lomu obou materiálů velmi dobře srovnatelné, pro teplotu 700 °C se téměř neliší (v obr. 3 – červená čára pro oba materiály).



Obr. 3 Srovnání výsledků creepových zkoušek do lomu 3D tištěného bloku a za tepla válcovaného plechu, čáry odpovídají Nortonovým rovnicím

Fig. 3 Comparison of stress rupture tests results for hot rolled plate and 3D block – the lines representing corresponding Norton equations

Srovnání ukazuje, že výsledky creepových zkoušek do lomu, jakkoli jsou jen relativně krátkodobé a bez ohledu na výše uvedené rozdíly v napětíové závislosti doby do lomu, leží v rozmezí mezi střední hodnotou (plná čára na obr. 4) a -20 % toleranční mezí (přerušovaná čára na obr. 4) oceli AISI 316H. Přestože získané výsledky zatím neumožňují spolehlivě odhadnout meze pevnosti při tečení ani za 10 000 hodin, je vidět, že 3D tištěný blok má poměrně dobré vyhlídky na dosažení creepové odolnosti odpovídající za tepla válcovanému plechu.



Obr. 4 Srovnání výsledků creepových zkoušek do lomu 3D tištěného bloku a plechu z oceli AISI 316L se střední hodnotou meze pevnosti při tečení a 20% tolerančním pásmem oceli AISI 316H

Fig. 4 Comparison of the results of stress rupture tests of the 3D-printed block and plate from AISI 316 L steel with the mean value and 20% tolerance limit of creep rupture stress (CRS) for AISI 316H steel

Aby bylo možné oba testované materiály porovnat a výsledky napětíových lomových zkoušek konfrontovat také s údaji uvedenými v materiálové normě oceli AISI 316H, byla tato data také přepočtena pomocí Larson-Millerova parametru, který umožňuje kombinovat teplotu a dobu do lomu ve tvaru:

$$P_{LM} = T \cdot [C + \log(t)] \quad (4),$$

kde T je teplota v Kelvinech a t doba do lomu v hodinách. Hodnota Larson-Millerova parametru ($C = 15,2$) byla

vypočtena metodou nejmenších čtverců ze středních hodnot meze pevnosti při tečení uvedených v materiálové normě pro ocel X6CrNiMo17-13-2 (AISI 316H).

2.2 Výsledky analýzy mikrostruktury creepových zkoušek do lomu

Materiálové vlastnosti, ale zejména houževnatost a plasticita, vždy odráží stav mikrostruktury a přítomnost defektů v ní. Také v případě creepových zkoušek je zajímavé posoudit, jak technologie 3D tisku ovlivní charakter lomu a jeho průběh. Proto byla provedena srovnávací metalografická a fraktografická analýza vždy jedné creepové zkoušky z obou sérií se stejnými parametry zkoušení (tab. 4).

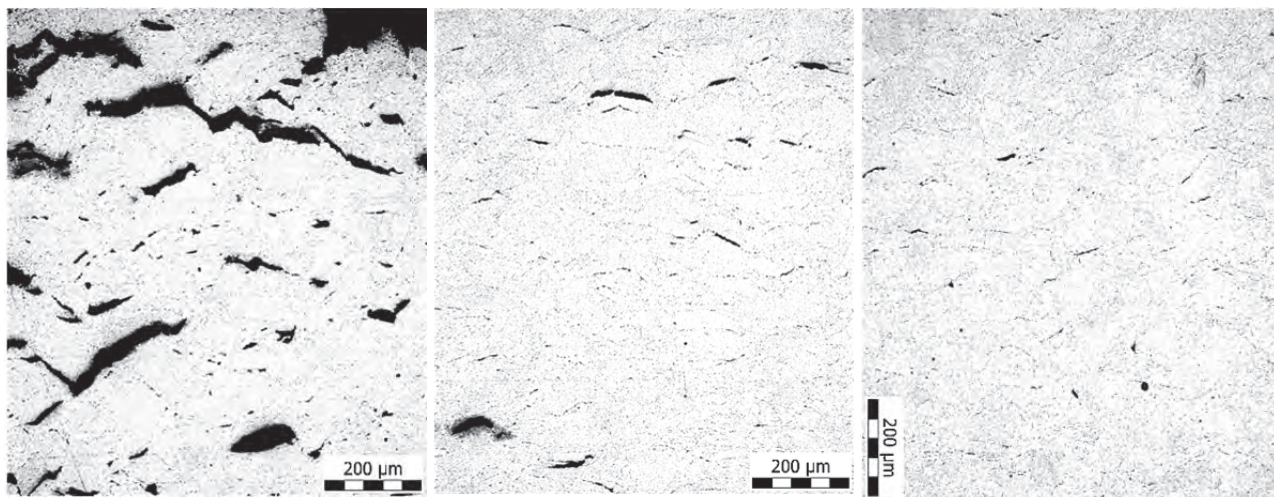
Cílem metalografické analýzy bylo posoudit rozsah a rovnoměrnost creepového poškození, v případě analýzy fraktografické pak hlavně výskyt tiskových defektů na lomové ploše a jejich vazby na creepové poškození. Těsně pod lomovou čarou se u 3D tištěného materiálu nacházejí četné spojené mikrotřhliny, jejich hustota

a velikost však s rostoucí vzdáleností od lomu klesá (obr. 5), ovšem i tam jsou tyto defekty významně četnější a větší ve srovnání s tvářeným plechem (obr. 6). Oba materiály se ovšem lišily i v rozložení částic karbidů a absencí δ -feritu u 3D tištěného materiálu, obr. 7. Podobný rozdíl byl také zjištěn u lomové plochy obou zkoušek, kdy v případě tvářeného plechu převládá výskyt transkrystalických tvárných hřebenů (obr. 8), kdežto 3D tištěný blok vykazoval nejen větší podíl interkrystalického lomu, ale zároveň se na lomové ploše nacházely kuličky nenataveného kovového prášku (obr. 9).

Tab. 4 Parametry creepových zkoušek pro detailní mikrostrukturní analýzu

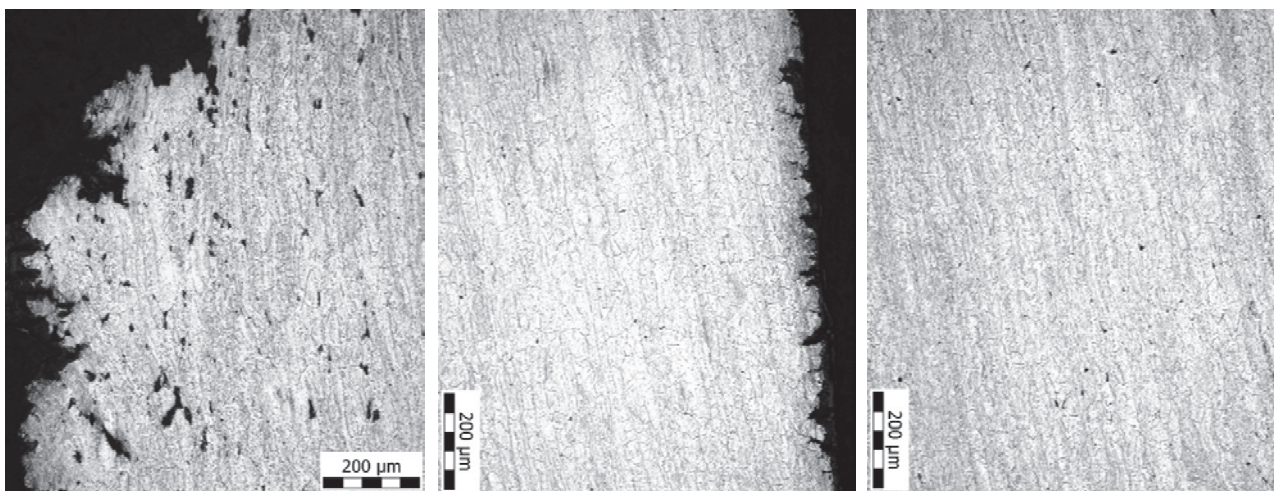
Tab. 4 Parameters of stress rupture tests for detailed structural analysis

Vzorek	Teplota [°C]	Napětí [MPa]	Doba do lomu [h]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]
Plech	700	80	3288	44.8	66.1
3D	700	80	2384	20.2	10.8



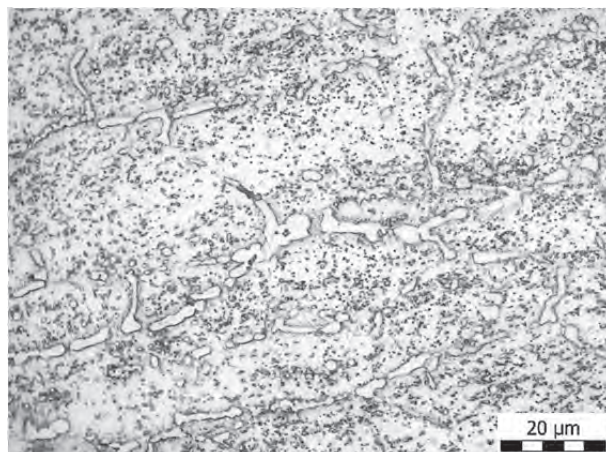
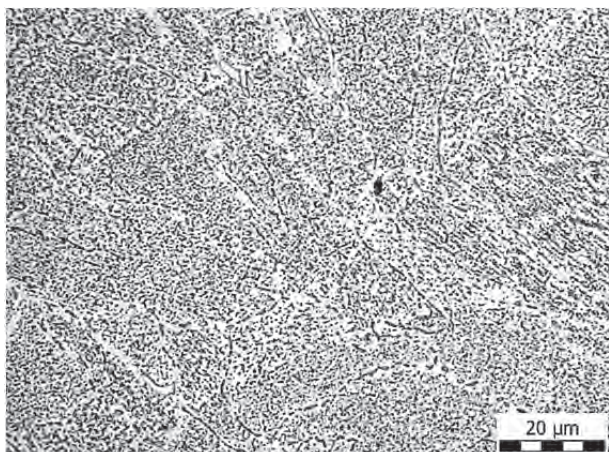
Obr. 5 Creepový lom tělesa zkoušky z bloku vyrobeného 3D tiskem ve vzdálenosti 0, 10 a 15 mm pod lomovou čarou

Fig. 5 Creep fracture of test specimen of the block produced by 3D printing at the fracture line and at 10 and 15 mm under it

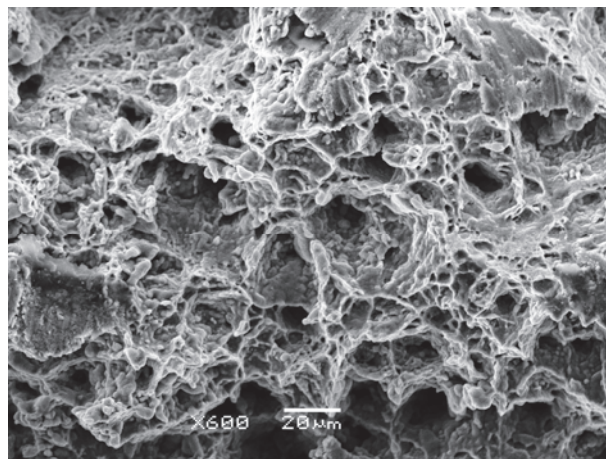
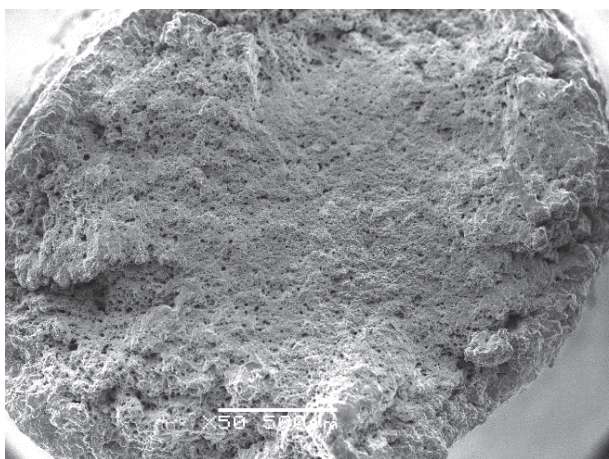


Obr. 6 Creepový lom tělesa zkoušky z válcovaného plechu (u lomové čáry a 10, resp. 15 mm pod ní)

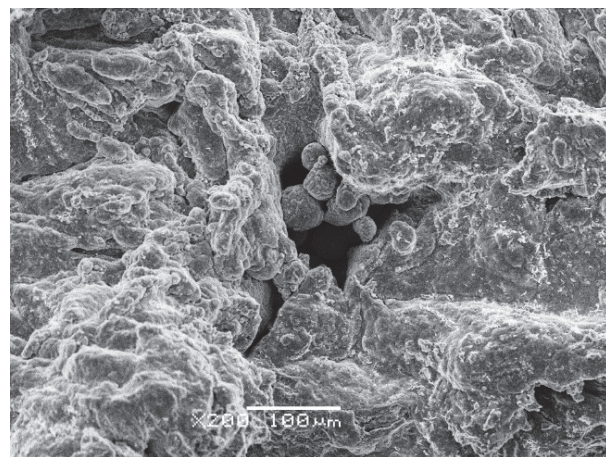
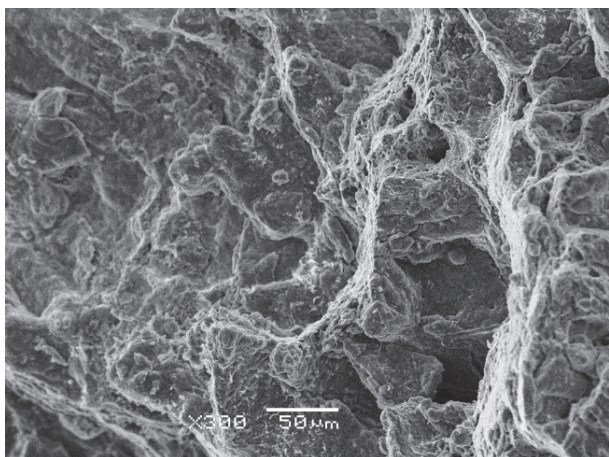
Fig. 6 Creep fracture of test specimen of the hot rolled plate (at the fracture line and at 10 and 15 mm under it)



Obr. 7 Detail mikrostruktury creepových zkoušek: vlevo - 3D tištěný materiál, vpravo – válcovaný plech
Fig. 7 Detail of microstructure: left - 3D printed block, right – hot rolled plate



Obr. 8 Lomová plocha creepové zkoušky z válcovaného plechu, celkový pohled – vlevo, detail jamek – vpravo
Fig. 8 Fracture surface of creep test specimen from hot rolled plate, overview – left, detail of dimples – right



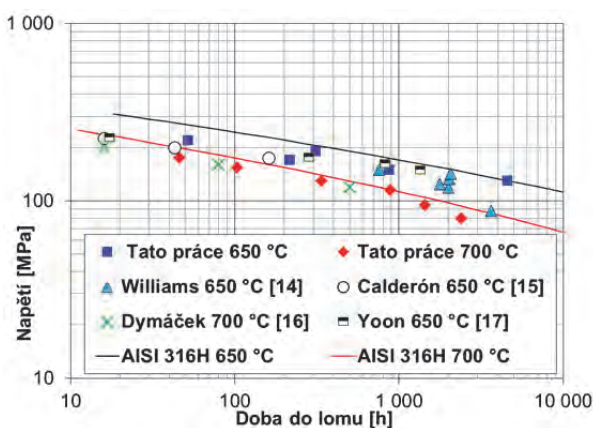
Obr. 9 Lomová plocha creepové zkoušky z 3D tištěné desky, kombinace lomů – vlevo, kuličky neroztaveného prášku – vpravo
Fig. 9 Fracture surface of creep test specimen of 3D printed steel, combination of fracture – left, balls of unmolten powder – right

3. Diskuze výsledků

Výsledky mechanických zkoušek i zkoušek SPT potvrdily, že 3D tištěný materiál má vyšší mez kluzu při srovnatelné mezi pevnosti v tahu jako za tepla válcovaný plech ze stejné oceli, oproti ní má ale výrazně nižší

plasticitu a lomovou houževnatost. Takové chování je důsledkem technologie výroby 3D tiskem, který se vyznačuje speciální strukturou, vypadající jako rybí šupiny, které jsou tvořeny malými částčkami roztaveného kovu a které jsou uspořádané do tavných pásů ohraničených kolumnárními zrn. Nízká plasticita

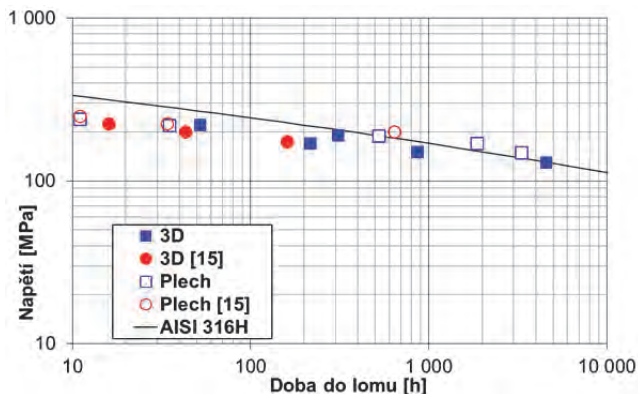
3D tištěných materiálů je pak způsobena četnými defekty, zejména póry a kuličkami neroztaveného prášku. Tato speciální kombinace vlastností materiálu a mikrostruktury je typickým znakem materiálů vyrobených 3D tiskem [11]. Defekty v mikrostruktuře překonaly v našem případě u 3D tištěného bloku pozitivní vliv jemného zrna a přes několikanásobně menší velikost důlků na lomové ploše vedly k poklesu plasticity jak při tahové, tak i creepové zkoušce. Výsledky creepových zkoušek jsou pak dobře srovnatelné s publikovanými údaji a zároveň se blíží střední hodnotě meze pevnosti při tečení materiálů normy pro ocel AISI 316H, která je nejbližším zárupevným ekvivalentem k AISI 316L.



Obr. 10 Porovnání závislosti napětí – doba do lomu pro 3D tištěnou ocel 316L, čáry jsou střední hodnoty meze pevnosti při tečení oceli AISI 316H

Fig. 10 Comparison of stress–time to rupture dependence for 3D-printed steel 316L, lines represent the mean CRS of AISI 316H steel

Všechna experimentální data uvedená na obr. 10 byla získána na zkušebních tělesech, která byla odebrána kolmo k rovině tisku (PB) a získané výsledky ukazují, že odolnost proti tečení 3D tištěného materiálu není negativně ovlivněna velikostí vzorku/výrobku. Protože jak dislokační, tak i difúzní creep závisí na difúzi atomů a hranice zrn představují tzv. kanály vysoké difuzivity, je jasné, že rychlost tečení a recipročně také doba do lomu budou silně záviset na velikosti zrna; čím menší bude velikost zrna, tím větší bude podíl hranic zrn, a tedy i rychlost difúze a creepu. Kolumnární zrna rostou při tisku ve směru tisku. Vertikálně orientované zkušební vzorky jsou zatěžovány rovnoběžně se směrem jejich růstu a maximální hlavní napětí je tedy rovnoběžné s hranicemi zrn. V tomto případě je velikost zrna ve směru zatěžování relativně velká a difúzní dráhy delší. Vertikálně orientované vzorky by tak měly mít delší dobu do lomu ve srovnání se vzorky horizontálními [14] a mohly by mít proto odolnost proti tečení nejvíce podobnou tvářenému materiálu. Zdá se, že výsledky Calderóna [15] a této práce to potvrzují, alespoň pro dobu do lomu do 10 000 hodin, obr. 11. Rozdíl mezi 3D tištěným a válcovaným materiálem ale jinak dobře zapadá do obvyklého rozptylového pásma výsledků zkoušek tečení, a dokonce se blíží střední hodnotě pro ocel AISI 316H.



Obr. 11 Závislost napětí–doba do lomu pro plech a 3D tištěnou ocel AISI 316L při 650 °C

Fig. 11 Comparison of stress–time to rupture dependence for 3D-printed steel 316L at 650 °C

4. Závěr

Komplexní analýza materiálových vlastností a struktury bloku z oceli AISI 316L vyrobeného pomocí metody 3D tisku prokázala vcelku dobrou shodu jak s referenčním za tepla válcovaným plechem z téže oceli, tak i s požadavky, které jsou na tuto jakost oceli kladeny. Dobrá shoda s vlastnostmi referenčního plechu a požadavky, které jsou na tuto jakost oceli kladeny byla dosažena navzdory skutečnosti, že se v její struktuře vyskytují četné defekty, které mají původ právě ve specifickém způsobu výroby. V případě creepových vlastností se plně uplatnění těchto strukturních defektů a nehomogenit zřejmě projeví až po delší době zkoušení, kdy se budou ve větší míře uplatňovat degradační procesy spojené s hranicemi zrn.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci Institucionální podpory dlouhodobého a koncepčního rozvoje výzkumné organizace v roce 2022, kterou poskytlo Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky.

Literatura

- [1] GUO, N. and LEU, M. C. Additive Manufacturing: Technology, Applications and Research Needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8 (2013).
- [2] ATTARAN, M. The rise of 3D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional, *Business Horizons*, 60 (2017), 677-688.
- [3] GU D. D., MEINERS, W., WISSENBAACH, K. and POPRAWA, R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms, *International Materials Reviews*, 57 (2012) 3, 133-164.
- [4] ISO/ASTM 52900 Additive manufacturing - General principles – Terminology, August 2017, ISO technical committees, Geneva, Switzerland.
- [5] ČSN EN 10371. Kovové materiály - Metoda penetrační SP zkoušky. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2021.
- [6] LUCON, E., BENZIG, J. and HRABE, N. Testing of Small-Sized Specimens. *Comprehensive Materials Processing*, 1 (2014), 135-163.

- [7] HOLMSTRÖM, S. et al. Creep strength and minimum strain rate estimation from Small Punch Creep tests. *Materials Science and Engineering*. 731 (2018), 161-172.
- [8] TORRES, J. and GORDON, A. Mechanics of the small punch test: a review and qualification of additive manufacturing materials, *Journal of Materials Science*, 2021, pp. 56. 1-38.
- [9] WANG, L. Y., et al. Small punch creep performance of heterogeneous microstructure dominated Inconel 718 fabricated by selective laser melting, *Materials & Design*, 195 (2020), pp. 109042.
- [10] CHOO, H., SHAMA, K.-L., BOHLING, J., NGOA, A., XIAO, X., RENB, Y., DEPOND, F. D., MATTHEWS, J. M. and GARLEA, E. Effect of laser power on defect, texture, and microstructure of a laser powder bed fusion processed 316L stainless steel, *Materials and Design*, 164 (2019), pp. 107534.
- [11] ZHOU, B., XU, P., LI, W., LIANG, Y. and LIANG, Y. Microstructure and Anisotropy of the Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting. *Metals*. 11 (2021) 775.
- [12] DAO, V. H., YU, J. M. and YOON, K. B. Anisotropic creep behaviour of stainless steel produced by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 796 (2020), pp. 140040.
- [13] SURYAWANSHI, J., PRASHANTH, K.G. and RAMAMURTY, U. Tensile, fracture, and fatigue crack growth properties of a 3D printed maraging steel through selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*, 725 (2017), pp. 355-364.
- [14] WILLIAMS, R., AL-LAMI, J., HOOPER, P., PHAM, M.S. and DAVIES, C.M. Creep deformation and failure properties of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion under multiaxial loading conditions. *Additive Manufacturing*, (2020), 101706. 10.1016/j.addma.2020.101706.
- [15] CALDERÓN, A., et al. Creep and creep damage behavior of stainless steel 316L manufactured by laser powder bed fusion. *Materials Science & Engineering A*. 830 (2022). pp. 142223.
- [16] DYMÁČEK, P., KLOC, L., GABRIEL, D., MASÁK, J., PAGÁČ, M. and HALAMA, R. Creep Behaviour of 316L Stainless Steel Prepared by 3D Printing, In *58th International Conference on Experimental Stress Analysis – EAN2020*, October 19–22, 2020, online, Czech Republic
- [17] YOON, K.B., DAO, V.H. and YU, J.M. Effects of Build Direction on Tensile and Creep Properties of 316L Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43 (2020) 11, 2623-2636.

Huť spouští do sítě první dvě fotovoltaické elektrárny

trz.cz, tisková zpráva 23. 11. 2022

Třinecké železářny spolu s dceřinou společností Energetika Třinec budou od prosince 2022 vyrábět elektrickou energii ze slunce ve dvou fotovoltaických elektrárnách.

První pokryla plochu odpovídající zhruba polovině fotbalového hřiště na hale v areálu hutě. Druhá jde do chodu v těchto dnech na hale odloučeného provozu Tažirna oceli ve Starém Městě na Uherskohradištsku.

Třinecká elektrárna s instalovaným výkonem 350 kWp, což za ideálních podmínek odpovídá roční výrobě přesahující 330 000 kWh, bude sluneční energii zachycovat na 760 panelů umístěných na střeše rozměru 3333 m². Investice firmu vyšla na 12 milionů korun, bezmála 3 miliony pokryje dotace ministerstva financí.

„Zelená energie z našich solárních panelů by v Třinci měla pokrýt více než polovinu spotřeby elektřiny pro výrobu horké vody pro vytápění,“ upřesňuje ředitel Energetiky Třinec. Energetika Třinec zajišťuje vytápění pro zhruba 9000 domácností, pro školy, nemocnice a další zařízení. Jde o teplo vyráběné z kombinované výroby elektřiny a tepla, kde část paliva pochází z výroby oceli.

Obdobně bude sloužit energie vyrobená ze slunce v areálu odloučeného provozu ve Starém Městě. Hala by měla v ideálním případě energii ze slunečního záření v předpokládaném objemu 230 000 kWh ročně využít pro napájení pomocných zařízení. Přebytky vyrobené elektrické energie je možno posílat do sítě.

V Tažírně oceli fotovoltaické panely pokryly 2500 m² plochy střechy nové výrobní haly, kde jsou umístěny nové návazné technologie loupání a broušení. Výše investice nepřesáhla šest milionů korun, dotace pokryla náklady ve výši dvou milionů.

Není to jediný zdroj zelené energie, kterou huť pro snížení uhlíkové stopy využívá. Už od roku 2020 nakupuje energii z větrných, vodních či solárních elektráren pro osvětlení i provoz klimatizací veškerých administrativních budov v Třineckých železářnách. Stejně tak je na zelenou energii celoročně provozována chemická úprava vody. Na kompenzaci emisí CO₂ obě firmy pracují i v dalších oblastech, část z nich cílí na oblast energetiky. Při výrobě elektřiny například firma Energetika Třinec nahradila část paliva biomasou.

Zajištění stabilní produkce tenkostěnných odlitků ze slitiny ZP0410 při implementaci využití vratného materiálu

Ensuring Stable Production of Thin-walled Castings of Alloy ZP0410 during the Implementation of the Utilization of Returnable Material

doc. Ing. Karel Gryc, MBA, Ph.D.¹; doc. Ing. Ladislav Socha, MBA, Ph.D.¹; Ing. Roman Kubeš²; Václav Sochacký²; Ing. Kamil Koza^{1,3}; Ing. Jaromír Trobl²

¹ Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, Okružní 517/10, 370 01 České Budějovice, Česká republika

² GD Druckguss s.r.o., Radomilická 1244, 389 01 Vodňany, Česká republika

³ Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 22, 301 00 Plzeň, Česká republika

Nejen současná složitá situace na trhu se surovinami a energiemi, ale rovněž dlouhodobý trend založený na strategii trvalé udržitelnosti společnosti vytváří logický tlak na zvyšování materiálové a energické efektivity ve všech oborech lidské činnosti. Významných úspor je samozřejmě možné dosáhnout ve výrobních procesech. Tento příspěvek navazuje na předcházející publikace věnované zajištění stabilní produkce silnostěnných odlitků ze slitiny ZP0410 při využití vlastního vratného materiálu. Pozornost však byla přesunuta na náročnější produkci tenkostěnných odlitků s typickou tloušťkou stěn v rozsahu od 0,4 do 1,2 mm. Jsou shrnuty poznatky zjištěné při sledování chemického složení taveniny v udržovacích pecích licích strojů a následném kvalitativním a kvantitativním hodnocení vnitřní kvality výpadů odlitků pomocí výpočetní tomografie (CT). Bylo prokázáno, že zvolený poměr (2 díly) primární suroviny (ZL0410) k 1 dílu vlastního vratného materiálu (ZP0410) nemá negativní dopad na kvalitu tenkostěnných odlitků.

Klíčová slova: zinkové slitiny; tavení; recyklace; vratný materiál; odlitky; chemické složení; výpočetní tomografie

The current complex situation in the market for raw materials and energy and the long-term trend based on the company's strategy of permanent sustainability creates a logical pressure to increase material and energy efficiency in all fields of human activity. Of course, significant savings can be achieved in production processes. This contribution follows from previous publications dedicated to ensuring the stable production of thick-walled castings from the ZP0410 alloy when using its own returnable material. However, attention was shifted to the more demanding production of thin-walled castings with a typical wall thickness ranging from 0.4 to 1.2 mm. The findings obtained during monitoring the chemical composition of the melt in the maintenance furnaces of casting machines and the subsequent qualitative and quantitative evaluation of the internal quality of the castings with the help of computed tomography (CT) are summarized. It has been proven that the selected ratio (2 parts) of primary raw material (ZL0410) to 1 part of own returnable material (ZP0410) does not hurt the quality of thin-walled castings.

Key words: zinc alloys; melting; recycling; returnable material; castings; chemical composition; computed tomography

V souladu s běžnou praxí probíhá i při výzkumně-vývojové činnosti v oblasti studia procesů možnosti využití vlastního vratného materiálu slitiny ZP0410 také neustálé sledování současného stavu poznání. Bohužel je nutné konstatovat, že autorskému kolektivu nejsou známy takové další publikační aktivity, na které by bylo možné v souvislosti s předmětem zájmu odkázat. Doložení nedostatku souvisejících publikací bylo provedeno již v příspěvcích [1,2,3]. V oblasti, která se alespoň částečně dotýká problematiky zinkových slitin je možné zmínit např. [4-20]. Problematika využití výpočetní tomografie, která byla aplikovaná na studium vad zinkových slitin je pak obsažena v příspěvku [21].

Zde předkládaný příspěvek prezentuje část z finálního stavu nových poznatků, kterých bylo dosaženo v rámci řešení projektu TH04020055 podpořeného TAČR v rámci programu EPSILON. V prvním a druhém roce

řešení projektu byla pozornost zaměřena na studium možnosti uplatnění vlastního vratného materiálu ZP0410 [22] při výrobě silnostěnných odlitků. Výsledky těchto výzkumně-vývojových aktivit byly prezentovány v těchto příspěvcích [1,2] a vedly k vyvinutí ověřené technologie, která umožnila začít využívat vlastní vratný materiál ZP0410 v poměru 1 dílu vlastního vratného materiálu ke 2 dílům primární slitiny ZL0410 [23] při jejich výrobě, aniž by došlo k negativním dopadům na kvalitu produkce.

V následujících kapitolách prezentované výsledky navazují na příspěvek [3], kde již byla pozornost zaměřena na tenkostěnné odlitky. Technologie výroby tenkostěnných odlitků pomocí tlakového lití vyžaduje zajištění mnohem vyšší stability technologických parametrů. Například je nutné udržovat lící formy předežhřáté na vyšší teploty, zajistit rychlejší proces

plnění kavit ve formě. Tím ale zároveň dochází k větší zátěži licího stroje. Z toho důvodu byla tenkostěnným odlitkům věnována pozornost až po zajištění technologie tlakového lití silnostěnných odlitků. Ke konci řešení projektu (4.Q 2022) pak došlo k úspěšnému dosažení ověřené technologie i pro tenkostěnné odlitky. Cílem tohoto příspěvku je prokázat, že zvolený a provozně prověřený způsob recyklace vlastního vratného zinkového odpadu nemá žádný negativní dopad na chemické složení taveniny a že je ji možné využít v průmyslových podmínkách tlakového lití i tenkostěnných odlitků zinkové slitiny ZP0410.

Provozní experimenty

Podobně jako v případě silnostěnných odlitků [1, 2] při studiu výroby tenkostěnných odlitků s typickou tloušťkou stěn v rozsahu od 0,4 do 1,2 mm byla tavenina připravována v předtavnovací peci MELTEC ZTF 700 B, kdy se taví vstupní materiály obsahující primární surovinu ZL0410 (dva hmotnostní díly) a vlastní vratný materiál ZP0410 (jeden hmotnostní díl). Poté se připravená tavenina dopravuje k jednotlivým licím strojům v předehřáté mobilní peci MELTEC ZTF 650 (obr. 1). Tavenina je z mobilní pece přelévána do udržovacích pecí jednotlivých licích strojů pro tlakové lití.



Obr. 1 Předtavnovací pec MELTEC ZTF 700 B s dopravníkem recyklovaného odpadu (vlevo) s předehřátou mobilní pecí MELTEC ZTF 650 (vpravo) [2]

Fig. 1 Pre-melting furnace MELTEC ZTF 700 B with a recycled waste conveyor (left) with the pre-heated mobile furnace MELTEC ZTF 650 (right) [2]

Při studiu vlivu nastaveného poměru vratného a primárního materiálu na kvalitu tenkostěnných odlitků bylo průběžně využito několik metod nad rámec sledování chemického složení slitiny v rámci technologického toku. V průběhu roku 2021 byly implementovány metody měření drsnosti odlitků, základní metalografické analýzy a také průmyslová výpočetní tomografie (CT). Detaily k implementaci těchto přístupů byly publikovány [3].

Bylo rozhodnuto, že pro vědecko-výzkumné činnosti související s finální verifikací navrhovaného poměru vratného materiálu bude kromě sledování dříve argumentovaného klíčového chemického složení

průběžně zpracovávaného a distribuovaného materiálu ZP0410 zaměřena pozornost také na využití výpočetní tomografie (CT), která umožňuje nad rámec klasických metalografických výbrusů sledovat vnitřní kvalitu studovaného dílce v celém objemu a poskytuje tak komplexní kvalitativní ale také kvantitativní obraz.

Pro účely tohoto příspěvku byly vybrány 3 typy tenkostěnných odlitků různého typu označených pro zjednodušení zkratkami (HU, UN, ZA), na kterých byl poměr vlastního vratného materiálu ZP0410 a primární suroviny ZL0410 studován. U každého typu odlitku byly odebrány vzorky taveniny z licího stroje bez zavedené recyklace vratného materiálu a následně se zavedením recyklace vratného materiálu. Odebrány byly rovněž výpady vlastních odlitků pro účely realizace CT. Vzorky z taveniny z jednotlivých licích strojů a výpady odlitků v tomto případě vyrobených bez recyklace jsou uvedeny na obr. 2.



a) Vzorky z taveniny a výpad s odlitky typu HU bez recyklace
a) Melts' and castings' samples for type HU without recycling



b) Vzorky z taveniny a výpad s odlitky typu UN bez recyklace
b) Melt's and castings' samples for type UN without recycling



c) Vzorky z taveniny a výpad s odlitky typu ZA bez recyklace
c) Melt's and castings' samples for type ZA without recycling

Obr. 2 Příklady vzorků z provozních taveb určených k OES a CT analýzám

Fig. 2 Examples of samples from operational melts prepared for OES and CT analyses

Chemické složení vzorků bylo analyzováno pomocí optické emisní spektrometrie (OES) přístrojem Q4 Tasman. Před měřením byl analyzovaný povrch vzorků broušen kotoučovou bruskou, aby se odstranily veškeré povrchové nehomogenity/kontaminace a aby byla zajištěna požadovaná drsnost analyzovaného povrchu. K průběžné kontrole výsledků chemické analýzy byl využíván standardní referenční materiál SRM 630.

Diskuse výsledků

Tab. 1 uvádí standardizované složení slitiny zinku pro primární surovinu ZL0410 (ČSN EN 1774) [23] a pro odlitky ZP0410 (ČSN EN 12844) [22].

Z pohledu chemického složení byly v rámci metody OES sledovány obsahy všech prvků relevantních vzhledem k uvedeným normám [22, 23].

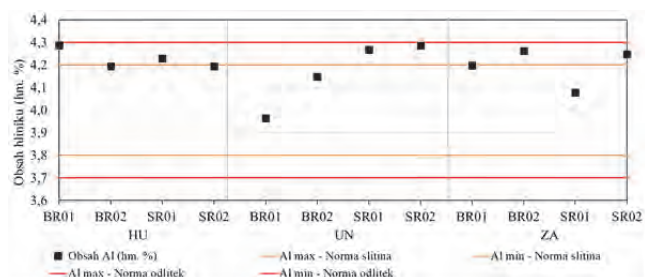
Na obr. 3 až obr. 6 je v grafické podobě uveden obsah prvků v hmotnostních procentech v jednotlivých vzorcích z výroby všech tří druhů sledovaných odlitků. Nicméně, vzhledem k přehlednosti byly vybrány do tohoto příspěvku jen ty prvky, kterých diskuse je vzhledem k předmětu studia zásadní. U zbývajících prvků (obsah cínu, křemíku, kadmia, niklu a železa) odpovídalo chemické

složení normě [22] a nebylo tedy nutné věnovat další pozornost v rámci další diskuse. BR značí vzorek bez recyklace, SR pak vzorek s recyklací. Červené linie vyjadřují limity obsahů daného prvku podle normy pro výslednou slitinu ZP0410. Oranžové linie pak představují limity obsahů daného prvku podle normy pro primární vstupní surovinu ZL0410.

Tab. 1 Složení zinkové slitiny dle norem

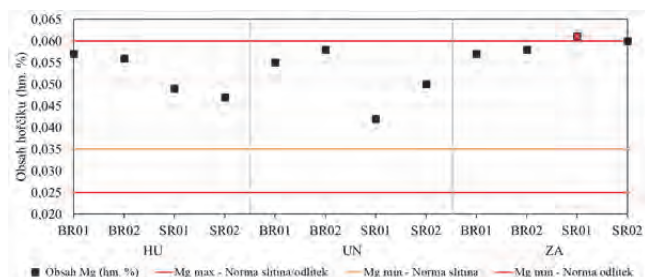
Tab. 1 Zinc alloy composition according to the standards

Prvek	Obsah prvku (hm. %)			
	ČSN EN 1774		ČSN EN 12844	
	min	max	min	max
Al	3,800	4,200	3,700	4,300
Cu	0,700	1,100	0,700	1,200
Mg	0,035	0,060	0,025	0,060
Pb	-	0,003	-	0,005
Sn	-	0,001	-	0,002
Si	-	0,020	-	0,030
Cd	-	0,003	-	0,005
Ni	-	0,001	-	0,020
Fe	-	0,020	-	0,050



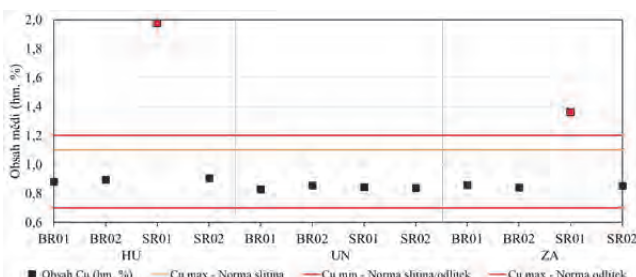
Obr. 3 Srovnání obsahu hliníku (hm. %) ve vzorcích z výroby tenkostěnných zinkových odlitků pro případy výroby bez recyklace (BR) a s recyklací (SR)

Fig. 3 Aluminium content (wt. %) comparison in samples for thin-walled zinc alloy castings production without (BR) or with recycling (SR)



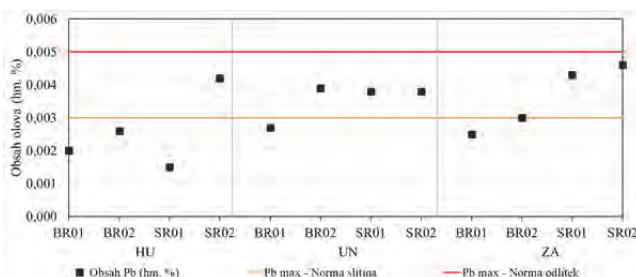
Obr. 5 Srovnání obsahu hořčíku (hm. %) ve vzorcích z výroby tenkostěnných zinkových odlitků pro případy výroby bez recyklace (BR) a s recyklací (SR)

Fig. 5 Magnesium content (wt. %) comparison in samples for thin-walled zinc alloy castings production without (BR) or with recycling (SR)



Obr. 4 Srovnání obsahu mědi (hm. %) ve vzorcích z výroby tenkostěnných zinkových odlitků pro případy výroby bez recyklace (BR) a s recyklací (SR)

Fig. 4 Copper content (wt. %) comparison in samples for thin-walled zinc alloy castings production without (BR) or with recycling (SR)



Obr. 6 Srovnání obsahu olova (hm. %) ve vzorcích z výroby tenkostěnných zinkových odlitků pro případy výroby bez recyklace (BR) a s recyklací (SR)

Fig. 6 Lead content (wt. %) comparison in samples for thin-walled zinc alloy castings production without (BR) or with recycling (SR)

Z grafů na obr. 3 až obr. 6 je patrné, že složení ve většině případů odpovídá normě ČSN EN 12844 pro odlitky z materiálu ZP0410, kromě jednoho případu, kdy je překročen obsah mědi a jednoho případu, kdy je překročen obsah mědi a hořčíku.

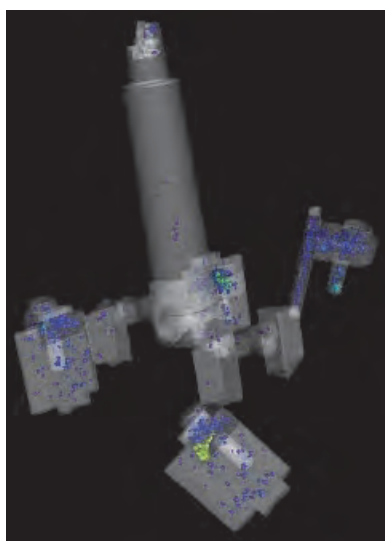
Zvýšený obsah mědi (obr. 4) ve dvou případech je možné dát do souvislosti se skutečností, že na licích strojích dochází ke střídání námi sledované taveniny ZP0410 s taveninou ZP0430, která obsahuje cca 3 hm. % mědi

[22]. Zřejmě nedošlo k dokonalému pročištění udržovací pece licích strojů.

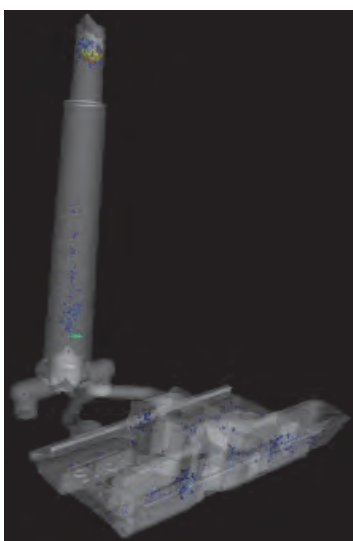
Ostatní uvedené hodnoty obsahů jednotlivých prvků nevykazují jednoznačný trend v nárůstu nebo poklesu jejich obsahu v souvislosti s tím, zda byla připravena tavenina pouze z primární slitiny ZL0410 nebo zda byla připravena s využitím vlastního vratného materiálu na bázi ZP0410. Nicméně se obsah prvků v některých případech dostává k limitu normy pro odlitky [22]. Proto je nezbytné nepřekračovat prověřený podíl vlastního vratného materiálu a chemické složení průběžně monitorovat.

V další části diskuse získaných poznatků je pozornost zaměřena na výsledky analýzy odebraných výpadů studovaných odlitků pomocí výpočetní tomografie (CT).

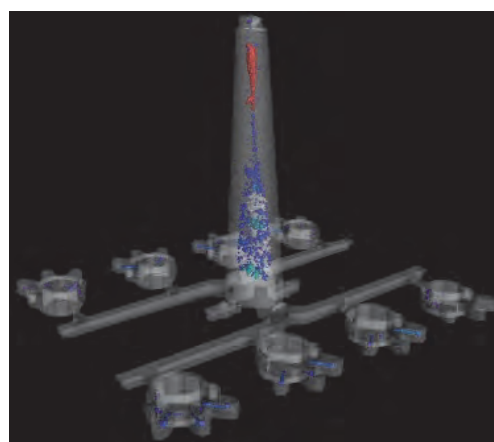
Na obr. 7 jsou uvedeny příklady pohledu na celé skenované výpady. Hodnotící software umožňuje detailní rozbor pořízených výsledků. Zde je pozornost zaměřena na srovnání výskytu vnitřních vad mezi odlitky vyrobenými pouze s primární suroviny a těmi, kdy byla využita vlastní tavenina připravena s využitím částečné recyklace vlastního vratného materiálu ve studovaném poměru. Červeně jsou znázorněny nejrozsáhlejší vady, zeleně pak středně velké vady a modře pak vady drobné.



HU casting

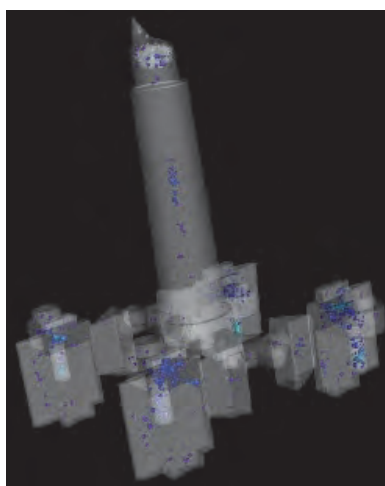


UN casting

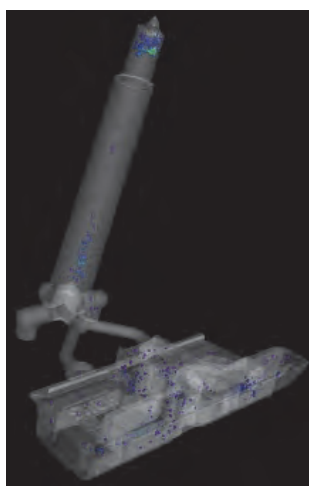


ZA casting

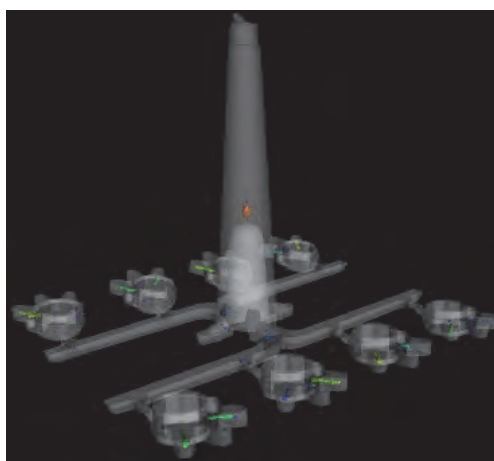
a) CT analýza pro odlitky typu HU, UN, ZA vyrobených bez recyklace
a) CT analysis for castings' type HU, UN, ZA casts without recycling



HU casting



UN casting



ZA casting

b) CT analýza pro odlitky typu HU, UN, ZA vyrobených s recyklací
b) CT analysis for castings' type HU, UN, ZA casts with recycling

Obr. 7 Příklady výsledků výpočetní tomografie získané na základě CT analýzy studovaných typů odlitků bez recyklace a s recyklací
Fig. 7 Examples of computed tomography results based on CT analysis of studied castings types without and with recycling

Obr. 7 poskytuje spíše možnost kvalitativní analýzy. Největší rozdíl ve výskytu vnitřních vad je v případě vtokového kůlu u výpadu odlitků typu ZA. Ve vtokovém kůlu výpadu vyrobeného pouze z primární suroviny je vidět významnější vada (obr. 7 a), ale na druhou stranu se v těle jednotlivých odlitků vyskytuje vad méně, než v případě výpadu vyrobeného s recyklací (obr. 7 b). Určitě rozdíly je možné nalézt také u zbývajících typů odlitků.

Ke kvantifikaci výsledků výpočetní tomografie je možné využít celou řadu nástrojů obsažených ve vyhodnocovací software CT zařízení. V tab. 2 jsou obsaženy údaje, které shrnují výsledky takového hodnocení.

Pro každý ze sledovaných odlitků jsou v tab. 2 uvedeny hodnoty celkového objemu snímaného materiálu (Material Volume). Objem defektů (Defect Volume) prezentuje odchylky v hustotě materiálu, na základě kterých je možné usuzovat na vnitřní vadu. Může se jednat jak o prázdný prostor (dutiny) nebo částice jiných fází (vměstky). K precizní identifikaci důvodu odlišné nalezené hustoty nelze použít samostatné výsledky CT analýzy a bylo by nutné přistoupit k využití jiných, např. metalografických metod se zaměřením na konkrétní z pohledu technologie výroby kritickou oblast. Poslední sledovanou veličinou v tab. 2 je podíl objemu defektů k celkovému objemu skenovaného materiálu (Defect Ratio). Pro každý typ odlitku jsou takto pod sebou uvedeny hodnoty pro výrobu bez nebo s recyklací.

Tab. 2 Vybrané parametry z hodnocení vnitřních kvality odlitků
Tab. 2 Selected parameters for internal quality of casting evaluation

Typ odlitků		Charakteristika materiálu a defektů		
		Objem materiálu	Objem defektů	Podíl defektů
		[mm ³]		[%]
HU	Bez recyklace	3955,9	46,3	1,16
	S recyklací	4007,0	21,8	0,54
UN	Bez recyklace	5782,3	16,4	0,28
	S recyklací	5771,3	17,8	0,31
ZA	Bez recyklace	19231,5	200,2	1,03
	S recyklací	17861,1	80,7	0,45
Suma	Bez recyklace	28969,7	262,9	0,91
	S recyklací	27639,3	120,2	0,43

Z tab. 2 je patrné, že výpady studovaných odlitků kromě odlitku typu UN vykazují menší podíl nalezených vad (Defect Ratio). To podporuje i jinými metodami nalezená zjištění, že zavedení recyklace v daném poměru nemá samo o sobě negativní vliv na technologii tlakového lití zinkové slitiny typu ZP0410 v daných provozních podmínkách. Uvedené hodnoty podporují skutečnost, že proces tlakového lití je závislý na celé řadě dalších technologických parametrů, kterým je nutné v průběhu výroby věnovat patřičnou pozornost.

Závěr

Předložený příspěvek byl věnován vybraným sledovaným parametrům (chemickému složení a vnitřní kvalitě odlitků) v průběhu vývoje ověřené technologie umožňující v provozních podmínkách tlakového lití vyrábět tenkostěnné odlitky zinkové slitiny ZP0410. Na základě předcházejících poznatků z vývoje takovéto technologie pro silnostěnné odlitky byl zvolen i pro odlitky tenkostěnné stejný poměr vlastního vratného materiálu (1 díl) k primární slitině (2 díly).

Bylo prokázáno, že chemické složení taveniny v udržovacích pecích licích strojů z pohledu volby vlastní připravené taveniny obsahující vrat nevykazuje významné odchylky překračující požadavky na chemické složení z důvodu realizace recyklace jako takové.

Aplikací výpočetní tomografie bylo zjištěno, že z pohledu vnitřních vad nepředstavuje zvolený poměr vlastního vratného materiálu riziko zhoršení kvality vyráběných odlitků.

Nicméně, průběžně získávané výše diskutované výsledky naznačují nutnost nejen sledování chemického složení v souvislosti s aplikací recyklace, ale také z pohledu dalších technologických změn, které jsou v průběhu výroby vyžadovány, například změnu vyráběné jakosti s rozdílným obsahem mědi, změny dodavatele primární suroviny ZL0410, změny nastavení licího stroje, opotřebení tvarových částí formy, atd. V této souvislosti byl prokázán značný potenciál využití výpočetní tomografie nejen při hodnocení využití vlastního vratného materiálu, ale rovněž při další optimalizaci výrobního procesu jako takového. Vše v součinnosti s využitím dalších vědecko-výzkumných metod, které byly v rámci průběhu řešení projektu uplatněny a jsou rovněž součástí dalších společně řešených VaV projektů.

Poděkování

Tato práce vznikla v rámci řešení projektu TH04020055: „Výzkum a vývoj technologie recyklace zinkového odpadu při výrobě vysoce kvalitních odlitků ze slitin zinku“ v rámci programu EPSILON, financovaného Technologickou agenturou ČR.

Literatura

- [1] GRYC, K., SOCHA, L., KUBEŠ, R., SOCHACKÝ, V., KOZA, K. and TROBL, J. Operational verification of reuse of returnable zinc alloy ZP0410 in the production of thick-walled castings. In *6th PING International Conference – Modern Trends in Material Engineering*. Plzeň: IOP Publishing, 2022. ISSN 1757-899X. DOI: 10.1088/1757-899X/1243/1/012005.
- [2] GRYC, K., SOCHA, L., KUBEŠ, R., SOCHACKÝ, V., KOZA, K. and TROBL, J. Zajištění stabilní produkce silnostěnných odlitků ze slitiny ZP0410 při implementaci využití vratného materiálu. *Hutnické listy*, 74 (2021) 5-6. ISSN 0018-8069.
- [3] GRYC, K., SOCHA, L., KUBEŠ, R., SOCHACKÝ, V., KOZA, K., TROBL, J. and PINTA, M. Combination of surface and volume analysis methods in the study of the quality of thin-walled castings from ZP0410 alloy. In *METAL 2022, 31st International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: Tanger Ltd., 2022. ISSN 2694-9296. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2022.4513>.

- [4] KAYA, M., HUSSAINI, S. and KURSUNOGLU S. Critical Review on Secondary Zinc Resources and their Recycling Technologies. *Hydrometallurgy*, 195 (2020) 33. ISSN 0304-386X. DOI: 10.1016/j.hydromet.2020.105362.
- [5] BRANCA, T. A., COLLA, V., ALGERMISSEN, D., GRANBOM, H., MARTINI, U., MORILLON, A., PIETRUCK, R. and ROSENDAHL, S. Reuse and Recycling of By-products in the Steel Sector: Recent Achievements Paving the Way to Circular Economy and Industrial Symbiosis in Europe. *Metals*, 10 (2020) 3, 18. ISSN: 2075-4701. DOI: 10.3390/met10030345.
- [6] U.S. Geological Survey 2021: Mineral commodity summaries 2021 <https://doi.org/10.3133/mcs2021>.
- [7] University of York 2016: Zinc, accessed 6 Sept. 2021 <<https://www.essentialchemicalindustry.org/metals/zinc.html>>
- [8] TAN, R. B. H. and KHOO, H. H. Zinc Casting and Recycling. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10 (2005) 3, 211-218. ISSN 0948-3349. DOI: 10.1065/lca2004.08.172.
- [9] MATINDE E, SIMATE G. S. and NDLOVU S. 2018 Mining and Metallurgical Wastes: A Review of Recycling and Re-use Practises *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 118 (2018) 8, 825-844. ISSN 2225-6253. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5.
- [10] ANTUÑANO, N., HERRERO, D., ARIAS, P. L. and CAMBRA, J. F. Electrowinning Studies for Metallic Zinc Production from Double Leached Waelz oxide. *Process Safety and Environmental Protection*, 91 (2013) 6, 495-502, ISSN 0957-5820. DOI: 10.1016/j.psep.2012.10.014.
- [11] BOOSTER, J. L., VAN SANDWIJK, A. and REUTER, M. A. Magnesium Removal in the Electrolytic Zinc Industry. *Minerals Engineering*, 13 (2000) 5, 517-526. ISSN 0892-6875. DOI: 10.1016/S0892-6875(00)00032-7.
- [12] CLEARY, P. W., HA, J., PRAKASH, M. and NGUYEN, T. Short Shots and Industrial Case Studies: Understanding Fluid Flow and Solidification in High Pressure Die Casting. *Applied Mathematical Modelling*, 34 (2010) 8, 2018-2033. ISSN 0307-904X. DOI: 10.1016/j.apm.2009.10.015.
- [13] CAO, L., LIAO, D. M., SUN, F., CHEN, T., TENG, Z. H. and TANG, Y. L. Prediction of Gas Entrapment Defects during Zinc Alloy High-pressure Die Casting Based on Gas-liquid Multiphase Flow Model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94 (2018) 3, 807-815. ISSN 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-017-0926-5.
- [14] JARENO, E. D., CASTRO, M. J., MALDONADO, S. I. and HERNANDEZ, F. A. The Effects of Cu and Cooling Rate on the Fraction and Distribution of Epsilon Phase in Zn-4Al-(3-5.6) Cu Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 490 (2010) 1-2, 524-530. ISSN 0925-8388. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.10.073.
- [15] POLA, A., TOCCI, M. and GOODWIN, F. E. Review of Microstructures and Properties of Zinc Alloys. *Metals*, 10 (2020) 2, 16. ISSN 2075-4701. DOI: 10.3390/met10020253.
- [16] VENCL, A., BOBIC, I., VUCETIC, F., BOBIC, B. and RUZIC, J. Structural, Mechanical and Tribological Characterization of Zn25Al Alloys with Si and Sr Addition. *Materials & Design*, 64 (2014) 381-392. ISSN 0261-3069. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.07.056.
- [17] LACHOWICZ, M. M. and LACHOWICZ, M. B. Intergranular Corrosion of the as Cast Hypoeutectic Zinc-aluminium Alloy. *Archives of foundry engineering*, 17 (2017) 3, 79-84. ISSN 1897-3310. DOI: 10.1515/afe-2017-0095.
- [18] POLA, A., GELFI, M., LA VECCHIA, G. M. and MONTESANO, L. On the Ageing of a Hyper-eutectic Zn-Al Alloy. *La Metallurgia Italiana*, 4 (2015) 4, 37-41. ISSN 0026-0843.
- [19] KRAJEWSKI, W. K., PIWOWARSKI, G. and KRAJEWSKI, P. K. Protecting Melted Zinc-aluminium Based Foundry Alloys against Hydrogen Pick-up. *Archives of metallurgy and materials*, 59 (2014) 2, 753-755. ISSN 1733-3490. DOI: 10.2478/amm-2014-0126.
- [20] PIELA, K., BLAZ, L., BOCHNIAK, W., OSTACHOWSKI, P., LAGODA, M., ZABINSKI, P., JASKOWSKI, M., KIPER, M. and POLKOWSKA, A. Self-hardening of Low-alloyed Zinc for Biodegradable Application. *Journal of Alloys and Compounds*, 810 (2019) 9. ISSN 0925-8388. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.151883.
- [21] KORBER, D. Liquid metal assisted crack formation in zinc melts. Representation of the damage pattern using 3D computed tomography. *Practical Metallography*. 54 (2017) 2. ISSN 2195-8599. DOI: 10.3139/147.110418.
- [22] ČSN EN 12844. Zinek a slitiny zinku - Odlitky – Specifikace. 2000.
- [23] ČSN EN 1774. Zinek a slitiny zinku - Slitiny pro slévarenské účely - Ingoty a tekutý kov. 2000.

Na Rourovně Liberty Ostrava probíhal důležitý audit

LIBERTY Ostrava, Nová huť, listopad 2022, ročník XII, číslo 11, s. 12. Michal Kolář

Liberty Ostrava může i nadále označovat své naftovodné a pažnicové trubky celosvětově uznávaným monogramem API a být dodavatelem trubek pro těžaře a distributory plynu, ropy a jejich derivátů. To je výsledkem úspěšného auditu, který se v Rourovně Liberty Ostrava uskutečnil na přelomu října a listopadu 2022.

Auditována byla všechna oddělení i výrobní provozy Rourovny a taktéž centrální útvary Hutní a chemické laboratoře a Vzdělávání a rozvoj zaměstnanců. V závěrečné zprávě auditor potvrdil, že nenalezl žádná závažná zjištění a že systém řízení kvality je na Rourovně funkční, tedy ve shodě s požadavky API. Auditor během dozorového auditu API prověřoval plnění systémové normy API Spec Q1 a výrobních norem API Spec 5L a API Spec 5CT, podle kterých se v Rourovnách vyrábějí trubky pro olejářský průmysl.

Společnost LIBERTY Ostrava vyrábí trubky ve dvou Stiefelových válcovnách a ve svařovně trub. Od roku 1949 na bezešvé trati St 4-10 a od roku 1960 na bezešvé trati St 140 mm. Bezešvé a svařované trubky, které se používají pro těžbu a následnou přepravu kapalných i plyných médií, do rozličných tlakových zařízení a také pro konstrukční účely, dodává zákazníkům do celého světa.

Netradiční pohled na čistotu oceli

Untraditional View on the Purity of Steel

prof. Ing. Jaroslav Purmenský, DrSc.¹; doc. Ing. Peter Bernasovský, PhD.²

¹ VŠB - Technická univerzita Ostrava, Centrum pokročilých inovačních technologií, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava, Česká republika

² Failure Analyses, konzultant, Romanova 44, 851 02 Bratislava, Slovensko

Vliv čistoty oceli na její vlastnosti. Fyzikálně-metalurgický přístup k hodnocení příčin havárie lodi Titanic. Deficit Mn u lodních plechů. Vliv metalurgické čistoty na odolnost proti křehkému porušení u nízkouhlíkových ocelí. Sporný přínos přítomnosti Ni v žárupevných ocelích na feritické bázi, přelegování molybdenem. Některé příklady cíleného využití netradičních legur v oceli.

Klíčová slova: čistota oceli; makročistota a mikročistota oceli, kriteria hodnocení, potopení Titaniku, sporný vliv molybdenu a niklu v žárupevných ocelích a jejich vytvrzovací charakteristika

The influence of steel purity on its properties. Physical-metallurgy evaluation of the Titanic accident. The deficiency of the manganese content in ship metal plate. The influence of trace elements on the brittle behaviour. Problematic contribution of Ni content to heat resisting steels of ferritic base, over alloying by Mo. Some examples of targeted use of non-traditional elements in steel.

Key words: purity of steel; macropurity and micropurity of steel, evaluation criteria, titanic sinking, questionable influence of molybdenum and nickel on heat-resistant steels and their hardening characteristics

1. Úvod

Pojem čistoty oceli doprovází ocel jako základní konstrukční materiál po celou dobu vývoje, výroby a praktického využití. Základní slitina železa s uhlíkem je prakticky vždy kontaminována dalšími prvky vyskytujícími se v přírodě. Vlastnosti tohoto systému jsou potom významně ovlivněny kvalitou a kvantitou těchto příměsí, ať cílených (legování) nebo nechtěných (nečistoty).

Vzhledem k dnes již běžným hodnocením čistoty a jejího vlivu, dovoluji si níže uvést některé příklady nadstandardního posouzení, kdy se některé nevhodné prvky mohou stát žádanými, a naopak použité legury jako nevhodné.

2. Čistota a mikročistota oceli

Prísna definice čistoty oceli je problematická, všeobecně se dělí na makročistotu a mikročistotu.

Makročistota je většinou vyjadřována tzv. vměstkovým číslem zahrnujícím množství, druh, velikost a tvar, případně rozložení vměstků. Jedná se převážně o hliníky, křemičitany, nitridy aj., které vznikají při metalurgickém procesu a dalším zpracování tvářením.

Mikročistota (metalurgická čistota) zahrnuje široký obor prvků, nebo jejich sloučenin vyskytujících se v systému Fe-C

- nerozpustné v oceli – Pb; Bi
- omezeně rozpustné – Si; P; Cu

- oslabující atomové vazby – As; Sb; Sn; N
- ovlivňující vytvrzující fáze – Sb; Pb; Bi; P
- plyny – O; N; H

Podle možnosti omezení jejich obsahu se jedná o doprovodné prvky odstranitelné při tavení – P a S (tvorba a stahování strusky) a rozpuštěné plyny H; O; N (při desoxidaci a vakuování). Široce se v tomto směru uplatňují procesy sekundární metalurgie, ať už za normálního nebo sníženého tlaku.

Zdroje nečistot přítomných v oceli jsou jednak původní rudy, feroslitiny při legování, produkty ošetření tekuté oceli (desoxidace, srážecí technologie aj.), podobně jako důsledky zpracování v pevném stavu (svařování, moření aj.).

2.1 Hodnocení čistoty

Hodnocení makročistoty je poměrně jednoduché pomocí vměstkového čísla případně doplněného metalografickou dokumentací.

Co se týká tzv. stopových prvků, zejména Sn; As; Sb, (Zn, Bi, Pb), ty jsou při metalurgickém procesu prakticky neodstranitelné. Jejich přítomnost v oceli je dána přísnou kontrolou použitých surovin, zejména šrotu. Mechanismus jejich působení je dán difuzí proti koncentračnímu gradientu, k již tak oslabeným vazbám na hranicích zrn a dalšímu narušení periodicity mřížky. Výsledkem je snížení odolnosti proti interkrytalickému porušení a výrazné

zvýšení přechodové teploty. Tyto pochody probíhají i v rámci výrobních technologií, zejména při svařování a následném tepelném zpracování, kdy je umožněna difuze výše uvedených prvků. Z řady tzv. faktorů hodnocení čistoty je velmi frekventované použití faktorů J a X. Jejich stanovení je možno jednoduše určit pomocí následujících rovnic [5, 6]:

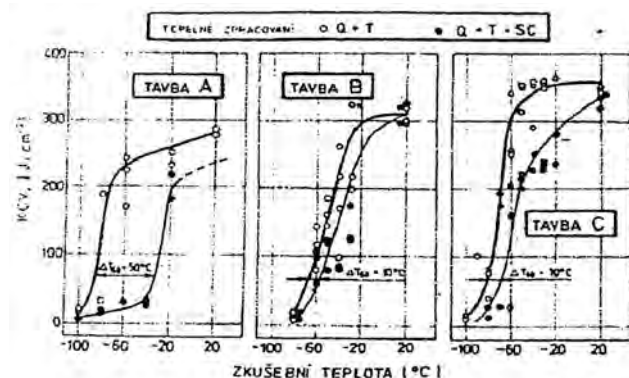
$$J = (Mn + Si) (Sn + P) \cdot 10^4 \quad (1)$$

$$X = \frac{10P + 5Sb + 4Sn + As}{100} \quad (2)$$

Pro představu o vhodné úrovni výše uvedených faktorů je možno uvést striktní požadavky na výrobu hydro-krakovacích reaktorů těžké chemie $J < 200$ ppm; $X < 20$ ppm v roce 1984, v současné době se u náročných výrobků předpokládají úrovně cca $J < 50$ a $X < 5 - 10$ ppm, dokonce i nižší!

Dnes už běžně používaným kritériem poklesu hodnot vrubové houževnatosti, resp. lomové houževnatosti, je definice posunu tranzitní teploty ΔT vlivem modelového teplotního režimu tzv. „step cooling“. Jedná se o stupňovité ochlazování zkušební vzorku oceli v intervalu teplot 595 až 315 °C při celkové době prodlevy 200 hodin. Předpokládá se, že uvedený režim v maximální míře povede k transportu stopových prvků k hranicím zrn a tím ke zkrěhnutí, které lze očekávat při použitých teplotních operacích, případně službě za zvýšených teplot.

Příklad výše uvedeného hodnocení u tří taveb u oceli 2,25Cr-1Mo (ČSN 415313) s rozdílnou metalurgickou čistotou je uveden na obr. 1. [1, 3].



Obr. 1 Teplotní závislost vrubové houževnatosti u jednotlivých taveb a její posun vlivem step-coolingu

Fig. 1 Temperature dependence of notch-impact toughness for tested heats before and after step-cooling

Z obr. 1 je patrné, že zatímco u relativně čistých taveb B ($J = 138$; $X = 12,6$ ppm) a C ($J = 113$; $X = 11,5$ ppm) je posun přechodové teploty vlivem step coolingu 10 °C, tavba A s výrazně vyššími hodnotami faktorů čistoty ($J = 244$; $X = 19,4$ ppm) vykazuje výrazně zkrěhnutí s posunem $\Delta T = 50$ °C [3].

Z postavení Mn a Si při hodnocení čistoty faktorem J vyplývá zajímavý paradox. Mangan pro schopnost vázat vyšší obsahy síry přítomné v oceli (viz kap. 3.1) a křemík jako běžné desoxidační činidlo, mají v oceli pozitivní charakter. V případě faktoru J jsou však na straně škodlivin. Vysvětlení je v možné podpoře záporného vlivu P a Sn na zkrěhnutí oceli za vyšších teplot [3, 5].

Z pohledu tváření je hlavní pozornost věnována obsahům Cu a Sn v oceli. Pro těžké výkovky je tolerance obou prvků hodnocena jejich součtem:

$$Cu + 7,76 Sn \leq 0,33 \text{ hm\%} \quad (3)$$

což pro běžné tolerované obsahy 0,2 až 0,3 % Cu a 0,01 % Sn může být problém [4].

3. Vybrané příklady vlivu některých příměsí na vlastnosti oceli

3.1 Deficit Mn u lodních plechů Titanicu

Známa havárie zaoceánské lodi Titanic v roce 1912 při plavbě severním Atlantikem vyvolává řadu spekulací o její příčině. Všeobecně se přijímá názor o proražení boku lodi plovoucí ledovou krou a zatopení bezpečnostních komor, což vedlo k jejímu potopení.

Brzy po objevení lodního vraku byly z okolí magistralní trhliny odebrány a vyzvednuty vzorky lodních plátů, u kterých byly ověřovány pevnostní a křehkolomové vlastnosti včetně běžné chemické analýzy. Výsledky z potopené lodi byly srovnány s vlastnostmi plechů tehdy používaných ke stavbě lodí MHP, (1996) [7].

V případě chemického složení (viz tab. 1) byl zjištěn nebyvale vysoký obsah síry u Titaniku, s nízkým poměrem $Mn : S = 7 : 1$, zatímco tento poměr u současných plechů je $39 : 1$!

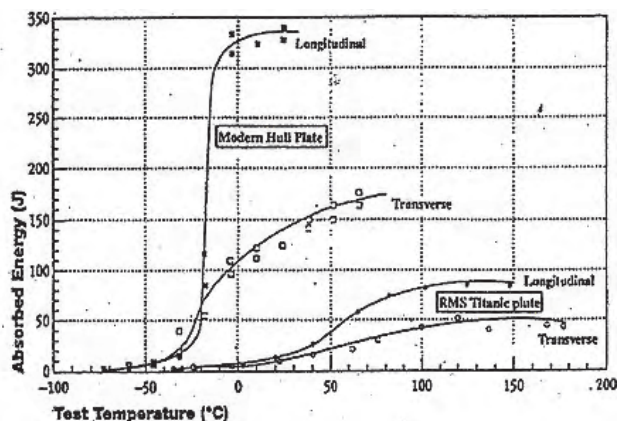
Tab.1 Porovnání chemického složení oceli z lodi TITANIC se současným typem oceli (MHP)

Tab. 1 Comparison of chemical composition of TITANIC plates and current present steel

Plech	C	Mn	Si	P	S	O	N	Mn : S
Titanic	0,21	0,47	0,025	0,045	0,069	0,013	0,0035	7 : 1
MHP	0,09	0,51	0,280	0,013	0,013	0,002	0,0089	39 : 1

Testy tahových zkoušek potvrdily pouze nižší hodnoty meze kluzu u Titaniku (193 MPa) ve srovnání s běžnými plechy (338 MPa), hodnoty meze pevnosti (417/441 MPa), tažnosti (29/27 %), kontrakce (57/66) jsou prakticky srovnatelné.

Diametrálně odlišné jsou výsledky teplotních závislostí nárazové práce u obou případů a to jak v příčném tak podélném směru – viz obr. 2.



Obr. 2 Teplotní závislost absorbované energie při testech vrubové houževnatosti pro plechy Titanicu a současnou loďní ocel

Fig.2 Temperature dependence of absorbed energy at notch-impact toughness tests for Titanic and current present steels

Z průběhu obou křivek z Titanicu je naprosto evidentní vysoká křehkost, která při teplotě vody v Atlantiku ($\sim -2^\circ\text{C}$) je cca 5 až 10 J, zatímco u dnešních plechů přes 100 J.

Nicméně dáme-li do souvislosti zjištěné chemické analýzy a křehkolomové chování, je zřejmé, že ocel vyrobená pro plechy Titanicu odpovídá úrovni ocelářské výroby okolo roku 1910, která nerespektovala degradační vliv síry (a zřejmě i dalších prvků) na vlastnosti za nízkých teplot. Dá se předpokládat, že vysoký obsah FeS s teplotou tavení 1190°C [10] vedl při tváření plechů k tvorbě apriorních trhlin na hranicích zrn. Při kontaktu lodi s plovoucí krou došlo ke známému šíření trhlin (možná iniciace v oblasti nýtů) a ke katastrofickému lomu. Není bez zajímavosti úvaha, že ke eliminaci tak vysokého obsahu síry převedením na relativně stabilní MnS (teplota tání 1620°C), by byla k docílení dnešního poměru Mn/S nezbytná přísada 2,7 hm% manganu.

Nedávno nalezené dokumenty z období havárie uvádějí, že v podpalubí lodi došlo při její přepravě do výchozího bodu plavby k rozsáhlému požáru palivového uhlí, které bylo v přímém kontaktu s lodními pláty. Ty byly údajně ohřáty až do červeného žáru (cca 650 až 700°C) a z venkovní strany ochlazovány ledovou mořskou vodou. Tato skutečnost mohla být zdrojem dalších přídatných napětí ve struktuře již tak degradované vysokými obsahy síry.

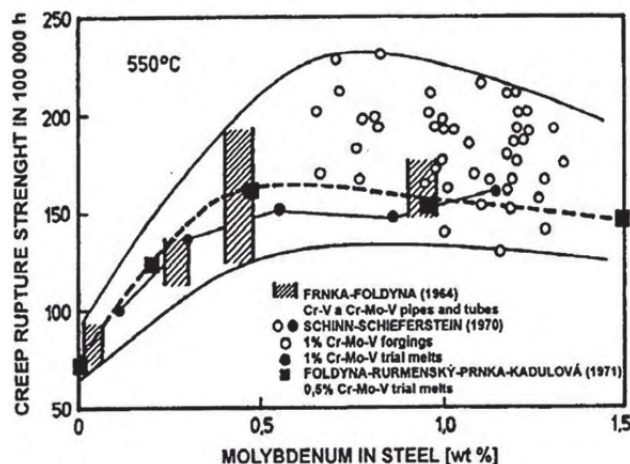
I když předložená úvaha může mít spekulativní charakter, je fyzikálně-metalurgické vysvětlení příčin havárie Titanicu podloženo reálnými základy.

3.2 Přelegování žárupevných ocelí molybdenem

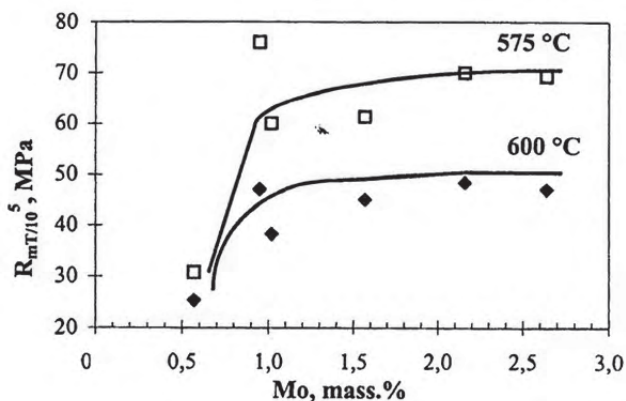
Molybden je hodnocen jako příznivá legura v řadě ocelí. Jeho relativně velká velikost vyvolává v mřížce atomů železa napětí vedoucí k distorzi mřížky a k tzv. substitučnímu zpevnění. Vedle tvorby jemných precipitátů Mo_2C (M_2X) jsou tyto vlastnosti úspěšně využívány v konstituci nízkolegovaných CrMo a CrMoV ocelí, (např. 151313;

15128) a martenzitických 9–12 % Cr (P91; P92) žárupevných ocelí. Oba tyto mechanismy úspěšně brání pohybu dislokací za vysokých teplot (až 650°C) a tím zvyšují žárupevnost.

Nicméně se ukázalo, že zvyšování obsahu Mo v těchto ocelích má své limity. Výsledky rozsáhlého testování obou skupin žárupevných ocelí uvádí obr. 3 a 4 [5; 8; 9].



Obr. 3 Vliv obsahu Mo na žárupevnost nízkolegovaných CrMoV ocelí
Fig. 3 Effect of Mo content on the creep rupture strength of low-alloy CrMoV steels



Obr. 4 Závislost creepové pevnosti na obsahu Mo v ocelích s obsahem 9 % Cr

Fig. 4 Effect of Mo content on the creep rupture strength of the steels with 9 % Cr

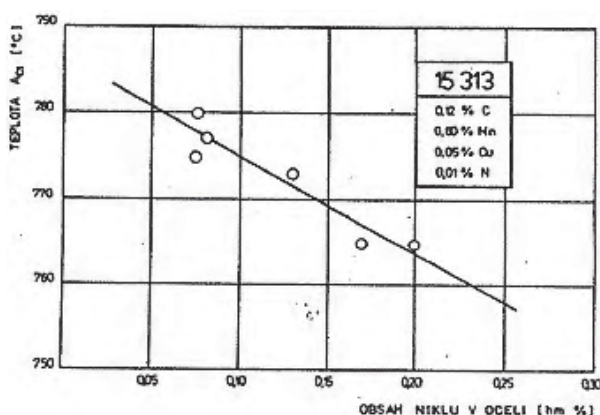
Z výsledku je patrné, že vhodné legování molybdenem je u nízkolegovaných CrMo a CrMoV ocelí okolo 0,5 %, v případě ocelí s obsahem 9 % Cr do cca 1 % Mo. Při těchto hladinách se uplatňuje optimální poměr substitučního a precipitačního zpevnění struktury. Vyšší obsahy Mo tzv. „přelegování“ vedou k vyloučení hrubých karbidů Mo_6C , případně Lavesovy fáze Fe_2Mo , které rozpouštějí jemné precipitáty M_2X ; VC; VCN (o velikosti cca 20–50 nm) a tím degradují precipitační zpevnění, tj. dochází ke snížení odolnosti proti tečení. Navíc synergicky s Mo působí i W v oceli, nicméně s polovičním vlivem [8, 9]. Nicméně tento fakt nebrání výrobcům „úspěšně“ přelegovávat řadu značek žárupevných ocelí (včetně standardů EU), i když někdy s nejasným výsledkem.

3.3 Sporná přítomnost niklu v nízkolegovaných žárupevných ocelích

Nikl se v materiálovém inženýrství využívá převážně k výrobě austenitických ocelí a slitin. U některých nízko a středně legovaných ocelí na feritické bázi významně přispívá ke zvýšení odolnosti proti křehkému porušení za nízkých teplot.

Zcela specifické je jeho působení u vytvrditelných žárupevných ocelí diskutovaných v kap. 3.2. Svým charakterem austenitotvorného prvku, nikl v soustavě Fe-C rozšiřuje oblast austenitu, což mj. vede ke snížení bodu přeměny A_{c1} .

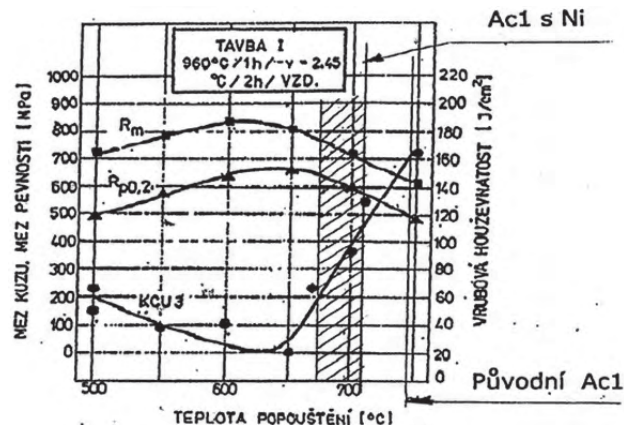
Na obr. 5 je uvedena závislost úrovně bodu A_{c1} na obsahu Ni v oceli 2,25Cr-1Mo (15313). Přitom přísada 0,1 % Ni snižuje teplotu A_{c1} o cca 10 °C.



Obr. 5 Vliv obsahu niklu v oceli 15313 (2,25 Cr-1Mo) na teplotu přeměny A_{c1}

Fig. 5 Influence of Ni content in 2,25Cr-1 Mo steel on the temperature point A_{c1} .

Vzhledem k tomu, že obsah Ni ve výše uvedených žárupevných ocelích není limitován, ani není předmětem analýzy chemického složení, může jeho přítomnost způsobit vážné problémy při popouštění. Vytvrzovací charakter nízkolegovaných CrMo a CrMoV ocelí (včetně T23; T24) podobně jako martenzitických ocelí na bázi 9 – 12 % Cr, vyžaduje použití optimálních popouštěcích teplot za tzv. vrcholem vytvrzení a těsně pod teplotou A_{c1} .



Obr. 6 Vytvrzovací charakteristika oceli 15128 (0,5Cr0,5Mo0,3V) při popouštění

Fig. 6 Strengthening diagram of 0,5Cr0,5Mo0,3V steel at tempering

Důvodem je zajištění dostatečné úrovně vrubové houževnatosti a zachování optimální disperse precipitátů pro garanci výpočtové meze pevnosti při tečení. Na obr. 6 je uvedena vytvrzovací charakteristika oceli 15128 s vyznačením poměrně úzkého rozmezí „dovolených“ teplot popouštění, zároveň s posunem bodu A_{c1} vlivem přítomnosti cca 0,25 % Ni. Z předložených výsledků vyplývá, že u taveb s vyššími obsahy Ni hrozí reálná možnost nevhodného překročení teploty A_{c1} při popouštění.

Nutno zdůraznit, že výše uvedená úvaha se nedotýká pouze tepelného zpracování výchozích výrobků, ale rovněž jejich svarových spojů.

3.4 Příklady využití některých negativních příměsí

- Legování tzv. automatových ocelí sírou (až 0,3 % S) pro snadnější obrábění nenáročných výrobků díky zvýšené lámavosti třísky, při zachování kvalitního povrchu. Podobně je využíváno i olovo až do 0,3 % Pb.
- Legování povlakových vrstev fosforem okolo 3 % u krystalizátorů kontilit. Efektem je docílení vysoce tvrdé vrstvy (až 800 HV) s vysokou ořezavzdorností díky vyloučení fosfidů Ni [11].

Cílené legování německé oceli WB 36 mědí (až 0,8 % Cu) pro kotlové bubny. Účelem je efektivní využití válečného šrotu. V poslední době je stále častěji využívána měď pro zvýšení creepové odolnosti austenitických ocelí a slitin až do obsahu 3,5 % Cu (ocel 304H). Záporom je další kontaminace šrotového koloběhu neodstranitelnou mědí.

Legování austenitických žárupevných ocelí a slitin kobaltem (např. Alloy 740) až do cca 20 % Co. Nicméně nulová tolerance přítomnosti Co u materiálů pracujících v oblasti radioaktivního záření (jaderná energetika). Nebezpečí aktivace izotopu ^{60}Co .

4. Závěr

Předložená práce ukazuje na výběr některých aspektů dotýkajících se čistoty, resp. mikročistoty oceli a jeho vlivu na vlastnosti a chování vybraných ocelí v provozních podmínkách. Vedle posouzení havárie lodi Titanic z fyzikálně-metalurgického pohledu, byl posouzen vliv tepelných operací na negativní vliv stopových a doprovodných prvků, podobně jako kontraproduktivní přítomnost Ni ve vybraných žárupevných ocelích feritické báze, podobně jako nebezpečí jejich přelegování molybdenem. Příložený doplněk stručně uvádí některé příklady pozitivního vlivu původně záporných příměsí, resp. legur na vybrané vlastnosti.

Literatura

- [1] Purmenský, J. Technické požadavky na materiál pro exponované části teplotěnských, elektrárněnských a energetických zařízení. In *Sborník Technická konference TDS Brno*, Hrotovice, březen 2010. 05-3, s. 82. ISBN 978-80-87102.

- [2] Specifikation for equipment in ¼ Cr – 1Mo Steel. Snamprogetti SPC, No. RA-L-2000.
- [3] Purmenský, J., Tvrdý, M. and Foldyna, V. Užité vlastnosti výrobků z vysocečisté oceli typu 2,25 Cr – 1Mo pro chemické reaktory. In *Sborník VII. mez. symposium o žárupevných kovových materiálech*, Znojmo, září 1986, s. 98.
- [4] Židek, M. *Metalurgická tvaritelnost oceli*, ALEKO Praha, 1995. ISBN 80-8534-45-X.
- [5] Purmenský, J. *Strukturní stabilita CrMo a CrMoV oceli a její vliv na životnost energetických a chemických zařízení*. Doktorská disertační práce UMF ČSAV Brno, prosinec 1992.
- [6] Bruscato, R. Temper Embrittlement and Creep Embrittlement in 2-1/4 Cr-1 Mo Shielded Metal Arc Weld Deposits. *Welding Journal*, 49 (1970), 148–156.
- [7] Leighly, Jr. H. P., Bramfitt, B. L. and Lawrence, S.J. RMS Titanic: A Metallurgical Problem. *Practical Failure Analysis*, 1 (2001) 2, 10–13 and 33–37
- [8] Foldyna, V. aj. The role of Mo and W on the creep properties of 3 and 9 % Chromium steels. In *METAL 2002*, Tanger Ostrava, No. 138 (CD ROM).
- [9] Foldyna, V., Purmenský, J. and Kuboň, Z. Development of Advanced Chromium Steels with Respect to Microstructure and Structural Stability, *ISI International*, 40 (2000), Supplement p. 6.
- [10] Greg, M. and Jílek, L. základní trendy vývoje kování velkých volných výkovků. *Kovárenství*, (21013) 2013, čj. 47, s. 18–204.
- [11] Nejedlý, P. Galvanic Engineering Service, s.r.o Praha. Privání informace, 2021.

Akademici v čele s VŠB-TUO nabídnou spolu s firmami řešení pro transformaci energetiky

Cestu ze současné energetické krize, ale i řešení pro dlouhodobou energetickou nezávislost a udržitelnost v Česku budou s využitím nízkouhlíkových technologií hledat akademici ve spolupráci s komerčními partnery v rámci Národního centra pro energetiku II (NCE II). Šestiletý projekt, který podpořila Technologická agentura ČR dotací přes 640 milionů korun a v jehož čele stojí Centrum energetických a environmentálních technologií (CEET) VŠB – Technické univerzity Ostrava, klade velký důraz zejména na vodíkové technologie.

„Hlavním cílem projektu je vytvoření komplexní strategie, která Českou republiku vymaní ze závislosti na fosilních palivech a zajistí jí energetickou soběstačnost. Nezbytnost těchto kroků jednoznačně potvrzuje energetická krize související s válečným konfliktem na Ukrajině, na niž jsme museli reagovat a některé původně střednědobé či dlouhodobé záměry výrazně urychlit. V souladu se strategickými dokumenty na národní a mezinárodní úrovni, včetně evropské Zelené dohody, se zaměříme na využití nízkouhlíkových technologií s velkým důrazem na vodík a rovněž na analýzy socio-ekonomických dopadů, které tyto technologické změny mohou vyvolat,“ objasnil hlavní řešitel projektu a ředitel CEET Stanislav Mišák.

Projekt navazuje na předchozí Národní centrum pro energetiku I., do něž se v minulých letech zapojilo 23 subjektů. V NCE II, jenž startuje v lednu, se vzhledem k nutnosti řešit výrazně širší spektrum témat počet partnerů navýší na 34. Jsou mezi nimi výzkumné organizace jako například České vysoké učení v Praze, Vysoké učení technické v Brně, Západočeská univerzita v Plzni, Vysoká škola chemicko-technologická, ale také výzkumné ústavy Akademie věd ČR nebo Centrum výzkumu Řež. Mezi inovačními lídry nechybí například společnosti ČEZ, ČEPS, Veolia Energie ČR a řada dalších.

Vstupní podmínky obou projektů se však výrazně liší. Projekt NCE I vycházel z podmínek před globální krizí, cílil zejména na efektivnější a k životnímu prostředí šetrnější provoz velkých energetických celků a v krátkodobém i střednědobém scénáři počítal s přechodem na plyn jako náhrady za uhlí. V souvislosti s dopady války na Ukrajině se role plynu jako strategické suroviny mění a do popředí se dostávají vodíkové technologie, o jejichž potenciálu již nikdo nepochybuje navzdory jejich vyšší ceně.

„Vodík je strategická surovina nejen pro oblast energetiky, ale také pro oblast průmyslu, kde se zvažuje kompletní elektrifikace jako náhrada za fosilní paliva. Na území ČR jsme schopni si vodík sami vyrobit, distribuovat, využít i ukládat, přestože zejména podmínky pro jeho výrobu z obnovitelných zdrojů nejsou tak výhodné jako například v Německu, kde mají k dispozici velkou síť větrných parků. Přesto zde ale existují možnosti získat ho z alternativních paliv, potažmo odpadů, a tímto směrem se náš výzkum ubírá. Vytváříme tak alternativu v decentralní energetice k další cestě, a to produkci vodíku s využitím energie z malých modulárních jaderných reaktorů. Využití vodíku z alternativních paliv či odpadů je zvažováno především v průmyslu jako případná náhrada koksovatebního uhlí,“ doplnil Mišák.

Výzkum zahrne celou řadu interdisciplinárních témat z oblasti moderní energetiky, environmentálního inženýrství, ale také z energetického strojírenství, odpadového hospodářství, elektrotechniky, informatiky, materiálového inženýrství, technické kybernetiky, automatizační a regulační techniky, elektromobility, systémů akumulace tepla a elektřiny a nejnověji uplatnění nanomateriálů a nanotechnologií. Napříč nimi prochází problematika legislativy, digitalizace a socio-ekonomiky. Projekt potrvá do konce roku 2028.

Celkem bylo do veřejné soutěže programu Národní centra kompetence podáno 44 návrhů projektů, podporu získalo 18 z nich. Kromě NCE II se bude VŠB-TUO podílet na dalších šesti projektech.

- z tiskové zprávy -

Recenzované výzkumné články

Studium solidifikačního chování oceli během plynulého odlévání pomocí teplotního modelu

Study of the Solidification Process during Continuous Casting of Steel by Means of Thermal Model

Ing. Jiří Cibulka, Ph.D.; Ing. Marek Cienciala

TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a. s., Třinec, Technologie a výzkum, Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Česká republika

Cílem předkládaného článku je podrobné studium solidifikačního procesu během odlévání kruhových předlitků průměru 410 mm pomocí teplotního modelu pro různé podmínky odlévání. Kombinací znalosti průběhu křivky solidu po délce lícího oblouku a rozložení kolumnární struktury a rozsahu rozložení semi-makrosegregačních pruhů v rovnoosé struktuře na příčném řezu předlitku bylo možné solidifikační proces rozdělit do 3 fází: kolumnární růst, fluidní rovnoosý růst a nefluidní rovnoosý růst. Teoretickým předpokladem, že při podílu tuhé fáze minimálně 90 % tuhnoucí ocel ztrácí schopnost nasávat mezidendritickou taveninu, pak bylo možno díky výpočtům teplotního modelu také určit údobí tvorby staženin. Ze získaných poznatků vyplynulo, že pro utváření lící struktury málo náchylné k tvorbě vnitřních necelistvostí je důležité dodržovat krátké údobí nefluidního rovnoosého růstu. Pokud se však délka lícího oblouku, na kterém nefluidní rovnoosý růst nastává, zkrátí příliš, významně se prodlouží údobí tvorby vnitřních staženin, což opět vytváří podmínky pro snižování úrovně vnitřní kvality. Dále bylo také prokázáno, že hodnocení vhodnosti nastavení určitých technologických parametrů odlévání pouze na základě podílu rovnoosé struktury, jak je často prováděno, může často vést k nesprávným rozhodnutím.

Klíčová slova: teplotní model; tuhnutí oceli; odlévání plynule litých bloků; litá struktura

The paper is focused on study of the solidification process during continuous casting of round blooms with diameter 410 mm by means of thermal model for different casting conditions (casting speed and overheat). The data were collected for Cr-Mo steel grades. The first stage of the research included investigation of cross section Baumann prints and macroetches which were gathered for cases with no relationship between casting speed and overheat. Baumann prints and macroetches were used for measurement of columnar zone and extent of semi-macrosegregation bands on blooms cross section. Semi-macrosegregation bands existence was also verified by US immersion facility. The knowledge of both columnar and semi-macrosegregation zones distribution on cross sections of blooms and solid curve running along the strand enable to divide the strand into 3 solidification stages: columnar growth, fluid equiaxed growth and rigid equiaxed growth. A theoretical preposition that central shrinkage cavities are formed when solid fraction ratio is 0,9 or more enable to find the very last stage of the solidification process. The observed results show that the critical solidification stage to form cast structure with low risk of having internal discontinuities is the rigid equiaxed growth which should be as short as possible. The benefit is that sucking process of interdendritic melt is significantly reduced in that cases. However, if the rigid equiaxed growth is too short, the final stage with shrinkage cavity formation is prolonged excessively, which leads to a lower cast structure quality again. Based on performed investigation, it was possible to establish a set of solidification parameters including strand lengths with rigid equiaxed growth and shrinkage cavity formation which shall be kept on a certain level for all the technological parameters to provide good quality results. This attitude can also be used for casting optimization of other cast sections. The work also provided one more very important observation which is that it is very dangerous to judge certain casting parameters just according to extend of equiaxed zone on a bloom cross section. General recommendation of many authors is that equiaxed zone should be as wide as it possible but results presented in this paper clearly show that it is not true in every situation and such an attitude can lead to a wrong decision during technology setting.

Key words: thermal model; steel solidification; continuous casting of blooms; cast structure

1. Úvod

Současným trendem v oblasti plynulého odlévání oceli je využívání různých expertních systémů a fyzikálně metalurgických modelů pracujících buď na základě konvenčních rovnic popisujících fyzikálně-chemické procesy, nebo umělé inteligence. Velice progresivní je také využívání tzv. digitálních dvojčat umožňujících sledovat v on-line či off-line režimu průběh metalurgických dějů. Ve všech uvedených případech je však nezbytné umět správně interpretovat pozorované výpočty.

Naprostým základem v oblasti numerických výpočtů plynulého odlévání je pak využití teplotních modelů, které jsou schopny stanovit teplotní pole jak po délce odlévaného předlitku, tak po jeho průřezu. Výsledkem je také znalost délek tekuté fáze a přechodové oblasti mezi solidem a likvidem, na jejichž základě je možné stanovit základní fáze tuhnutí, které po doplnění rozborů makroleptů či Baumannových otisků umožňují velice komplexně popsat celý solidifikační proces.

Výzkumně vývojoví pracovníci Třineckých železáren, a.s., využívají při optimalizaci technologie plynulého odlévání teplotní model 3Q-LPC (Liquid Pool Control), který byl v roce 2019 odladěn a verifikován pro odlévání všech vyráběných formátů. Předkládaný článek se zabývá jeho využitím při studiu solidifikačního procesu během odlévání kruhových předlitků průměru 410 mm z pohledu utváření vnitřní struktury a její náchylnosti k tvorbě vnitřních necelistvostí.

2. Popis modelu a přijaté předpoklady

Model 3Q-LPC je komerčně dostupný off-line teplotní model využívající pro kalkulace tzv. bezsítovou metodu, což je výpočetní přístup založený na systému algebraických rovnic stanovených pro určitou oblast ohraničenou okrajovými podmínkami bez nutnosti

polygonizace sítě. Model tak řeší v systému bodů, pro které není potřeba disponovat informacemi o geometrických spojnicích, matematické rovnice popisující odvod tepla z tuhnoucího předlitku.

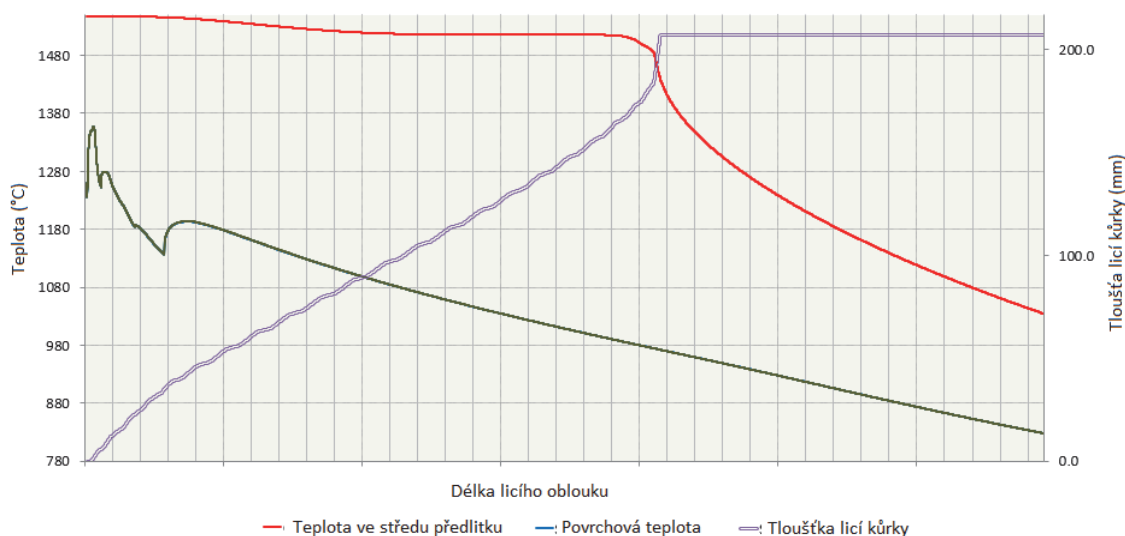
Model má pro jednotlivé skupiny oceli již přednastavené termodynamické vlastnosti a umí pro ně spočítat teploty solidu a likvidu, takže není potřeba mít k dispozici další externí databáze. Umožňuje však také načítat termofyzikální vlastnosti vypočtené „na míru“ přímo dané značce z komerčně dostupných softwarů jako jsou IDS, Computherm či JMatPro.

Numerický model pracuje s licím obloukem rozděleným do tzv. chladících sektorů, které obvykle reprezentují jednotlivé chladicí zóny, případně krystalizátor. Chladicí sektor se dá ale využít také pro vytvoření různých termostabilizačních tunelů, kde dochází např. k zrovnoměnění teplot či jejich zvýšení (ohřevové zóny). Jednotlivé chladicí sektory jsou přednastaveny dle reálných technických uspořádání licích strojů Třineckých železáren, a.s., jsou ale v případě potřeby i editovatelné, takže je možné modelovat dopady nových technologických nástrojů ovlivňujících odvod tepla z předlitků umístěných v licím oblouku.

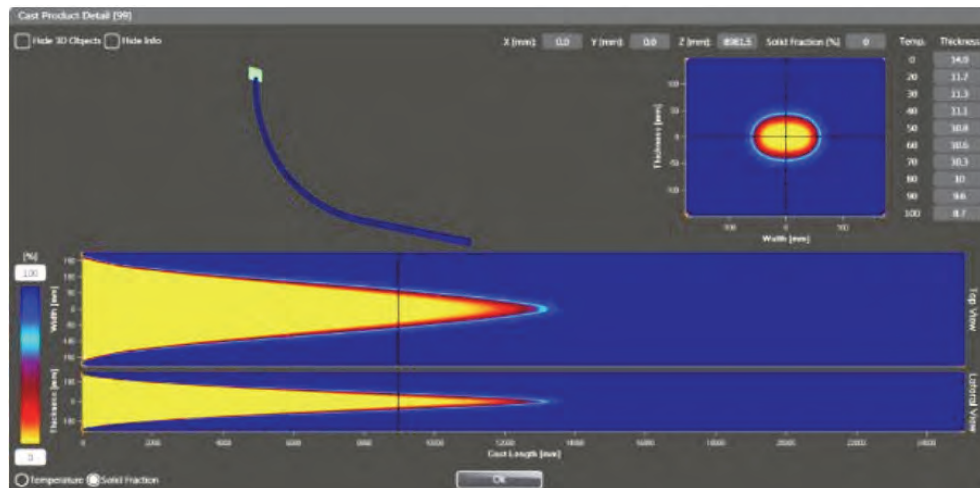
Na základě technologických parametrů odlévání je model schopen stanovit následující údaje:

- teplotní profil a tloušťku licí kůrky podél licího oblouku,
- teplotní profil a tloušťku licí kůrky na příčném řezu,
- distribuci podílu tuhé fáze po délce licího oblouku a v příčném řezu předlitku,
- délky tekuté fáze a přechodové oblasti mezi solidem a likvidem.

Příklady některých výstupů jsou uvedeny na obr. 1 až obr. 3 a souhrnně jsou pro další analýzy výzkumně vývojových pracovníků transportovány do protokolů Excelovského formátu.

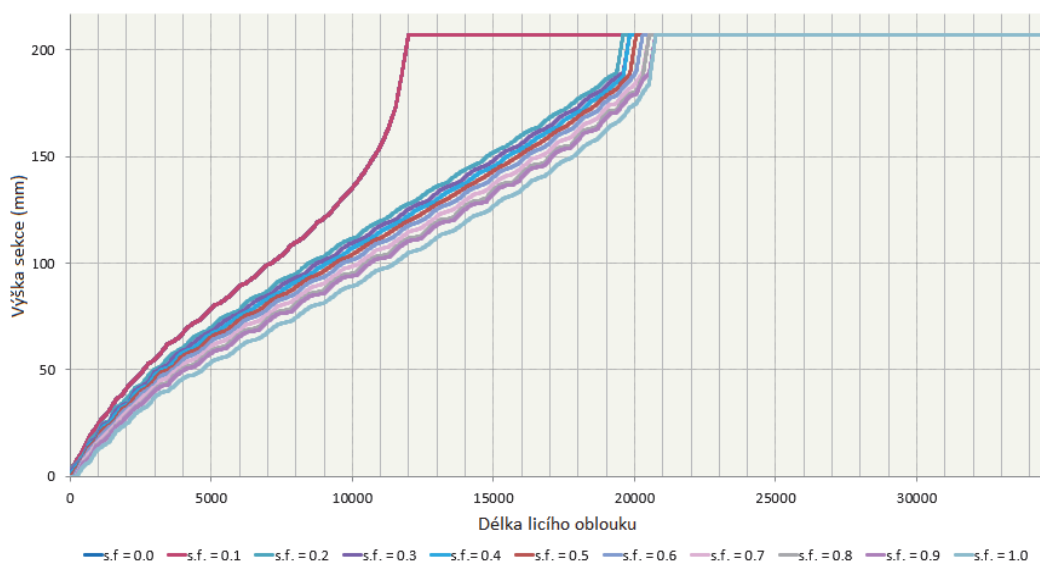


Obr. 1 Výstup modelu - teplotní profil a tloušťka licí kůrky podél licího oblouku
Fig. 1 Model output – temperature distribution and shell thickness along a strand



Obr. 2 Výstup modelu - teplotní profil a tloušťka licí kůrky na příčném řezu

Fig. 2 Model output – temperature distribution and shell thickness on a semis cross section



Obr. 3 Výstup modelu - distribuce podílu tuhé fáze po délce licího oblouku a příčném řezu předlitku

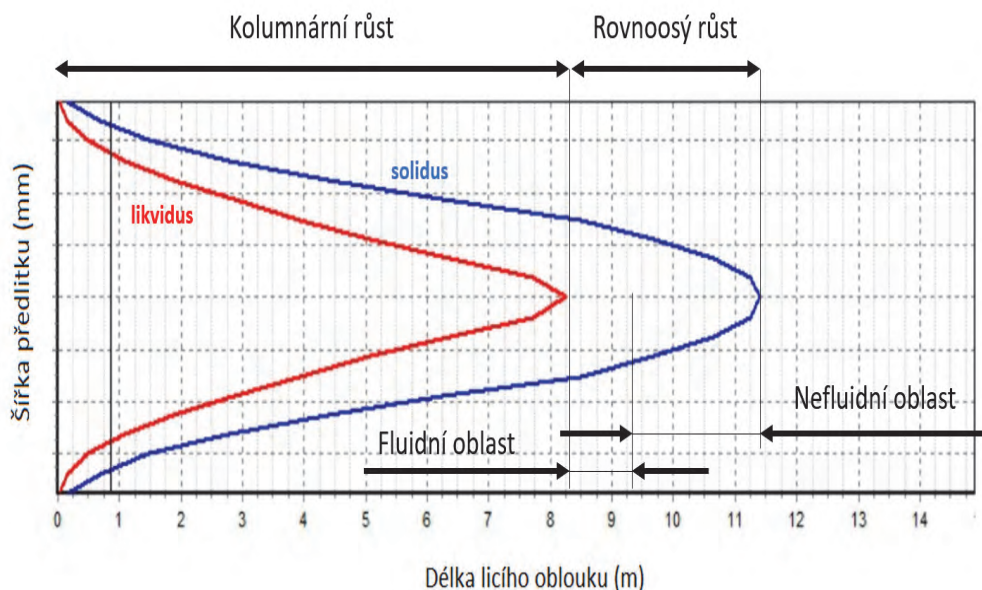
Fig. 3 Model output – solid fraction distribution along a strand and in a semis cross section

Pro vlastní realizaci studia tuhnutí předlitků bylo nezbytné si nejprve nalézt způsob interpretace pozorovaných výsledků. Základním úkolem tak bylo rozdělit licí oblouk do několika oblastí, které by byly relevantní z pohledu vytváření vnitřní struktury. Bylo využito přístupů prací [1, 2], podle kterých je možno licí oblouk v zásadě rozdělit do následujících oblastí:

- oblast kolumnárního růstu, který nastává přibližně po výstupu z krystalizátoru a pokračuje, dokud se ve středu předlitku nevytvoří přechodová oblast mezi solidem a likvidem,
- fluidní přechodová oblast mezi solidem a likvidem, kdy ocel již tuhne v rovnoosém režimu, přičemž je možné její proudění, takže dochází ke kompenzaci objemových změn vyvolaných solidifikačním smrštěním,

- nefluidní přechodová oblast rovnoosého růstu, kdy již proudění oceli není možné, takže se ve struktuře formují vlivem solidifikačního smrštění staženiny, do kterých se nasává zbytková mezidendritická tavenina.

Situace je schematicky znázorněna na obr. 4. Zde je však potřeba konstatovat, že délka křivky likvidu udávající kolumnární růst je zásadně ovlivňována elektromagnetickým mícháním aplikovaným v horních částech licího oblouku (M-EMS a S-EMS), přičemž základní teplotní modely nejsou změny vyvolané elektromagnetickým míchačem schopny zohlednit. Z uvedeného důvodu tak není vhodné slepě spoléhat na výstupy generované modelem, ale je vhodné skutečnou délku křivky likvidu verifikovat.

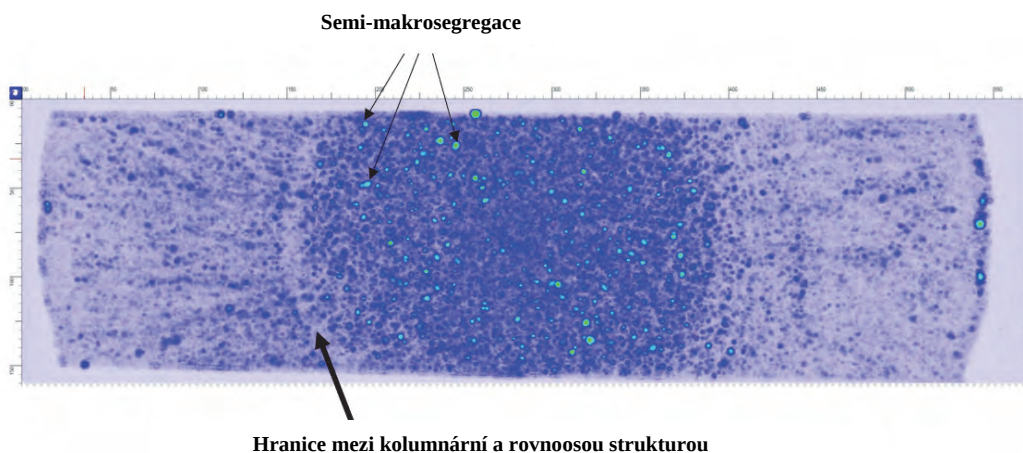


Obr. 4 Schematické znázornění rozdělení lícího oblouku dle návrhu [1] a [2]

Fig. 4 Schematic view on proposed solidification stages along the strand according to [1] and [2]

Velice vhodnou metodiku pro verifikaci délky kolumnárního růstu nabízejí např. autoři [2], podle kterých je možno uvažovat, že v místě přechodu z kolumnárního na rovnoosý růst pozorovaný na příčném řezu předlitku byl podíl tuhé fáze roven jedné, tedy v dané vzdálenosti od povrchu předlitku se musela aktuálně nacházet křivka solidu. Pro odhad délky kolumnárního růstu je tak potřeba pro dané okrajové podmínky odlévání stanovit hloubku zásahu kolumnární struktury od povrchu předlitku směrem do jeho středu např. pomocí Baumannových otisků či makroleptů. Existence Baumannových otisků či makroleptů pro dané podmínky odlévání pak umožňuje stanovit také rozdělení rovnoosého růstu na fluidní a nefluidní část, což je záležitost, kterou teplotní modely nedokáží určit. Pro odhad okamžiku, kdy ocel ztrácí fluidní vlastnosti a

nedochází tak k doplňování taveniny ke kompenzaci solidifikačního smrštění, je nutné stanovit šířku pásma utváření semi-makrosegregačních pruhů. Pokud opět přijmeme předpoklad, že v okamžiku začátku utváření semi-makrosegregačních pásů byl podíl tuhé fáze na obvodu kružnice omezující jejich výskyt na příčném řezu předlitku roven jedné, lze opět díky znalosti průběhu křivky solidu stanovit, v jaké vzdálenosti od krystalizátoru dochází k změně rovnoosého růstu z fluidního do nefluidního režimu. Pro lepší odhad šířky oblasti, kde se semi-makrosegregace v rovnoosé oblasti vyskytují, je vhodné analýzu makroleptů podpořit o jejich rozbor pomocí immersní vany umožňující prozvučení materiálu až na vadu několika desítek mikrometrů, čímž se jednotlivé semi-makrosegregace velice zviditelní (viz obr. 5).



Obr. 5 C-sken příčného řezu předlitku pořízený pomocí immersní vany

Obr. 5 Bloom cross section C-scan from an immersion tank facility

Z pohledu vývoje vnitřní struktury je pak významná také fáze, kdy se celý systém stává tak hustým, že již není možné další nasávání mezidendritické taveniny a formují se pouze staženiny. Fáze tvorby vnitřních staženin je tak úplně poslední fází procesu tuhnutí a je součástí oblasti nefluidního rovnoosého růstu schematicky znázorněného na obr. 4. Pro důvěryhodné stanovení oblasti tvorby vnitřních staženin by bylo nezbytné stanovit rozsah výskytu vnitřních staženin v rovnoosé struktuře, které však pomocí Baumannových otisků, makroleptů či ultrazvukových C-skenů nejsou od semi-makrosegregací prakticky odlišitelné. Oblast tvorby solidifikačního smrštění tak byla pro prezentované účely spočtena pouze teoreticky na základě předpokladu, že k ní dochází, zvýšili se podíl tuhé fáze na minimálně 90 % [3]. Tím byly definovány jednotlivé fáze solidifikačního procesu, které byly pro další studium využity.

3. Návrh studia tuhnutí bloků

Pro vlastní studium solidifikačního procesu bylo následně nutné zajistit dostatečné množství dat, což zahrnovalo jednak analýzu příčných vzorků plynule litých bloků, kde na makroleptech a Baumannových otiscích byly stanovovány hloubky zásahu kolumnární struktury a oblasti s výskytem semi-makrosegregací. Pro vybrané případy pak byly oblasti s výskytem semi-makrosegregací dále verifikovány prozvučením v immersní vaně. Stanovené hloubky zásahu kolumnární struktury a rozsahy oblastí zasažené výskytem semi-makrosegregacemi byly následně konfrontovány s průběhy křivek solidu, které byly spočteny pomocí teplotního modelu 3Q-LPC, díky čemuž byly pro jednotlivé analyzované případy stanoveny délky licího oblouku, kdy nastává:

- kolumnární růst,
- fluidní rovnoosý růst,
- nefluidní rovnoosý růst,
- tvorba vnitřních staženin.

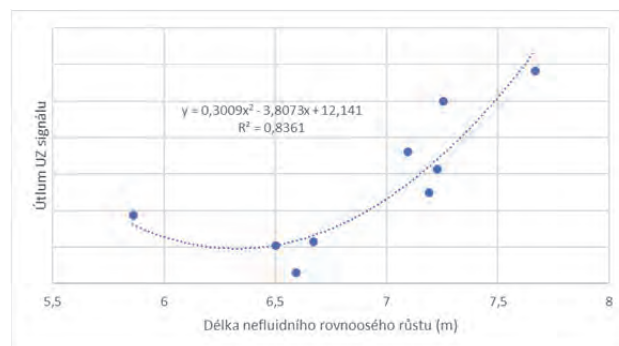
Při výběru vzorkovaných taveb bylo dbáno na skutečnost, aby odlévací rychlost a přehřátí oceli nebyly na sobě závislé. Pozornost byla zaměřena na Cr-Mo oceli odlévané do kruhových předlitků průměru 410 mm. Celkem bylo navzorkováno 53 různých případů a ze získaných dat byly sestrojeny výpočetní kalkulatory predikující délky licího oblouku charakterizované předpokládanými režimy tuhnutí (tedy kolumnárním růstem, fluidním rovnoosým růstem atd).

V následné fázi bylo vybráno devět taveb Cr-Mo ocelí a z každé z nich bylo proválcováno reprezentativní množství kruhových předlitků průměru 410 mm do tyčí s velice nízkým stupněm protváření. Cílem nízkého protváření bylo zajistit prozvučitelnost materiálu konvenčním ultrazvukovým zařízením pro kvantifikaci vnitřní kvality, která by byla indikátorem dopadu daného strukturního uspořádání plynule litých předlitků na výskyt vnitřních necelistvostí válcovaných tyčí. Pro protvářené

tavby byly následně pomocí výpočetních kalkulatorů stanoveny charakteristické délky licího oblouku vykazující definované solidifikační děje (viz obr. 4).

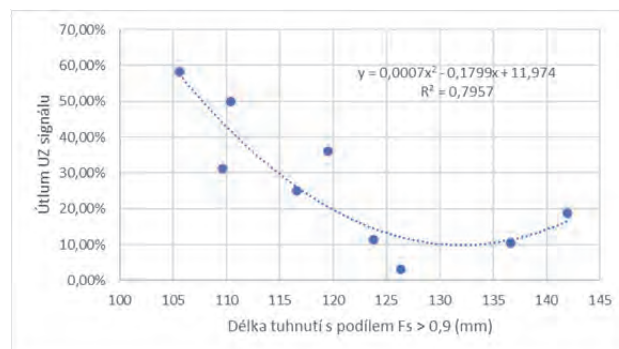
4. Diskuse k dosaženým výsledkům

Z analýzy dat vyplynulo, že klíčovým solidifikačním údobím určujícím vnitřní kvalitu plynule litých bloků je doba nefluidního rovnoosého růstu, který vykazuje silnou korelaci s výstupy ultrazvukové kontroly, což není překvapivé, protože během údobí nefluidního rovnoosého růstu se generují staženiny, které se z části vyplní mezidendritickou staženinou. Z obr. 6 je však patrné, že předpokládané pozitivní ovlivnění vnitřní struktury plynule litých předlitků s kratší dobou nefluidního rovnoosého růstu nastává pro studované podmínky pouze do její délky cca 6,5 m a pokud se nefluidní fáze rovnoosého růstu dále zkrátí, začíná se vnitřní struktura vyvíjet zcela neočekávaným způsobem. Jedná se tak o velice překvapivý výsledek, vysvětlení však nabízí délka licího oblouku, kdy dochází k tvorbě vnitřních staženin (tedy s podílem tuhé fáze 90 % a více), která vykazuje s výsledky ultrazvukové kontroly obdobnou korelaci jako nefluidní fáze rovnoosého růstu, ovšem zcela inverzně (obr. 7). Z uvedeného tak vyplývá, že čím je v licím oblouku delší oblast s nefluidním rovnoosým růstem, tím kratší je délka licího oblouku, kdy je ocel tak hustá, že již není možné nasávání zbytkové mezidendritické taveniny a dochází k tvorbě staženin (viz obr. 8).



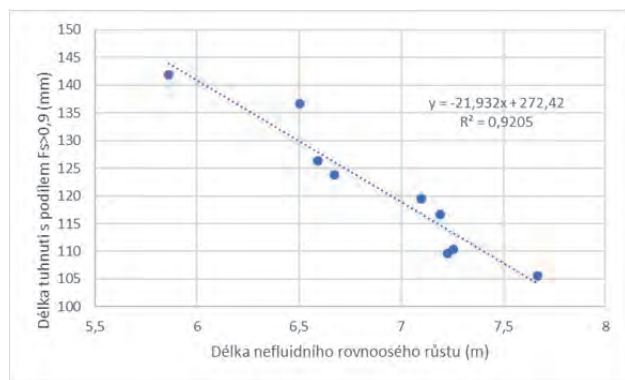
Obr. 6 Vliv nefluidního rovnoosého růstu na útlum UZ signálu protvářeného materiálu

Fig. 6 Impact of rigid equiaxed growth on US results of rolled material



Obr. 7 Vliv doby tuhnutí s podílem tuhé fáze min. 0,9 na útlum UZ signálu protvářeného materiálu

Fig. 7 Impact of solidification mode with solid fraction min. 0,9 on US results of rolled material



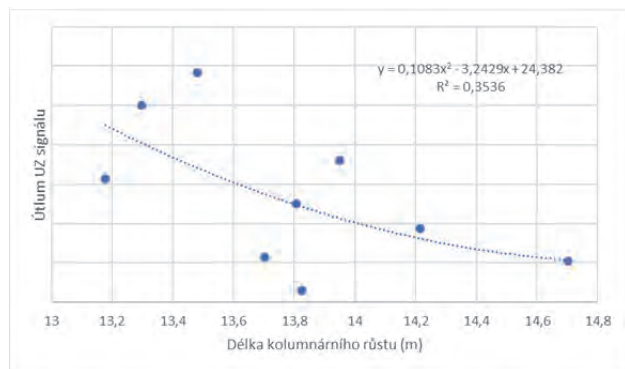
Obr. 8 Vztah mezi nefluidním režimem rovnoosého růstu a tuhnutí s podílem tuhé fáze min. 0,9

Fig. 8 Relationship between rigid equiaxed growth and mode with solid fraction min. 0,9

Z obr. 6 až obr. 8 tak vyplývá, že procesní parametry odlévání (odlévací rychlost a přehřátí) musí být nastaveny tak, aby byla co nejkratší délka licího oblouku, kdy dochází k nefluidnímu režimu rovnoosého růstu (tedy formují se staženiny, do kterých se nasává mezidendritická tavenina), nicméně tato oblast nesmí být příliš krátká, jinak se nepřiměřeně prodlouží údobí, kdy je systém natolik hustý, že se již jen formují vnitřní

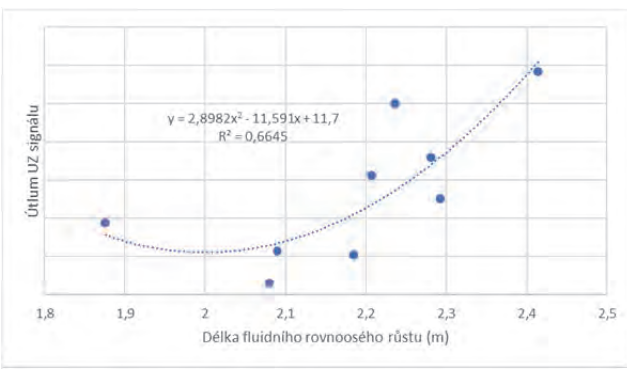
staženiny, do kterých není možné zbytkovou taveninu nasát. Na základě navrženého postupu tak lze pro jednotlivé formáty a jakosti určit kritická údobí nefluidního rovnoosého růstu a formování staženin, které zajistí vhodnou licí strukturu z pohledu vnitřní kvality plynule litých předlitků.

Pro úplnou prezentaci pozorovaných skutečností jsou pak na obr. 9 a obr. 10 uvedeny korelace mezi výsledky ultrazvukové zkoušky a kolumnárním, resp. fluidním rovnoosým růstem. Oba parametry vykazují s útlumem ultrazvukového signálu taktéž jasně patrné korelace, jejich průběhy jsou ale v rozporu s běžně uznávanými teoriemi a jsou tak spíše důsledkem příhodných (či méně příhodných) délek nefluidního režimu rovnoosého růstu a finální fáze tuhnutí s podílem tuhé fáze 90 % a více pro dané podmínky odlévání. Kdyby tomu tak nebylo, vyplývalo by např. z obr. 9, že delší délka licího oblouku, kdy ocel tuhne kolumnárně, generuje licí strukturu, která je na výskyt vnitřních necelistvostí vhodnější. Přitom výsledkem delšího úseku licího oblouku s kolumnárním růstem musí být nižší rozsah výskytu rovnoosé struktury, což většina autorů považuje za velice nepříznivý výsledek [4-7].



Obr. 9 Vliv kolumnárního růstu na útlum UZ signálu protvářené materiálu

Fig. 9 Impact of columnar growth on US results of rolled material



Obr. 10 Vliv fluidního rovnoosého růstu na útlum UZ signálu protvářené materiálu

Fig. 10 Impact of fluid equiaxed growth on US results of rolled material

Skutečnosti pozorované na obr. 9 a obr. 10 tak jasně dokazují, že v případě nastavování technologie plynulého odlévání je vždy nezbytné provést velice komplexní a sofistikované vyhodnocení procesu tuhnutí a neomezovat se pouze na hodnocení vlivu technologických parametrů na podíl rovnoosé struktury, jak je často prováděno.

5. Závěry

V rámci výzkumných činností byla provedena velice podrobná studie solidifikačního procesu kruhových předlitků průměru 410 mm. Pro studium bylo využito teplotního modelu 3Q-LPC, který na základě procesních parametrů odlévání a přednastavených knihoven s termodynamickými vlastnostmi ocelí umí spočítat teplotní pole předlitku a křivky solidu a likvidu po délce licího oblouku. Díky znalosti vývoje křivky solidu ve směru odlévání a znalosti zásahu kolumnární struktury

a rozsahu oblasti s výskytem semi-makrosegregací bylo možno v souladu s přístupy [1, 2] rozdělit solidifikační proces po délce licího oblouku do tří režimů: kolumnární růst, fluidní rovnoosý růst a nefluidní rovnoosý růst. Díky předpokladu, že při podílu tuhé fáze 90 % a více již není dále možné nasávání mezidendritické taveniny [3], pak bylo možné stanovit také délku licího oblouku, na které nastává formování staženin.

Z výsledků analýz vyplynulo, že pro zajištění licí struktury s minimální náchylností k tvorbě vnitřních necelistvostí je nutné nastavit procesní parametry odlévání (tj. přehřátí a odlévací rychlost) tak, aby byla délka licího oblouku tuhnoucího v režimu nefluidního rovnoosého růstu sice co nejkratší, ovšem tato oblast nesmí být příliš krátká, jinak se významně prodlouží oblast licího oblouku, ve které se formují vnitřní staženiny, což vede k opětovnému k méně příznivým výsledkům.

Dále se také prokázalo, že hodnocení výsledné kvality lící struktury pouze na základě hloubky zásahu kolumnární struktury či rozsahu rovnoosé oblasti pak mohou v některých případech vést k velice nešťastným rozhodnutím o vhodnosti či nevhodnosti daných technologických parametrů odlévání.

Literatura

- [1] HOU, Z. and CHENG, G. Characteristics and a novel quantitative model of macrosegregation in continuously cast high-carbon billets. In *AISTech Proceedings*, Atlanta, 2012, p. 1229-1238. ISBN 978-1-935117-24-7.
- [2] CIBULKA, J. *Studium tvorby segregací v podmínkách sochorovného zařízení plynulého odlévání oceli*. Disertační práce, Ostrava, 2015.
- [3] ARMENANTE, P., MICONI, A. and PARDELA, P. Dynamic mechanical soft reduction for quality improvements. ECCO 2021, Bari, 2021.
- [4] CHOUDHARY, S.K. and GANGULY, S. Morphology and segregation in continuously cast high carbon steel billets. *ISIJ International*, 47 (2007) 12, 1759-1766. ISSN 1347-5460.
- [5] SCHOLE, A. Segregation in continuous casting. *Ironmaking and steelmaking*, 32 (2005) 2, 101-108. ISSN 0301-9233.
- [6] DISERENS, M., HÄTÖNEN, T., RISTIMÄKI, E. and TUKIAINEN, M. Experiences on continuously cast billets influenced by electromagnetic stirring below mould. *Scandinavian journal of metallurgy*, 10 (1981), 19-23.
- [7] MOREAULT, J., LIMOGES, J. and BEITELMAN, L. EMS intensity as a critical factor in controlling segregation in high carbon steel billets. In *Iron & steel technology conference*. Charlotte, North Carolina, USA, 2005, 14.

OKD má dostupné uhlí zhruba na 6 let těžby

MLADÁ FRONTA DNES MSK, 30. 11. 2022, s. 13, (D. Štalmach)

Důl ČSM je posledním činným černouhelným dolem v ostravsko-karvinském revíru. Jeho konec bude zároveň koncem těžby černého uhlí v České republice.

V současnosti je konec těžby naplánován na přelom let 2023/2024 s tím, že přesněji bude určen podle stavu dotěžitelných zásob. V příštím roce bude aktivních celkem devět porubů. Podle ředitele provozu firmy OKD bude nutné pro celkovou přípravu vyrazit přibližně 7,8 km chodeb.

O případném dalším prodloužení těžby v dole ČSM by se mělo rozhodnout v polovině příštího roku. Pro případné schválení další těžby je nutná studie EIA vypracovaná na dobu od roku 2024 do ukončení hornické činnosti, jejíž podmínky byly aktualizovány pro případnou těžbu v roce 2024 a 2025 včetně technické likvidace dolu. V současné době je platná dokumentace EIA z roku 2022, která byla prodloužena do konce roku 2026. Jsou v ní dostatečné objemy těžby pro celý rok 2023.

Celkově by se podle navrhované studie EIA dalo v rámci Dolu ČSM vytěžit necelých šest milionů tun uhlí. Podle výkonného ředitele OKD byl celkový plánovaný objem těžby stanoven na zhruba 5,7 milionu tun uhlí vytěženého z Dolu ČSM do ukončení hornické činnosti. Studie se zabývá i těžbou plynu související s dobýváním uhlí. Roční těžba plynu je předpokládána ve výši 2,9 (ČSM Sever) a 4,3 (ČSM Jih) tun za rok.

Studie vypracovaná nedávno státním podnikem Diamo řešila obnovení těžby na dolech Darkov a ČSA. Podle dostupných údajů je v dolech ČSA a Darkov 14 mil. t. vytěžitelných zásob uhlí. Těžit by se mohlo po náběhu přes 1 milion tun ročně. Závěry studie ale návratu na uzavřené šachty příliš šanci nedávají. Cena za obnovení těžby by totiž byla zhruba deset miliard korun a příprava by trvala šest let.

Fyzikální a matematická simulace spojitého válcování a ochlazování HSLA oceli

Physical and Mathematical Simulation of Continuous Controlled Rolling and Cooling of HSLAS

doc. Ing. Richard Fabík, Ph.D.¹; Ing. Tomáš Kubina, Ph.D.¹; Ing. Michal Sauer¹; prof. Ing. Ivo Schindler, CSc.²; Ing. Stanislav Rusz, Ph.D.²

¹ Liberty Ostrava a.s., Výzkum – Nové výrobky, Vratimovská 689/117, 719 00 Ostrava-Kunčice, Česká republika

² VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika

Pomocí laboratorního válcování na polo-spojitě válcovací trati niobem mikrolegovaných ocelových tyčí byla na VŠB – Technické Univerzitě Ostrava provedena zjednodušená simulace vlivu podmínek válcování a ochlazování při válcování tyčí na Středojemné válcovně v Liberty Ostrava a.s. Experimentálně byla stanovena teplota nulové rekrytalizace. Byly stanoveny strukturní a mechanické vlastnosti tyčí ovlivněné teplotou doválcování v širokém rozmezí teplot od 700 do 1000 °C) a způsobem konečného ochlazování vývalků. Laboratorní válcování bylo použito pro verifikaci modelu vývoje mikrostruktury, který byl vyvinut v Liberty Ostrava a.s. za účelem možnosti optimalizace výrobní technologie s ohledem na zavádění nových jakostí ocelí.

Klíčová slova: laboratorní válcovna; HSLA ocel; teplota nulové rekrytalizace; řízené válcování; zrychlené ochlazování; zkouška tahem; model vývoje mikrostruktury; matematické modelování

A hot semi-continuous laboratory mill was used for a simplified simulation of rolling the niobium-microalloyed steel bars. The non-recrystallization temperature was determined experimentally. The structural and mechanical properties of the bars affected by the finish-rolling temperature (700 – 1000°C) and the method of final cooling were determined. Continuous laboratory rolling of an HSLA steel with 0.16% C, 1.34% Mn and 0.027% Nb confirmed the main advantage of this method compared to the use of a hot deformation simulator (which provides more accurate temperature control). Due to their size and shape, the resulting laboratory rolled bars enable standard mechanical properties testing, even if the results are subject to greater variance than, for example, in operating conditions.

The highest rolling temperature, after which no recrystallized austenite grains appeared in the structure, was 790°C.

By lowering the finish-rolling temperature to 700 – 750°C, it was possible to refine the final ferritic grain below 3.5 µm, which led to yield stress of up to 576 MPa and ductility above 30 %. Tensile strength was only slightly affected by the experimental conditions. Accelerated cooling with water jets led to an increase in the strength properties and a decrease in ductility. Although continuous finish rolling was started in a wide temperature range of 700 – 1000°C, the temperature trends of the resulting properties were not fundamentally influenced by the predicted regions with different phase composition (transformation temperature $A_{r3} = 714 - 748^\circ\text{C}$ according to deformation temperature) or the non-recrystallization temperature determined as 790°C. The microstructure evolution during laboratory rolling was simulated using the microstructure evolution model developed at Liberty Ostrava. The results showed a very good agreement between the real and predicted ferritic grain size, and also helped to clarify which structure-forming processes taking place in the steel.

Key words: laboratory rolling mill; HSLA steel; non-recrystallization temperature; controlled rolling; accelerated cooling; tensile test; microstructure evolution model; mathematical simulation

Úvod

Jedním z charakteristických rysů spojitě Středojemné válcovny v Liberty Ostrava a.s. je velmi široké portfolio vyráběných vývalků. Válcovna v sortimentu tyčí a profilů vyrábí více než 400 různých profilorozměrů.

Potřeba lépe řídit probíhající strukturotvorné procesy během válcování se objevila v souvislosti s vývojem

jakosti oceli S355J2 ve stavu dodání +N. Jedná se o stav, který odpovídá normalizačnímu válcování nebo žihání. Velikost zrna oceli je zde hlavně řízena dynamickou rekrytalizací, která pokud je zcela ukončena po posledním úběru zajistí, že vlastnosti oceli budou stejné ve stavu po válcování, jako i ve stavu po normalizačním žihání. Dalším tepelným zpracováním tak nedojde ani ke zhoršení vlastností oceli, jako v případě

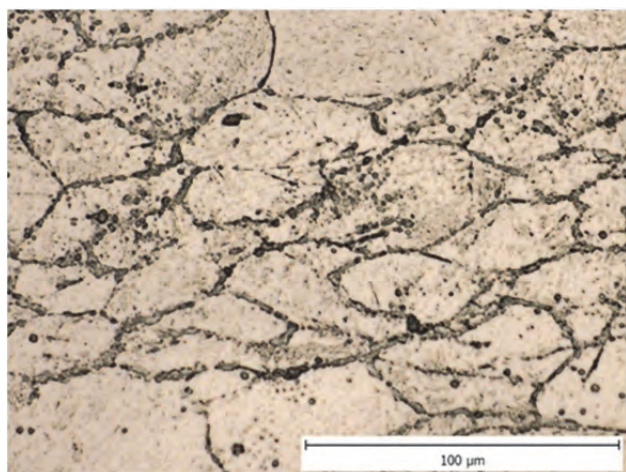
oceli ve stavu +M (po termomechanickém válcování, kdy poslední úběry probíhají bez rekrystalizace a dochází tak ke kumulaci deformace v austenitu a následně ke vzniku jemnozrného feritu) a ani ke zlepšení vlastností, jako je tomu často u ocelí ve stavu +AR (tedy po konvenčním válcování, kdy je vlivem vysokých doválcovacích teplot struktura oceli poměrně hrubozrná).

Analýza strukturotvorných procesů u tak velkého množství vývalků se neobešla bez matematického modelování. Proto byl na oddělení Výzkum Liberty Ostrava a.s. vytvořen model vývoje mikrostruktury, díky kterému je možno velmi efektivně analyzovat a optimalizovat úběrové plány z hlediska probíhajících strukturotvorných procesů (úplná nebo částečná rekrystalizace, precipitace a hrubnutí zrna).

Pro verifikaci vytvořeného modelu bylo využito, ve spolupráci s VŠB-TUO, laboratorní válcování na polospojité válcovně [1]. Výsledky verifikace jsou uvedeny v této práci.

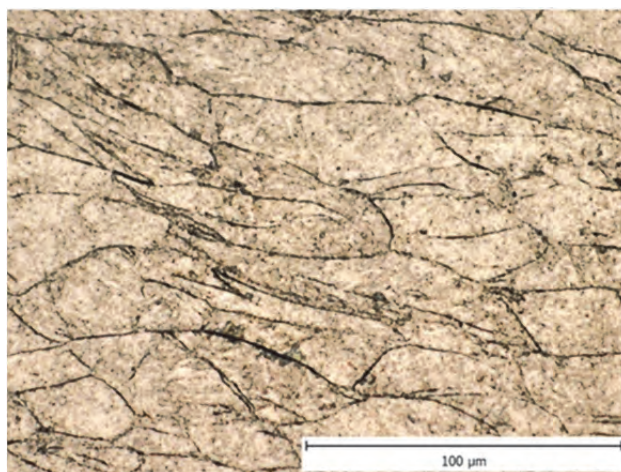
1. Teplota nulové rekrystalizace

K laboratorním experimentům byla dodána tyč o průměru 25 mm vyválnovaná na SJV LO z niobem mikrolegované oceli.



Tyče byly ohřáty v elektrické odporové peci na teplotu 1220 °C po dobu 30 minut. To jsou podmínky, které by, dle dřívějších výzkumů [2], měly zaručit úplné rozpuštění precipitátů typu NbX, které se v oceli vyskytují. Po ohřevu byly tyče převálnovány dvěma vratnými úběry (plochý ovál – kruh) na průměr 20 mm. Následovala prodleva a volné ochlazování na vzduchu na teplotu v rozmezí 900 až 700 °C, poslední plochý úběr na tloušťku přibližně 7 mm, prodleva 5 s a zafixování výsledné struktury rychlým zakalením do vody.

Původní austenitické zrna bylo vyhodnoceno metalograficky pomocí metody popouštěcí křehkosti v oblasti největší intenzity deformace (střed vývalku) v podélném směru. Nejvyšší válcovací teplota, při které byla ve struktuře pozorována nerekrystalizovaná austenitická zrna, byla 790 °C (viz obr. 1). Takto nízká teplota nulové rekrystalizace (TNR) je překvapivá pouze zdánlivě. Jak bylo potvrzeno v pracích jiných autorů [3, 4], způsobuje intenzivní deformace pokles TNR u HSLA ocelí o více než 100 °C.



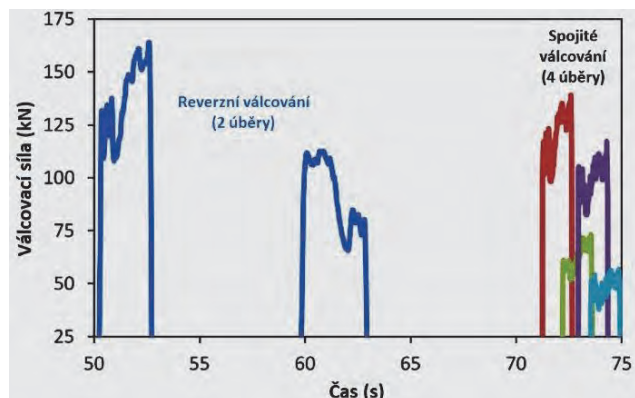
Obr. 1 Rekrystalizované austenitické zrna po válcování při teplotě 810 °C (vlevo), deformované austenitické zrna po válcování při teplotě 790 °C (vpravo)

Fig. 1 Recrystallized austenitic grains after rolling at 810 °C (left), flattened grains after rolling at 790 °C (right)

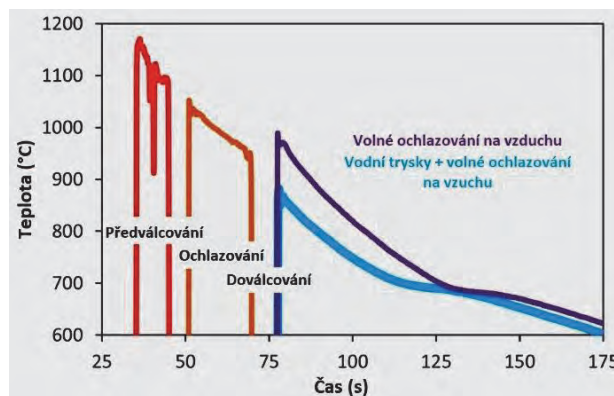
2. Řízené válcování a ochlazování

Tyče byly opět ohřáty na teplotu 1220 °C a reverzně proválnovány na průměr 20 mm. Poté byly rychle přesunuty ke spojitému pořadí laboratorní válcovací tratě. Zde čekaly pod teplotním skenerem na doválcovací teplotu, která se pohybovala v rozmezí 1000 až 700 °C. Následovalo válcování čtyřmi úběry na průměr 12,3 mm.

Během spojitého válcování se rychlost tyče postupně zvyšovala z 1 na 2,1 m·s⁻¹. Časový průběh válcování je zřejmý ze záznamu válcovacích sil na obr. 2. Bezprostředně po válcování chladly tyče volně na vzduchu nebo zrychleně o 100 °C pomocí nastavitelných vodních trysek. Příklad záznamu teplot je uveden na obr. 3. Jeden vzorek byl po vyválnování zakalen ve vodě.



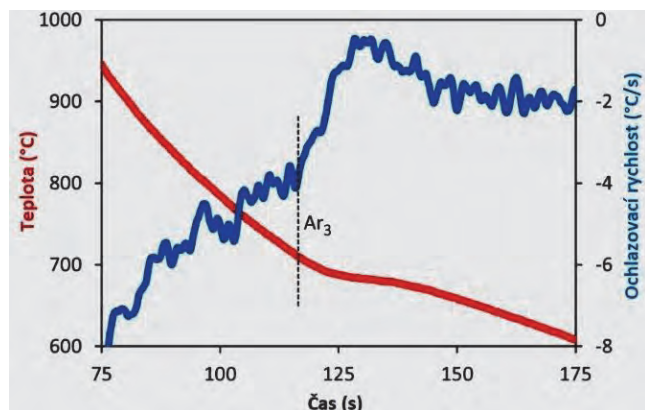
Obr. 2 Časový záznam válcovacích sil (doválcovací teplota 1000 °C)
Fig. 2 Time sequence of roll separating force (finishing temperature of 1000°C)



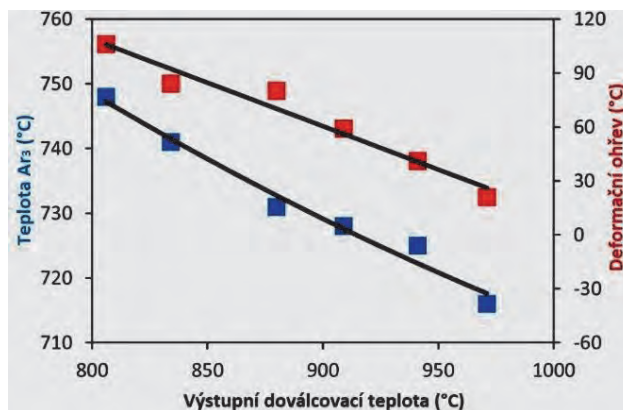
Obr. 3 Časový záznam teplot (doválcovací teplota 950 °C)
Fig. 3 Time sequence of temperature (finishing temperature of 950°C)

Pomocí numerické derivace ochlazovacích křivek bylo možno získat časové závislosti skutečné ochlazovací rychlosti a následně, ze změny jejich trendu, také teploty fázové transformace austenit – ferit (Ar_3) (viz obr. 4).

Hodnoty Ar_3 rostou se snižující se doválcovací teplotou. Vzhledem k významnému vzniku deformačního tepla je nutno rozlišovat vstupní a výstupní doválcovací teplotu (viz obr. 5).



Obr. 4 Ochlazovací křivka a rychlost ochlazování (doválcovací teplota 950 °C)
Fig. 4 Cooling curve and cooling rate after finishing at 950°C

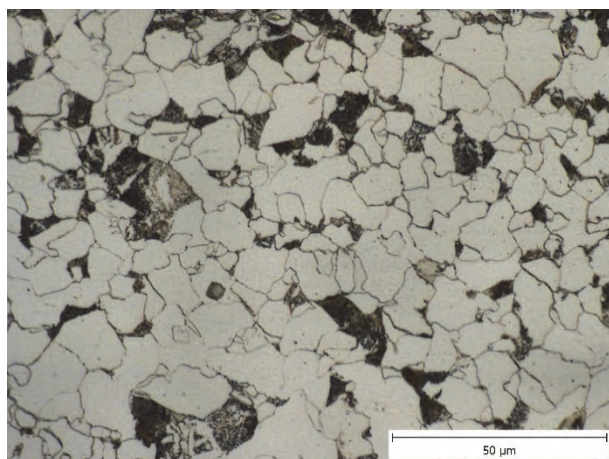


Obr. 5 Vliv výstupní doválcovací teploty na deformační ohřev a transformační teplotu
Fig. 5 Influence of output finishing temperature on deformation heating and transformation temperature

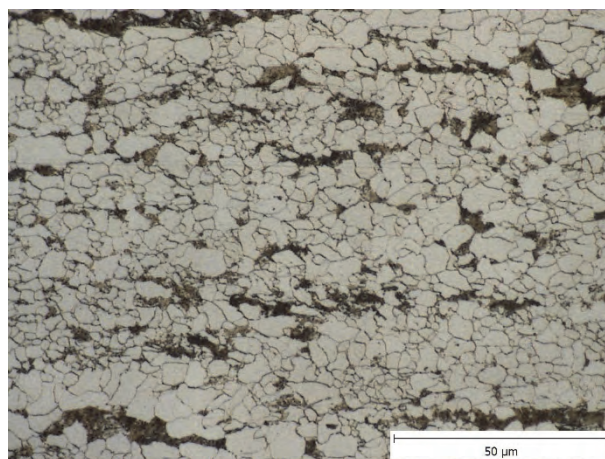
3. Mikrostruktura a mechanické vlastnosti

Pomocí optické mikroskopie bylo zjištěno, že struktura výsledných tyčí je tvořena hlavně rekrystalizovaným feritem a perlitem, a to dokonce i při doválcování ve feritické oblasti. Výjimkou je pochopitelně jedna kalená tyč, kdy je struktura tvořena převážně bainitem s malým podílem martenzitu (viz obr. 6). Se snižující se teplotou se snižuje velikost feritického zrna, ale heterogenita a rádkovost struktury roste.

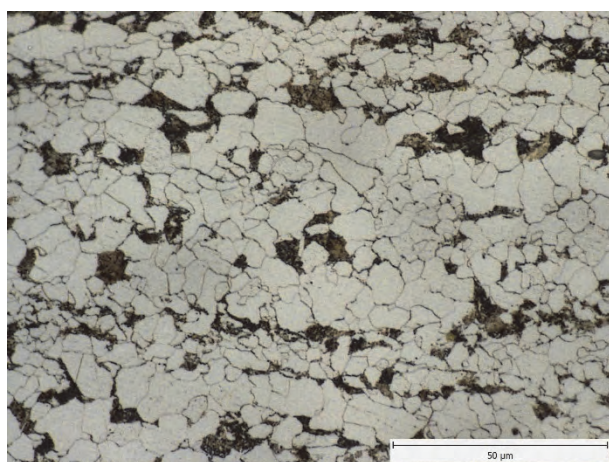
V tab. 1 jsou uvedeny hodnoty výsledné velikosti feritického zrna (s intervalem spolehlivosti 95 % z 200 měření) a mechanické vlastnosti stanovené pomocí zkoušky tahem při pokojové teplotě (uvedena je směrodatná odchylka ze tří měření) pro všechny varianty válcování a ochlazování.



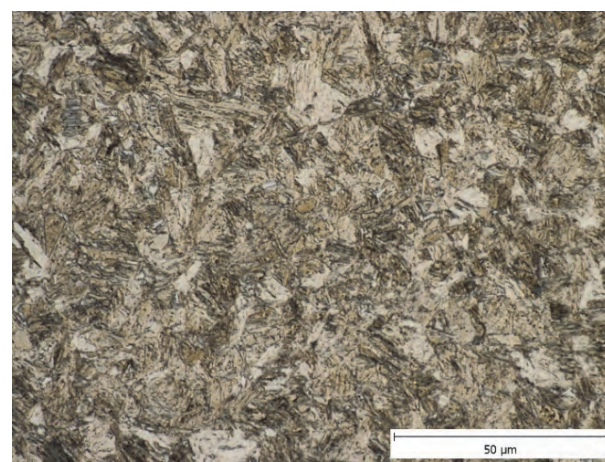
a) doválcování při 950 °C, volné ochlazování
a) finishing at 950°C, free cooling



b) doválcování při 700 °C, volné ochlazování
b) finishing at 700°C, free cooling



c) doválcování při 850 °C, zrychlené ochlazování
c) finishing at 850°C, accelerated cooling



d) doválcování při 950 °C, kalení
d) finishing at 950°C, quenching

Obr. 6 Příklady výsledných mikrostruktur

Fig. 6 Examples of final microstructures

Tab. 1 Mechanické a mikrostrukturní vlastnosti laboratorních vývalků

Tab. 1 Mechanical and structural properties of the laboratory rolled bars

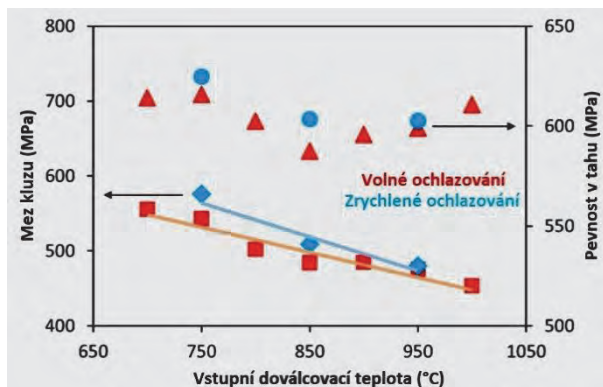
Způsob ochlazování	Vstupní doválcovací teplota	Mez kluzu	Pevnost v tahu	Tažnost	Velikost feritického zrna
	[°C]	[MPa]		[%]	[μm]
Volné	1000	454 ± 2	611 ± 0	29,7 ± 1,2	6,9 ± 0,6
	950	476 ± 8	599 ± 8	29,9 ± 2,2	7,2 ± 0,5
	900	485 ± 5	596 ± 0	31,3 ± 0,8	5,6 ± 0,4
	850	484 ± 11	588 ± 6	29,5 ± 2,6	5,4 ± 0,4
	800	502 ± 7	603 ± 3	31,9 ± 0,8	4,2 ± 0,6
	750	543 ± 3	616 ± 5	31,7 ± 0,9	4,1 ± 0,3
	700	556 ± 5	614 ± 3	32,8 ± 0,4	3,5 ± 0,2
Zrychlené	950	480 ± 3	603 ± 9	28,0 ± 1,8	7,0 ± 0,5
	850	509 ± 12	604 ± 5	28,9 ± 2,2	5,6 ± 0,3
	750	576 ± 16	625 ± 5	30,3 ± 1,8	3,3 ± 0,2
Kalení	950	1046 ± 23	1387 ± 6	15,3 ± 0,6	nehodnoceno

Z grafů na obr. 7 je zřejmé, že mez kluzu a tažnost roste téměř lineárně s klesající dovalcovací teplotou. Tažnost tyče dovalcované při 850 °C je ovlivněna jednou odlehlou hodnotou, která byla zřejmě způsobena nějakou strukturální anomálií.

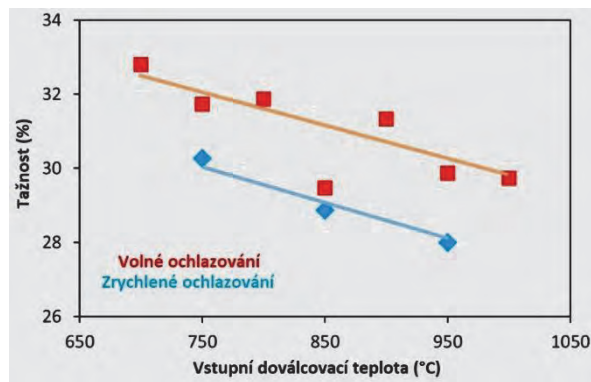
Zrychlené ochlazování vede k mírnému zvýšení pevnostních vlastností a k relativně významnému poklesu tažnosti. Při nejnižších dovalcovacích teplotách bylo

dosaženo velikosti feritického zrna pod 3,5 μm . Mez kluzu není ovlivněna pouze velikostí zrna, ale s největší pravděpodobností také rozdílnou kinetikou precipitace částic NbX pro různé dovalcovací teploty.

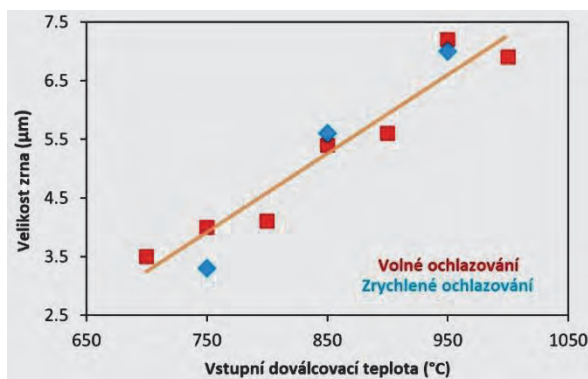
Zakalená struktura vykazuje zhruba dvojnásobné pevnostní vlastnosti při poloviční, ale pořád relativně vysoké tažnosti.



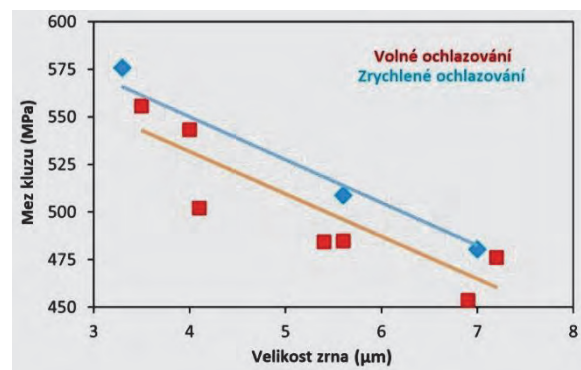
a) teplotní závislost pevnostních vlastností
a) temperature dependence of the strength properties



b) teplotní závislost tažnosti
b) temperature dependence of ductility



c) teplotní závislost velikosti zrna
c) temperature dependence of grain size



d) mez kluzu ovlivněná velikostí zrna
d) yield stress influenced by the grain size

Obr. 7 Srovnání finálních mechanických vlastností
Fig. 7 Comparison of the final mechanical properties

4. Matematické modelování vývoje mikrostruktury při laboratorním válcování

K těmto simulacím byl použit v Liberty Ostrava vyvinutý model vývoje mikrostruktury. Model má podobu excelovské tabulky a vychází z přístupu, který použil J. J. Jonas a jeho dílčí submodely a použité rovnice jsou představeny v literatuře [5-19]. Model je určen pouze pro simulace válcování v oblasti austenitu. Vstupními proměnnými modelu jsou: chemické složení oceli (C, Mn, Si, Nb), velikost zrna austenitu po ohřevu, teplota (stanovená na základě provozních měření či PC simulací), intenzita deformace, rychlost válcování (slouží pro výpočet rychlosti deformace) a čas mezi úběry. Model dopočítává tyto vstupní proměnné: skutečnou délkovou deformaci, střední rychlost deformace a Zener-

Hollomonův parametr. Pro jeho výpočet je nutná znalost aktivační energie Q , která se stanoví buď výpočtem na základě chemického složení oceli, nebo se získá z literatury pro oceli mikrolegované Nb [11].

Výstupem modelu jsou informace o průběhu deformačně indukované precipitace (DIP), která je vypočítána na základě těchto parametrů:

- K_s – koeficient přechlazení oceli vůči teplotě ohřevu,
- $t_{0,05P}$ – čas počátku precipitace při dané teplotě (počítá se pomocí modifikovaného modelu Dutta-Sellars autorů Siciliano a Jonas [10-12], s konstantami $A = 3 \cdot 10^{-6}$ a $B = 2.5 \cdot 10^{10} (\text{K}^3)$). Tato modifikace bere do úvahy vliv Mn (zvyšuje rozpustnost Nb v oceli a tím oddaluje precipitaci) a Si (snižuje rozpustnost Nb v oceli a tím urychluje precipitaci),

- $\Sigma t_p/t_{0,05P}$ – ukazatel, který postupně sčítá příspěvky jednotlivých průchodů na dosažení času počátku precipitace, pokud jeho hodnota dosáhne 1, pak došlo k precipitaci.

Informace o průběhu dynamické rekrytalizace (DRX), která je vypočítána pomocí těchto parametrů:

- e_d – kumulovaná deformace. Pokud po předchozím úběru nedošlo k úplnému uzdravení pomocí postdynamické rekrytalizace (metadynamická rekrytalizace (MDRX), nebo statická rekrytalizace (SRX)) přičítá se k deformaci v aktuálním úběru poměrná část deformace (podle velikost podílu rekrytalizované struktury X) z úběru předcházejícího.
- e_{cr} – kritická deformace pro začátek DRX, která se počítá pomocí deformace do píku (je funkcí Zener-Hollomonova parametru) a bere v úvahu vliv Nb ekvivalentu.
- X_{dyn} – Podíl dynamicky rekrytalizovaného zrna – počítá se pomocí modifikované Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) rovnice, s využitím deformace potřebné pro uzdravení poloviny struktury $e_{0,5}$.

Dále jsou výstupem informace o průběhu postdynamické rekrytalizace (SRX nebo MDRX), která je vypočítána pomocí těchto parametrů:

- X – Podíl postdynamicky rekrytalizovaného zrna – počítá se pomocí JMAK rovnice s využitím času potřebného pro uzdravení poloviny struktury $t_{0,5}$.
- $t_{0,5}$ – čas potřebný pro uzdravení se počítá zvlášť pro SRX a zvlášť pro MDRX (pokud v předchozím úběru byla zahájena DRX).
- Velikost zrna, která představuje vstupní hodnotu pro následující úběr, jako výběr z několika možností:
 - o D_{rx} – velikost rekrytalizovaného zrna (SRX nebo MDRX), tato hodnota nikdy není použita pro další úběr, protože vždy může nastat pouze jedna z těchto variant:
 - Rekrytalizace skončila – počítá se hrubnutí zrna po SRX nebo MDRX,
 - Rekrytalizace neskončila – počítá se průměrná velikost zrna.
 - o D_{gg} – velikost zrna po hrubnutí zrna (grain growth) bere v úvahu, zda proběhla precipitace a projeví se brzdicí účinek precipitátů na pohyblivost hranic zrn,
 - o Střední deformační odpor podle Misaky i modifikovaný pro mikrolegované oceli podle Siciliana a Jonase [11].

Na základě dřívějších výsledků plastometrických simulací [2], byl model modifikován tak, aby se lépe hodil pro simulace válcování dlouhých vývalků. Modifikace modelu je představena v práci [20] a spočívá v logičtějším propojení procesů rekrytalizace a precipitace.

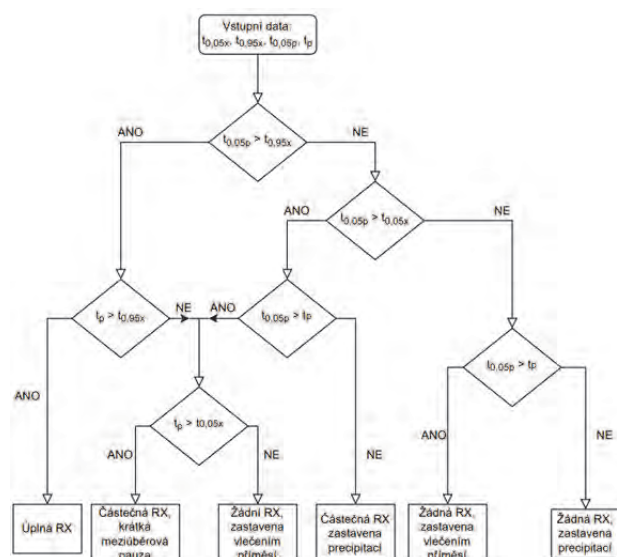
To, jak precipitace ovlivňuje rekrytalizaci, nejlépe vystihuje vývojový diagram na obr. 8 [21].

Vstupem pro tento rozhodovací blok jsou:

- $t_{0,05X}$ čas pro začátek rekrytalizace (SRX nebo MDRX) za daných termodynamických podmínek,
- $t_{0,95X}$ čas pro ukončení rekrytalizace (SRX nebo MDRX) za daných termodynamických podmínek,
- $t_{0,05P}$ čas pro začátek precipitace,
- t_p délka pauzy mezi úběry.

Vzájemným porovnáním klíčových časů dokážeme určit, která z těchto možných situací nastane:

- úplná rekrytalizace,
- částečná rekrytalizace z důvodu příliš krátké pauzy mezi úběry,
- rekrytalizace nezačala vlivem solute drag efektu (vlečení substitučně rozpuštěných příměsí),
- částečná rekrytalizace zastavená precipitací díky Zenerově pinning efektu precipitátů (tento efekt je tím větší, čím je více precipitátů menší velikosti [15]),
- rekrytalizace nezačala díky Zenerově pinning efektu precipitátů.



Obr. 8 Vývojový diagram výpočtu vývoje mikrostruktury niobových ocelí [21]

Fig. 8 Flowchart of the calculation of the development of the microstructure of niobium steels [21]

Modifikovaný model je postaven na myšlence vysvětlené na obr. 8, i když jednotlivé výpočty a rozhodovací bloky jsou provedeny poněkud odlišně. Podstatného vylepšení tohoto modelu bylo dosaženo tím, že vliv precipitace na kinetiku rekrytalizace byl vyjádřen pro dané termodynamické podmínky tvářením dvěma samostatnými uzdravovacími křivkami. První zohledňující vlečení příměsí a druhou zohledňující Zenerův pinning efekt. Více podrobností je uvedeno v [20].

Pomocí modifikovaného modelu vývoje mikrostruktury byla provedena simulace vývoje mikrostruktury pro všechny varianty laboratorního válcování v rozmezí teplot 800 až 1000 °C (válcování pouze v oblasti austenitu).

Excelovské tabulky modelu pro vstupní doválcovací teploty (před 3. úběrem) 1000 a 800 °C jsou uvedeny na obr. 9.

Z výsledku modelu vidíme, že pro obě hraniční teploty se jedná o dynamickou rekristalizaci řízené tváření, kdy DRX proběhne prakticky v každém úběru. Ani v jednom případě však není během válcování vyvolána deformačně indukovaná precipitace (DIK). K precipitaci tak v obou případech dojde až během ochlazování. V případě teploty 800 °C však precipitace dokáže zastavit probíhající MDRX po posledním úběru a před fázovou transformací tak zůstane v austenitu nakumulovaná intenzita deformace

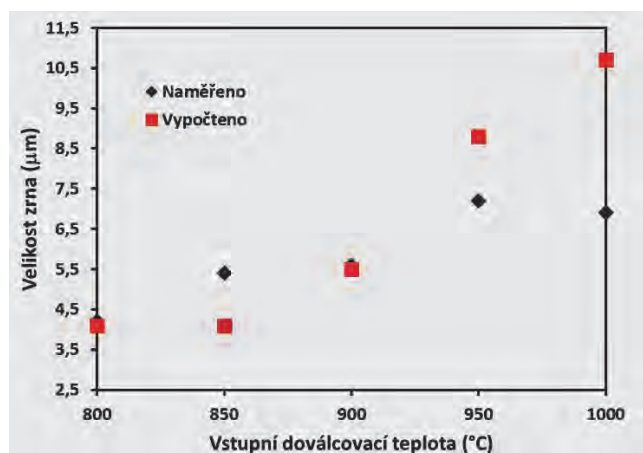
0,53, která přispěje ke zjemnění zrna na 4,1 µm oproti velikosti 10,7 µm při teplotě doválcování 1000 °C.

V grafu na obr. 10 je provedeno srovnání naměřených a vypočtených hodnot velikosti feritického zrna pro vstupní doválcovací teploty 800 až 1000 °C. Model pro dvě nejvyšší teploty predikuje ukončení DRX před DIP, což znamená, že v austenitu nezůstane pro fázovou transformaci naakumulována zbytková deformace a hodnoty velikosti feritického zrna se skokově zvýší. Při skutečném válcování tak zřejmě při žádné teplotě nedošlo k dokončení DRX, což vysvětluje rozdíly v predikcích u nejvyšších teplot.

O12,3												K52M												LIBERTY													
Nb	Mn	Si		C	A	Ti	T _{RH}	Nb _{eff}	e _{cr} /e _p	V	N	Q _{def}																									
#####	#####	####		#####	1,55E-05	#####	1220	0,01754	0,606478	#####	#####	375 000																									
Doválcovací teplota 1 000 °C												Sum																									
Úběr	d (μm)	T _i (°C)	T _p (°C)	e (-)	t _p (s)	ē (1/s)	Z (1/s)	K _s	t _{0,05P} (s)	t _p /t _{0,05P} (-)	DIP?	e _a	e _{cr}	DRX?	e _{0,5}	X _{dyn}	t _{0,5} (s)	X (-)	X (-)	X _{TPS no PPT}	t _{0,5, NO PPT} (s)																
0		1220								0																											
1	250	1172	1144	0,71	10,00	0,33	1,18E+13	1,41	1,21E+32	0,00	no	0,712	0,39	yes	0,37	0,42	0,37	1,000	1,000	1,000	0,37																
2	54,0	1115	1058	0,44	60,00	0,33	4,26E+13	2,20	1,93E+08	0,00	no	0,443	0,22	yes	0,30	0,31	0,86	1,000	1,000	1,000	0,86																
3	51,4	1000	1004	0,71	1,00	1,00	2,43E+15	6,07	73,55	0,01	no	0,707	0,43	yes	0,47	0,20	0,80	0,508	0,508	1,000	0,80																
4	20,8	1007	1011	0,46	0,70	1,30	2,61E+15	5,68	66,83	0,02	no	0,808	0,28	yes	0,37	0,75	0,63	0,467	0,467	1,000	0,63																
5	13,5	1015	1018	0,71	0,60	1,70	2,74E+15	5,27	54,67	0,04	no	1,145	0,23	yes	0,33	1,00	0,50	0,493	0,493	1,000	0,50																
6	11,4	1020	998	0,46	7,27	2,10	2,95E+15	5,03	134,00	0,09	no	1,038	0,21	yes	0,31	0,99	0,55	0,999	0,999	1,000	0,55																
F	29,3	976																																			
Ferit	10,7																																				
												Zbytková deformace pro fázovou transformaci												6E-04													
O12,3												K52M												LIBERTY													
Nb	Mn	Si		C	A	Ti	T _{RH}	Nb _{eff}	e _{cr} /e _p	V	N	Q _{def}																									
#####	#####	####		#####	1,55E-05	#####	1220	0,01754	0,606478	#####	#####	375 000																									
Doválcovací teplota 800 °C												Sum																									
Úběr	d (μm)	T _i (°C)	T _p (°C)	e (-)	t _p (s)	ē (1/s)	Z (1/s)	K _s	t _{0,05P} (s)	t _p /t _{0,05P} (-)	DIP?	e _a	e _{cr}	DRX?	e _{0,5}	X _{dyn}	t _{0,5} (s)	X (-)	X (-)	X _{TPS no PPT}	t _{0,5, NO PPT} (s)																
0		1220								0																											
1	250	1172	1144	0,71	10,00	0,33	1,18E+13	1,41	1,21E+32	0,00	no	0,712	0,39	yes	0,37	0,42	0,37	1,000	1,000	1,000	0,37																
2	54,0	1115	958	0,44	104,00	0,33	4,26E+13	2,20	1,25E+11	0,00	no	0,443	0,22	yes	0,30	0,31	2,65	1,000	1,000	1,000	2,65																
3	36,4	800	818	0,71	1,00	1,00	1,79E+18	59,50	16,40	0,06	no	0,707	1,12	no	1,11	0,00	1,25	0,367	0,367	0,778	6,22																
4	19,6	835	853	0,46	0,70	1,30	6,18E+17	37,60	10,31	0,13	no	0,907	0,69	yes	0,80	0,05	4,77	0,080	0,080	0,709	4,77																
5	17,0	870	885	0,71	0,60	1,70	2,32E+17	24,45	5,58	0,24	no	1,549	0,54	yes	0,66	0,80	2,57	0,125	0,125	0,710	2,57																
6	13,8	900	885	0,46	4,84	2,10	1,05E+17	17,25	10,55	0,70	no	1,814	0,43	yes	0,54	0,99	2,26	0,706	0,706	0,931	2,26																
F	8,7	871																																			
Ferit	4,1																																				
												Zbytková deformace pro fázovou transformaci												0,533													

Obr. 9 Vstupní parametry a výstupy modelu vývoje mikrostruktury při laboratorním válcování tyče O12,3 se vstupní doválcovací teplotou nahoře 1000 °C a dole) 800 °C

Fig. 9 Input and outputs parameters of the microstructure development model during laboratory rolling of O12.3 bar with an input finishing temperature up) 1000°C and down) 800°C



Obr. 10 Srovnání naměřených a vypočtených hodnot velikosti feritického zrna

Fig. 10 Comparison of measured and calculated values of ferrite grain size

Při vstupní doválcovací teplotě 850 °C, které odpovídá výstupní doválcovací teplota 910 °C je dosaženo nosu křivky počátku precipitace, čímž došlo k nejrychlejšímu zastavení DRX a k nakumulování největší zbytkové deformace. Doválcování při nižších teplotách tak již nemá na velikost feritického zrna pozitivní vliv (viz obr. 10).

Simulace rovněž potvrdily, že k DIP dojde po válcování i v případě zrychleného ochlazování.

Závěr

Spojité laboratorní válcování HSLA oceli potvrdilo hlavní výhodu této metody oproti fyzikálním simulacím na plastometrech, které ovšem umožňují mnohem přesnější řízení teploty. Díky rozměrům finálních vývalků jsou tyto vhodné pro provádění standardních mechanických

zkoušek. Ve srovnání s provozními testy je pak zřejmou výhodou možnost provádět válcování ve větším množství variant. Měnit lze nejen dovalcovací teploty, ale také rychlost válcování či teplotu ohřevu.

Pomocí fyzikálního modelování bylo prokázáno, že u tohoto typu oceli lze dovalčováním v teplotním rozmezí 700 až 750 °C dosáhnout velikosti feritického zrna pod 3,5 µm, což zajistí hodnotu meze kluzu nad 570 MPa a tažnost okolo 30 %. Pevnost je teplotou dovalčování a podmínkami ochlazování ovlivněna jen nepatrně. I když spojitě dovalčování probíhalo ve velmi širokém rozpětí teplot (700 až 1000 °C) nebyly v teplotních závislostech zaznamenány žádné výkyvy, které by byly ovlivněny válcováním různých strukturních fází (deformací ovlivněná teplota fázové transformace $A_{r3} = 714$ až 748 °C).

Teplota nulové rekystalizace byla stanovena experimentálně na 790 °C.

Zajímavým výsledkem je mikrostruktura a vlastnosti tyče po zakalení, která je uplatnitelná pro válcování vysokopevných svařitelných závitových tyčí (viz obr. 11), kdy je požadována mez kluzu 900 MPa, pevnost v tahu 1100 MPa a tažnost 7 %.



Obr. 11 Závitové tyče (Liberty Ostrava a.s.) spojené pomocí šroubovatelné spojky [22]

Fig. 11 Threaded Bars (Liberty Ostrava) connected by screwable coupler [22]

Simulace laboratorního válcování pomocí v Liberty Ostrava a.s. vyvinutého modelu vývoje mikrostruktury prokázalo jeho poměrně dobrou přesnost pro konkrétní ocel. Kromě finální velikosti feritického zrna, kterému jsme se hlavně věnovali, se tak dozvíme o průběhu strukturotvorných dějů. V určitém rozsahu můžeme měnit například chemické složení oceli, ve snaze vyvolat požadovaný strukturotvorný proces.

Tak například pro variantu se vstupní dovalcovací teplotou 850 °C můžeme dosáhnout velikosti feritického zrna 3,2 µm, pokud snížíme obsah Mn na 0,5 hm. % (Mn podporuje rozpouštění Nb a tím brzdí precipitaci NbX) a zvýšíme obsah Nb na 0,04 hm. %. Tato varianta může být vzhledem k úspoře Mn levnější než v experimentu použitá ocel.

Model vývoje mikrostruktury nyní může být použit pro simulaci a následně optimalizaci válcování tyčí a profilů na Středojemné válcovně Liberty Ostrava a.s. s cílem využít maximálně strukturní potenciál vyráběných HSLA oceli. Model byl použit při vývoji tyčí a profilů z oceli S355J2 ve stavu dodání +N a plánuje se jeho využití pro vývoj oceli s vyššími pevnostními vlastnostmi, jako jsou např. jakosti S420M a S460M.

Poděkování

Laboratorní válcování bylo provedeno v rámci projektu CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008399 z finančních fondů EU a ČR poskytovaných Operačním programem Výzkum, vývoj a vzdělávání, Výzvy 02_17_049 Dlouhodobá mezisektorová spolupráce pro ITI (MŠMT ČR).

Literatura

- [1] SCHINDLER, I. et al., Physical simulation of continuous controlled rolling and cooling of HSLA steel, In *Proc. of the 12th Rolling, Trieste*, Associazione Italiana di Metallurgia, 2022.
- [2] SAUER, M. *Analýza vývoje mikrostruktury během válcování na hrubé profilové trati v Liberty Ostrava a.s.* [online]. Ostrava, 2021. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/144254>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [3] KUMAR, D. and DIXIT, U. A slab method study of strain hardening and friction effects in cold foil rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 171 (2006), 331–340.
- [4] KIUCH, M. and YANAGIMOTO, J. Computer aided simulation of shape rolling process, *Proc. of the 16th NAMRC*, 1987, pp. 34–40.
- [5] JONAS, J.J. The Hot Strip Mill as an Experimental Tool. *ISIJ International*. 40 (2000) 8, 731–738.
- [6] SICILIANO, F. *Mathematical modelling of the hot strip rolling of niobium microalloyed steels*. Dissertation thesis, Montreal: McGill University; 1999
- [7] SELLARS, C.M. Modelling Microstructural Development during Hot Rolling. *Materials Science and Technology*. (1990), 6, 1072–1081, doi:10.1179/mst.1990.6.11.1072.
- [8] DUTTA, B. and Sellars, C.M. Effect of Composition and Process Variables on Nb(C, N) Precipitation in Niobium Microalloyed Austenite. *Materials Science and Technology*. (1987), 3, 197–206, doi:10.1179/mst.1987.3.3.197.
- [9] PEREDA, B., RODRIGUEZ-IBABE, J.M. and LÓPEZ, B. Improved Model of Kinetics of Strain Induced Precipitation and Microstructure Evolution of Nb Microalloyed Steels during Multipass Rolling. *ISIJ International*, (2008), 48, 1457–1466, doi:10.2355/isijinternational.48.1457.
- [10] SICILIANO, F., et al. Modeling of Softening and Precipitation During the Hot Strip Rolling of Niobium Steels. In *THERMEC 97: International Conference on Thermomechanical Processing of Steels and Other Materials*. 1997.
- [11] SICILIANO, F. and JONAS, J.J. Mathematical Modeling of the Hot Strip Rolling of Microalloyed Nb, Multiply-Alloyed Cr-Mo, and Plain C-Mn Steels. *Metall. and Mat. Trans. A*. 2000, 31, 511–530, doi:10.1007/s11661-000-0287-8.
- [12] MINAMI, K., SICILIANO, JR., F.; MACCAGNO, T.M. and JONAS, J.J. Mathematical Modeling of Mean Flow Stress during the Hot Strip Rolling of Nb Steels. *ISIJ International*. (1996), 36, 1507–1515, doi:10.2355/isijinternational.36.1507.
- [13] Poliak, E.I. and Jonas, J.J. Prediction of Interpass Softening from the Strain Hardening Rate Prior to Unloading. *ISIJ International*. (2004), 44, 1874–1881, doi:10.2355/isijinternational.44.1874.
- [14] PARK, S.H., YUE, S. and JONAS, J.J. Continuous-Cooling-Precipitation Kinetics of Nb(CN) in High-Strength Low-Alloy Steels. *Metall. and Mat. Trans. A*. (1992), 23, 1641–1651, doi:10.1007/BF02804360.
- [15] VERVYNCKT, S., VERBEKEN, K., THIBAU, P. and HOU-BAERT, Y. Recrystallization–Precipitation Interaction during Austenite Hot Deformation of a Nb Microalloyed Steel. *Materials Science and Engineering: A*. (2011), 528, 5519–5528, doi:10.1016/j.msea.2011.03.087.
- [16] VERVYNCKT, S., VERBEKEN, K., THIBAU, P., LIEBE-HERR, M. and HOU-BAERT, Y. Austenite Recrystallization–Precipitation Interaction in Niobium Microalloyed Steels. *ISIJ International*. 2009, 49, 911–920, doi:10.2355/isijinternational.49.911.

- [17] HONG, S.G., KANG, K.B. and PARK, C.G. Strain-Induced Precipitation of NbC in Nb and Nb-Ti Microalloyed HSLA Steels. *Scripta Materialia*. 2002, 46, 163–168, doi:10.1016/S1359-6462(01)01214-3.
- [18] MACCAGNO, T.M., JONAS, J.J., YUE, S.; MCCRADY, B.J., SLOBODIAN, R. and DEEKS, D. Determination of Recrystallization Stop Temperature from Rolling Mill Logs and Comparison with Laboratory Simulation Results. *ISIJ International*. 1994, 34, 917–922, doi:10.2355/isijinternational.34.917.
- [19] HODGSON, P.D. and GIBBS, R.K. A Mathematical Model to Predict the Mechanical Properties of Hot Rolled C-Mn and Microalloyed Steels. *ISIJ International*. 1992, 32, 1329–1338, doi:10.2355/isijinternational.32.1329.
- [20] SAUER, M., FABÍK, R., SCHINDLER, I., KAWULOK, P., OPĚLA, P., KAWULOK, R., VODÁREK V. and RUSZ, S. Analysis of the Microstructure Development of Nb-Microalloyed Steel during Rolling on a Heavy-Section Mill. *Materials* [online]. 2023, 16(1). ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma16010288.
- [21] HANSEN, S.S., SANDE, J.B.V. and COHEN, M. Niobium carbonitride precipitation and austenite recrystallization in hot-rolled microalloyed steels. *Metallurgical Transactions A* [online]. 1980, 11(3), 387-402 [cit. 2020-10-31]. ISSN 0360-2133. Dostupné z: doi:10.1007/BF02654563.
- [22] Ostrava Thread Bars, Liberty Ostrava, dostupné na: <https://libertysteelgroup.com/cz/wp-content/uploads/sites/4/2022/04/Liberty-Ostrava-Thread-Bars-2022.pdf>.

IAMO, Veolia a VŠB-TUO budou společně testovat využití tepla z prohořívající haldy v Ostravě

Termicky aktivní odvaly po těžbě uhlí patří mezi dlouholeté ekologické zátěže Ostravska. Nabízí se otázka, zda by mohly sloužit jako zdroj tepelné energie. Za jakých podmínek by to bylo možné, budou zkoumat společně odborníci ze státního podniku DIAMO, společnosti Veolia Energie a Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava.

Cílem spolupráce, stvrzené memorandem, je ověřit možnost využití tepla z prohořívajících odvalů jako alternativu pro vytápění a přípravu teplé vody pro budovy v blízkém okolí odvalů, a to formou pilotního projektu.

„Memorandem chceme potvrdit, že zdejší podniky a technická univerzita umí aktivně a efektivně spolupracovat, hledat neobvyklá řešení prospěšná pro region a uplatňovat nové přístupy. Naším cílem je otestovat možnost využití energetického potenciálu termicky aktivních odvalů, čímž jsme se dosud na odborné úrovni nezabývali,“ uvedl Ludvík Kašpar, ředitel státního podniku DIAMO.

Memorandem chtějí zúčastněné strany navázat a rozvíjet spolupráci primárně na výzkumném a pilotním projektu zaměřeném na využití tepla z termicky aktivního odvalu a dále pak na identifikaci, návržení a případně i realizaci dalších možností využití výsledků a získaných poznatků v praxi.

Miroslav Zajíček, ředitel pro strategii společnosti Veolia Energie, doplnil: *„Naším zájmem je hledat, ověřovat a realizovat nové směry a možnosti. Zajímá nás proto i energetické využití pozůstatků dřívější průmyslové činnosti ve prospěch obyvatel, firem a dalších subjektů ostravsko-karvinského regionu. Může to mimo jiné přispět k posílení energetické soběstačnosti a bezpečnosti regionu.“*

Signatáři memoranda poskytnou v rámci projektu své pracovníky, know-how, technické a technologické zázemí a finanční prostředky podle potřeb a vzájemné dohody. Sestavili za tímto účelem pracovní skupinu, která se bude pravidelně scházet a řešit všechny potřebné činnosti a koordinovat a vyhodnocovat průběh projektu.

„Naše univerzita bude prostřednictvím svých odborných pracovišť a odborníků spolupracovat na přípravě a realizaci projektu, modelování, identifikaci rizik, měření a vyhodnocování výsledků. Spolupráci na projektu můžeme využít jak k výuce, tak k vědecko-výzkumné činnosti mimo jiné i ve vazbě na připravovaný projekt REFRESH,“ vysvětlil Igor Ivan, prorektor pro strategii a spolupráci VŠB-TUO.

Pro budoucí využití tepla z odvalu je potřeba zjistit především fyzikální, technické a ekonomické informace, které nebyly dosud systematicky zjišťovány. Základem pro rozhodnutí o dalších krocích bude experiment ve formě výzkumného vrtu na odvalu v Ostravě – Heřmanicích, který vykazuje teplotu pod povrchem 100–600 °C.

Z technického hlediska je myšlenka na využití tepla vznikajícího v odvalu založena na realizaci svislého podzemního tepelného výměníku. Výměník by umožnil transfer tepla vznikajícího v odvalu do topné vody, která by mohla být využívána pro vytápění a ohřev teplé vody v okolních budovách. Pilotní projekt by umožňoval zároveň také vyzkoušet sluneční (FVE) nebo větrnou (větrná turbína) energii pro pohon čerpadla.

Průběh sanace odvalu Heřmanice není tímto projektem dotčen a může se realizovat současně. Vychlazování odvalu odběrem tepla pro vytápění by se však v budoucnu mohlo stát doplňkovou aktivitou k sanaci odvalu.

- z tiskové zprávy-

Porovnání polévací metody a metody plněného profilu při výrobě litiny s kuličkovým grafitem v provozních podmínkách

Comparison of the Pouring Method and Cored Wire Method in Production of Ductile Cast Iron under Operating Conditions

doc. Ing. Ladislav Socha, MBA, Ph.D.¹; doc. Ing. Karel Gryc, MBA, Ph.D.¹; Ing. Kamil Koza¹; doc. Ing. Josef Odehnal, Ph.D.¹; Ing. Bc. Jana Sviželová, Ph.D.¹; Ing. Miroslav Chmielec²; Ing. Petra Fronková²

¹ Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, Okružní 517/10, 370 01 České Budějovice, Česká republika

² KOVOSVIT MAS Foundry, a.s., Náměstí T. Bati 419, 391 02 Sezimovo Ústí, Česká republika

Při výrobě litiny s kuličkovým grafitem jsou nezbytnými kroky pro získání kulovitého tvaru grafitu modifikace a očkování. Ve slévárně KOVOSVIT MAS Foundry, a.s. je pro modifikaci a očkování používána převážně polévací metoda v pánvi. V současné době je v provozních podmínkách testována metoda plněných profilů. Je využíván kombinovaný podavač modifikačního a očkovacího profilu, což umožňuje současnou modifikaci i očkování. Pro srovnání uvedených dvou metod byly provedeny série experimentálních taveb s odběrem vzorků pro hodnocení chemického složení, mikrostruktury a mechanických vlastností. Ze srovnání výsledků polévací metody a metody plněných profilů vyplynulo, že obě splňují požadavky pro materiál EN-GJS-400-18-LT a moderní metoda plněných profilů může nahradit tradiční polévací metodu.

Klíčová slova: litina s kuličkovým grafitem; modifikace; očkování; plněný profil; provozní experiment

In the production of ductile cast iron modification and inoculation are necessary steps to produce nodular graphite. In KOVOSVIT MAS Foundry, a.s., the primary method used for modification and inoculation is the pouring method. Currently, the cored wire method is being operationally tested and implemented. It features a twin wire feeder allowing simultaneous modification and inoculation. To compare the two methods, experimental melts were carried out in the foundry with sampling for chemical analysis, metallography and mechanical tests. By comparing the results of the pouring method and the cored wire method, it was found that both meet the requirements for EN-GJS-400-18-LT material, and the cored wire method can therefore replace the pouring method.

Key words: ductile cast iron; modification; inoculation; cored wire; operational experiment

Litina s kuličkovým grafitem je moderní materiál s vynikajícími mechanickými vlastnostmi [1-3]. Obzvláště litiny s kuličkovým grafitem a feritickou maticí dosahují houževnatosti a pevnosti srovnatelné s ocelí [4]. Výhodou oproti ocelím jsou lepší slévárenské vlastnosti [1]. Litina s kuličkovým grafitem je také relativně levná [5]. Díky svým vlastnostem tak nachází uplatnění například při výrobě pracovních strojů, v automotive, nebo v komponentech větrných elektráren [3, 6]. Mechanické vlastnosti litin jsou ovlivněny tvarem, nodularitou a rozložením grafitových kuliček s vysokou nodularitou a malým průměrem má pozitivní vliv na vlastnosti litiny [2]. Grafit se v litině běžně vyskytuje ve formě lupínků, ovšem přidávkou Mg nebo Ce dochází k formování grafitických kuliček [4, 8] a ke změně mechanických vlastností materiálu.

Existuje několik teorií o působení prvků způsobujících vznik kulatého tvaru vyloučeného grafitu. Jedna z teorií tvrdí, že tvar vyloučeného grafitu je závislý na druhu krystalizačního zárodku. Zárodky FeS, SiO₂ či SiC mají hexagonální mřížku a způsobují růst lupínkového grafitu. Ovšem přidávkou Mg do taveniny dochází k redukci těchto vměstků se šesticennou mřížkou a jsou nahrazovány

sloučeninami MgS, MgO či Mg₂Si, které mají krychlovou mřížku a podporují růst nodulárního grafitu. Přítomnost Mg a S ve středu grafitové kuličky byla potvrzena metalografií a rentgenovou spektrální mikroanalýzou [9, 10]. Další teorie uvažují o vlivu fyzikálně chemických vlastností taveniny, především povrchového napětí, na utváření nodulárního grafitu. Přídavek Mg způsobuje nárůst povrchového napětí taveniny, které způsobuje vznik globulárního grafitu [9]. Poslední zde zmíněná teorie předpokládá, že grafit, či krystal grafitu, roste dendritickým způsobem tak, že vznikající drobná částice grafitu se rozvíjí do několika větví, které se dále rozvíjejí. Jestliže je frekvence vzniku nových větví grafitického dendritu relativně nízká, vytváří se síť vnitřního propojení typická pro lupínkový grafit. Jestliže se frekvence větvení drasticky zvýší, vytváří se globulární, zrnitý grafit. Adsorpcí Mg na povrch grafitového zárodku se omezí rychlost růstu grafitu v různých směrech a grafit nabývá již od začátku svého růstu zrnitý tvar. Během dalšího tuhnutí je zcela obalen austenitem, takže jeho růst je možný pouze pomocí difuze uhlíku ze zbytkové taveniny přes austenit [10].

Přídavek Mg za účelem získání kuličkového grafitu se nazývá modifikace. K dosažení kuličkového grafitu musí litina obsahovat alespoň 0,025 % Mg, obvyklý je obsah

0,030-0,060 %. Modifikace se provádí čistým Mg nebo jeho slitinami. Z důvodu bouřlivé reakce se obvykle nemodifikuje čistým Mg, ale předslitinami FeSiMg. Modifikace čistým Mg je použitelná u metod umožňujících omezit nebo regulovat bouřlivost reakce, např. ve sferoklávu nebo konvertoru. Mg se v tavenině vypařuje a jeho páry probublávají na povrch, přitom reagují se S a O rozpuštěným v litině a tvoří chemické sloučeniny. Tyto vměstky se nazývají sekundární struska. Část Mg par unikne z taveniny a oxiduje nebo reaguje na hladině. Jen ta část Mg, která se rozpustí v kovu, vede ke vzniku kuličkového grafitu. Tento Mg se nazývá zbytkový – Mg_{zbyt} a jeho obsah nemá být příliš vysoký, neboť vzniká více vměstků a litina má větší sklon k zákalce, tzv. bílému tuhnutí a vzniku cementitu. Dávkování Mg se provádí podle množství S ve výchozí slitině a podle předpokládaného využití Mg. Protože Mg působí antigrafitizačně, je nutné kov dobře očkovat. Očkování se provádí současně s modifikací nebo po ní, někdy také dvoustupňově, poprvé při modifikaci, podruhé během lití [11].

Existuje řada metod modifikace, lišících se způsobem vpravení Mg do kovu, druhem modifikačního prostředku, využitím Mg či investičními náklady. Polévací metoda, nazývaná též Sandwich, se provádí v otevřené pánvi, na jejímž dně je připravena vrstva předslitiny Mg pro modifikaci, na ní je vrstva očkovadla překrytá ocelovým plechem nebo plechovými odstřížky. Vrstva oceli brání vyplouvání Mg a očkovadla na hladinu a oddaluje začátek modifikační reakce. Bouřlivost reakce je potlačována metalostatickým tlakem, proto je vhodné používat vysoké štíhlé pánve. [11]. Modifikace plněným profilem využívá práškový modifikátor obalený dutým tenkostěnným ocelovým profilem o průměru 7–13 mm. Profil je podavačem zaváděn do pánve s taveninou takovou rychlostí, aby docházelo k roztavení u dna pánve. Metoda plněného profilu je použitelná pro taveninu z kuploven i z elektrických pecí [12]. Obecně je výhodou použití plněného profilu automatizované řízení, snížení výrobních nákladů a ochrana životního prostředí [13].

Pro zabezpečení dostatečného počtu zrn grafitu a eutektických buněk se provádí očkování. Zajišťuje tvorbu grafitizačních zárodků při eutektické krystalizaci a tím omezuje sklon litiny tuhnout s vyloučením volného cementitu. Mg používaný k modifikaci působí antigrafitizačně, čímž zvyšuje sklon k metastabilnímu tuhnutí a vylučování karbidů. Proto je vhodné litinu s kuličkovým grafitem očkovat podruhé (sekundárně, tzv. grafitizačně) [10]. Očkovadla jsou tvořena nosičem a krystalizační složkou. Nosič tvoří hlavní část hmoty očkovadla, sám o sobě však nemá očkovací účinek. Očkovací složka je v očkovadle obsažena pouze v malé koncentraci. Aktivními prvky jsou Ca, Al, Sr, Ba nebo Zr. Tyto prvky reagují zejména s O a S za vzniku nukleačních zárodků grafitu, případně aktivizují zárodky v litině již přítomné. Očkovací účinek je omezený, průběhu času dochází k jeho odeznívání. To je způsobeno koagulací zárodků, jejich

hrubnutím a rychlejším vyplouváním a homogenizací taveniny, kdy mizí oblasti s místním přesycením grafitotvorných prvků. Z tohoto důvodu je nutné litinu odlít co nejrychleji po naočkování, ideálně do 10 minut [11].

Metod očkování existuje velké množství, některé jsou shodné s metodami modifikace. Například metoda Sandwich umožňuje současné očkování spolu s modifikací, jak bylo popsáno výše. Pro očkování je možné využít taktéž plněného profilu, se stejným uspořádáním, principem a výhodami jako u modifikace. Při využití dvoužilového podavače, kdy jeden profil je modifikační a druhý očkovací, je možné provádět modifikaci s očkováním zároveň. Tímto uspořádáním je zajištěna stabilita a kvalita procesu, je zvýšena bezpečnost, kdy nedochází k úniku prachu a roztaveného kovu z pánve. Proces je méně náchylný na proměnlivý obsah síry, teplotu a množství zpracovávané taveniny v pánvi, řídící jednotka umožňuje automatický záznam procesních dat. Dochází ke zvýšení efektivity a redukci nákladů snížením tepelných ztrát, opotřebením vyzdívky a nároků na pracovní sílu [12, 14]. Poslední zde zmíněnou metodou očkování je tzv. In-mold, neboli očkování při lití ve formě. V tomto uspořádání je očkovadlo umístěno přímo ve vtokové soustavě formy a dochází k jeho postupnému rozpouštění a průběžnému očkování taveniny. Metoda je vhodná pro sekundární tzv. grafitizační očkování. Důležitým parametrem při výběru očkovadla pro technologii In-mold je jeho rozpustnost v tavenině [15].

Jak bylo uvedeno v dřívější práci [16], slévárna KOVOSVIT MAS Foundry, a.s. je schopna vyrábět litinu s kuličkovým grafitem v požadované kvalitě při využití různých kombinací vsázkových materiálů, modifikátorů a očkovadel. Běžně je v provozních podmínkách užívána pro modifikaci a očkování polévací metoda. V současnosti je však v provozních podmínkách zaváděna moderní technologie plněného profilu pro modifikaci a očkování, čímž dojde k zefektivnění procesu výroby.

Pro experimentální tavby byl vybrán odlitek typu SCHAFT 1, určený pro výrobce lodních manipulátorů pro lodě střední velikosti. U tohoto typu odlitku je požadována nadstandardní úroveň kvality materiálu. Odlitek je vyráběn z materiálu EN-GJS-400-18-LT, který představuje litinu s kuličkovým grafitem a feritickou maticí se zaručenou hodnotou nárazové práce při teplotě -20 °C dle ČSN EN 1563 [17]. V rámci realizované série experimentů byla u části taveb použita polévací metoda / sandwich a u části metoda plněného profilu. Souběžně s odlitkem byly v rámci vtokové soustavy formy přilévány zkušební vzorky, tzv. Y-bloky, ze kterých byla vyrobena zkušební tělesa pro zkoušky mechanických vlastností [17] a metalografickou analýzu [18-20]. Cílem práce bylo prokázání úspěšné implementace procesu plněných profilů do technologického procesu a schopnost standardizované výroby vysoce jakostních odlitků touto metodou.

Charakteristika použitých postupů výroby odlitku SCHAFT 1

Pro srovnání obou technologií byla od každé vybrána jedna reprezentativní tavba. Pro polévací metodu/sandwich se jednalo o tavbu označenou TD75, pro metodu plněného profilu pak o tavbu označenou TO93.

Pro výrobu odlitku SCHAFT 1 bylo definováno chemické složení taveniny před odpichem, pro představu

uvedené v tab. 1. Dále bylo navrženo finální chemické složení taveniny pro odlitek, které je uvedeno v tab. 2. Je vhodné uvést, že chemické složení taveniny se pro polévací metodu a metodu plněného profilu nelišilo.

V předchozích pracích bylo zjištěno, že výběr vsázkových materiálů nemá na konečnou kvalitu odlitku zásadní vliv, pokud jsou poměr a kombinace vsázkových materiálů správně vypočítány pro požadované složení [16]. Pro představu je složení vsázky obou vybraných taveb uvedeno v tab. 3.

Tab. 1 Chemické složení materiálu EN-GJS-400-18-LT před odpichem

Tab. 1 Chemical composition of material EN-GJS-400-18-LT before tapping

Rozsah	Chemické složení [hm. %]							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Cr
Min.	3,40	0,80	0,10	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Max.	3,50	0,90	0,15	0,040	0,015	0,05	xxx	0,02

Tab. 2 Navržené finální chemické složení materiálu EN-GJS-400-18-LT pro odlitek SCHAFT 1

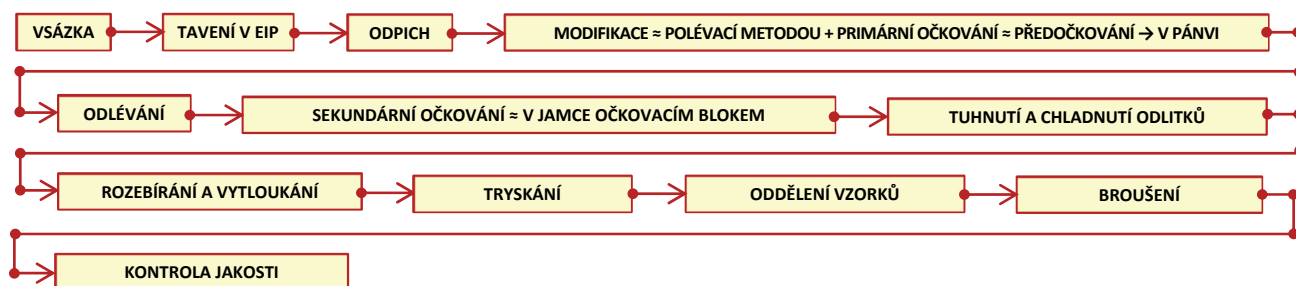
Tab. 2 Proposed chemical composition of material EN-GJS-400-18-LT for SCHAFT 1 casting

Rozsah	Chemické složení [hm. %]							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Cr
Min.	3,30	1,70	0,10	xxx	xxx	xxx	0,040	xxx
Max.	3,40	1,90	0,15	0,040	0,010	0,05	0,060	0,02

Tab. 3 Složení vsázky u taveb TD75 a TO93 při výrobě materiálu EN-GJS-400-18-LT

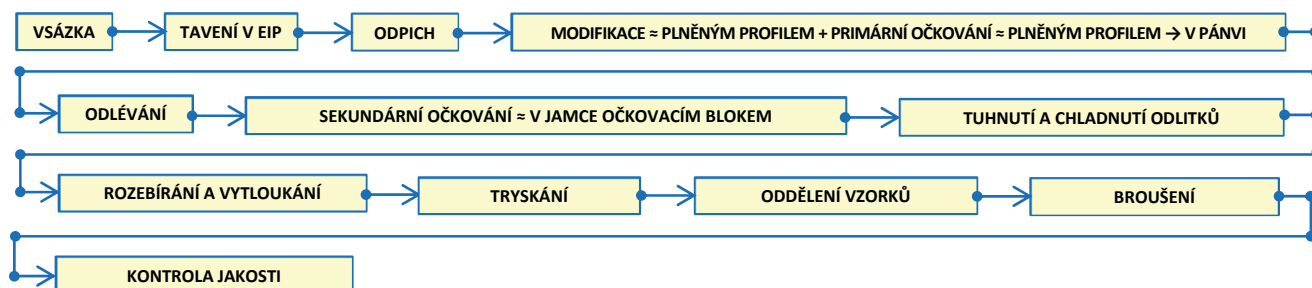
Tab. 3 Charge composition for melts TD75 and TO93 in the production of EN-GJS-400-18-LT

Označení tavby	Podíl vsázkových materiálů jednotlivých taveb [hm. %]				
	Surové železo		Ocelový odpad		Vratný materiál
	Sorel	Pig Nod	Kupol Mn 0,3 %	Si plechy	Najížděcí blok
TD75	38,5	20,0	27,7	13,8	xxx
TO93	36,8	xxx	36,8	xxx	26,4



Obr. 1 Schéma technologického postupu při použití polévací metody / sandwich

Fig. 1 Schematic of the process flow using the pouring method



Obr. 2 Schéma technologického postupu při použití plněných profilů

Fig. 2 Schematic of the process flow using the cored wire method

V rámci provozních experimentů byla provedena série experimentálních taveb, při kterých byly vyzkoušeny 2 kombinace odlišných technologií modifikace a očkování. Na obr. 1 je zobrazen průběh technologického postupu při použití polévací metody, na obr. 2 pak průběh technologického postupu při použití plněného profilu. Oba technologické postupy se liší pouze způsobem modifikace a očkování, přičemž uvedené postupy se skládají z následujících kroků:

- vsázka → sestavení vsázky a její výběr byl řízen individuálně dle metalurgické a chemické kvality dostupných surovin se zaručeným chemickým složením. Pro výrobu byly použity následující vsázkové materiály: surové železo × ocelový odpad × vlastní vrat v různých poměrech
- tavba → byla vedena dle potřeby množství taveniny odpovídající počtu odlévaných odlitků, přičemž bylo prováděno odlévání 1 nebo 2 kusů. Byla používána středofrekvenční pec o kapacitě 6 t
- po roztavení vsázky a dosažení vzorkovací teploty ($t = 1350-1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) byla důkladně stažena struska, změřena teplota lázně a odebrán vzorek pro 1. zkoušku se zaměřením na následující prvky: C, Si, Mn, P, S, Cu a Cr. Následně byla provedena korekce chemického složení taveniny. V průběhu tavby byla tavenina udržována na minimální teplotě
- před odpichem bylo chemické složení ověřeno chemickou laboratoří se zaměřením na následující prvky: C, Si, Mn, P, S, Cu, Mg a Cr. Cílem tavby bylo dosažení požadovaného chemického složení a dodržení správného teplotního režimu → $t_{\text{max}} = 1380-1420\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- modifikace / polévací metoda / sandwich → před odpichem je do lázně přidána jedna houska surového železa Pig Nod pro lepší tvorbu zárodků. Před modifikací byla pánve vypláchnuta tekutým kovem pro dostatečné nahřátí vyzdívky. Následně byly na dno přidány předslitiny v následujícím pořadí: FeSiMg731 – modifikátor, Inocast100 – očkovač a třísky LLG – pro zpoždění reakce
- kromě modifikace je v pánvi při odpichu provedeno i primární očkování, tzv. předočkování pomocí očkovačů
- očkování / polévací metoda / sandwich → je prováděno ve dvou fázích, nejprve částečně v průběhu odpichu do pánve tzv. předočkování a následně probíhá tzv. hlavní očkování, které je realizováno v jamce pomocí očkovačů, a to v průběhu odlévání odlitku
- pro optimalizaci struktury litiny očkováním bylo použito očkovač Inocast100 k tzv. předočkování a očkovač bloky Germalloy k tzv. hlavnímu očkování. Typ a množství očkovačů bylo zvoleno v závislosti na množství tekutého kovu a době lití vybraného typu odlitku
- modifikace / plněný profil → je provedena po odpichu při využití modifikačního boxu s plněným profilem typu Rumag 25HS. Množství modifikačního plněného profilu je dáno výpočtem. Do softwaru modifikačního boxu se zadává počáteční obsah síry, množství modifikovaného

kovu a teplota taveniny. Dle zadaných parametrů (včetně přednastavených parametrů představující konečný obsah Mg a využití Mg) provede program výpočet délky modifikačního profilu

- očkování / plněný profil → je prováděno ve dvou fázích, nejprve tzv. předočkování, a to injektáží plněného profilu, a následně probíhá tzv. hlavní očkování, které je realizováno v jamce pomocí očkovačů, a to v průběhu odlévání odlitku
- primární očkování / plněný profil / tzv. předočkování je provedeno injektáží očkovačů plněného profilu typu Inform SB13 v modifikačním boxu. Podávání očkovačů plněného profilu je zahájeno ke konci injektáže modifikačního plněného profilu typu Rumag 25HS tak, aby oba procesy skončily současně
- sekundární očkování / tzv. hlavní očkování je realizováno v jamce pomocí očkovačů bloků typu Germalloy, a to v průběhu odlévání odlitku. Typ a množství očkovačů bylo zvoleno v závislosti na množství tekutého kovu a době lití vybraného typu odlitku
- odlévání, dokončovací operace a výstupní kontrola → před odléváním byla stažena struska. Po odlévání a chladnutí následovalo rozebrání formy, vytloukání odlitku, otryskání a uložení do skladovacího prostoru
- ke každému odlitku byly v rámci formy souběžně přilévány zkušební Y-bloky, ze kterých byla poté vyrobena zkušební tělesa pro metalografickou analýzu a zkoušky mechanických vlastností. Následovaly kontroly odlitku, mezi něž patří vizuální kontrola a kontrola pomocí ultrazvuku.

Analýza vzorků z experimentálních taveb

V průběhu realizace experimentálních taveb byly průběžně a z vybraných míst odebrány vzorky z taveniny se současným měřením teplot. Proběhlo také souběžné odlévání Y-bloků umístěných ve vtokové soustavě. Odebrané vzorky byly označeny a postupně analyzovány. Specifikace jednotlivých analýz jsou uvedeny níže:

- analýza chemického složení → byla provedena pomocí optické emisní spektrometrie (OES) s vybuzením vysokoenergetickým jiskrovým výbojem na přístroji Q4 TASMAN. Přesný obsah C a S byl stanoven pomocí spalovací analýzy ve vysokofrekvenční peci LECO CS230 v proudu kyslíku. Dále byl z naměřených hodnot vypočten uhlíkový ekvivalent CE a stupeň nasycení (eutektičnosti) SC.
- metalografická analýza → byla zaměřena na mikroskopické hodnocení s cílem stanovení dosahované struktury materiálu EN-GJS-400-18-LT. Na vzorcích vyrobených ze zkušebních těles typu Y-blok bylo prováděno metalografické hodnocení s využitím světelného mikroskopu a obrazové analýzy se zaměřením na mikrostrukturu litiny s kuličkovým grafitem. Hodnocení grafitu bylo provedeno dle následujících norem: ČSN EN ISO 945-1 → zaměřeno na klasifikaci grafitu vizuální analýzou, ASTM A247 →

hodnocení nodularity grafitu a ČSN 420461 → hodnocení matrice litin. Tímto způsobem bylo možno získat komplexní představu o struktuře materiálu EN-GJS-400-18-LT.

- mechanické vlastnosti → byly zaměřeny na zkoušky v tahu, zkoušky tvrdosti a zkoušky rázem v ohybu (Charpyho kladivo). Uvedené testy umožnily stanovit mez pevnosti v tahu R_m , mez kluzu $R_{p0,2}$, tažnost A_5 , tvrdost dle Brinella HB a nárazovou práci KV_2 za nízké teploty -20 °C.

Výsledky a diskuse

Po provedení experimentálních taveb bylo realizováno hodnocení se zaměřením na stanovení mechanických vlastností, metalografické vyhodnocení a hodnocení mikrostruktury [17-20]. Výsledky jsou souhrnně uvedeny v tzv. metalografických kartách. Příklad takové karty pro tavby TD75 a TO93 je uveden v tab. 4 až tab. 7 a na obr. 3 a obr. 4. Z výsledků lze získat představu o mechanických vlastnostech a výsledné struktuře materiálu EN-GJS-400-18-LT při odlévání odlitku typu SCHAFT 1 při aplikaci odlišných technologií modifikace a očkování.

Dosažené chemické složení uvedené v tab. 5 odpovídá chemickému složení potřebnému pro materiál EN-GJS-400-18-LT, jak je uvedeno v tab. 2, až na několik odchylek v řádu maximálně setin procenta u C, P a Cr. Nicméně tyto drobné odchylky nemají negativní vliv na mechanické vlastnosti materiálu, jak bude uvedeno dále.

Z tab. 6 vyplývá, že u tavby TD75 bylo dosaženo vyšších hodnot meze pevnosti R_m a tažnosti A_5 . U tavby TO93 bylo dosaženo vyšších hodnot meze kluzu $R_{p0,2}$, tvrdosti HB a nárazové práce při -20 °C KV_2 . Při srovnání s požadavky dle ČSN EN 1563 je patrné, že obě tavby splňují požadavky na mechanické vlastnosti pro materiál EN-GJS-400-18-LT definované normou při směrnaté tloušťce stěny $60 < t \leq 200$ mm [17].

Z výsledků uvedených v tab. 7 bylo zjištěno, že u tavby TD75 bylo získáno mírně více grafitových částic větší velikosti než u tavby TO93. Tvar grafitu a nodularita byly u obou taveb srovnatelné. Obsah perlitu byl u obou taveb minimální, do 2 %. Získaná mikrostruktura tak u obou taveb odpovídá litině s kuličkovým grafitem s velkým počtem částic grafitu malé velikosti, převážně pravidelně zrnitého tvaru VI a s feritickou matricí. Na obr. 3 a 4 jsou uvedeny snímky struktur obou taveb před leptáním → stanovení počtu částic, velikosti, tvaru a nodularity, a po leptání → určení poměru ferit/perlit [18-20].

Tab. 4 Charakteristika průběhu modifikace a očkování

Tab. 4 Characterisation of modification and inoculation processes

Technologie	Označení tavby	Modifikátor: název → množství [hm. %]	Předočkování: název → množství [hm. %]	Hlavní očkování: název → množství [hm. %]
Polévací metoda	TD75	FeSiMg731 → 1,8 %	SB10 → 0,1 %	Germalloy → 2x P2+P300
Plněný profil	TO93	Rumag 25HS → 0,51 %	Inform SB13 → 0,15 %	Germalloy → 2x P2+P300

Tab. 5 Dosažené chemické složení experimentálních taveb

Tab. 5 Achieved chemical composition of experimental melts

Označení tavby	Chemické složení [% hm.]								Parametry	
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Cr	CE	Sc
TD75	3,32	1,74	0,11	0,049	0,008	0,01	0,053	0,02	3,86	0,90
TO93	3,44	1,81	0,13	0,035	0,010	0,03	0,051	0,03	3,99	0,94

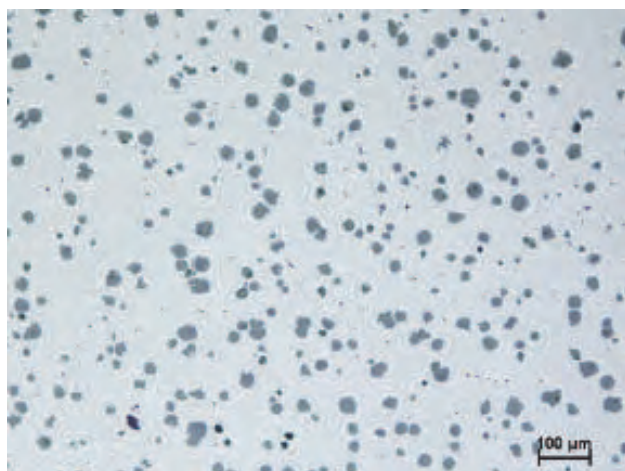
Tab. 6 Dosažené mechanické vlastnosti experimentálních taveb

Tab. 6 Achieved mechanical properties of experimental melts

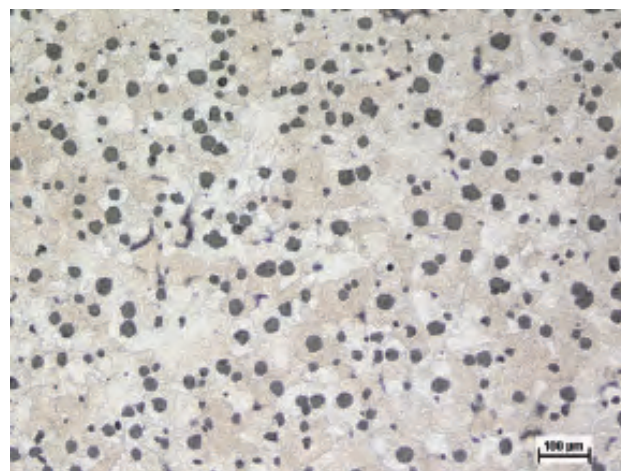
Parametry	Hodnoty dle ČSN EN 1563		Hodnoty dosažené	
			Tavba TD75	Tavba TO93
Mez pevnosti R_m [MPa]	Min. 360 MPa		413 MPa	408 MPa
0,2 % smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Min. 220 MPa		251 MPa	287 MPa
Tažnost A_5 [%]	Min. 12 %		21,4 %	18,4 %
Tvrdost → dle Brinella [HB]	Min. 130 HB		131 HB	164 HB
Min. hodnoty nárazové práce KV_2 [J]	Nízká teplota (-20 ± 2) °C → tavba TD75			
	Střední hod. (3 zk.)		Jednotlivá hod.	Střední hod. (3 zk.)
	10 J		7 J	13 J
	Nízká teplota (-20 ± 2) °C → tavba TO93			
	Střední hod. (3 zk.)		Jednotlivá hod.	Střední hod. (3 zk.)
	10 J		7 J	17 J

Tab. 7 Hodnocení metalografické struktury experimentálních taveb
Tab. 7 Evaluation of metallographic structure of the experimental melts

Označení tavby	ČSN EN ISO 945-1	ASTM A 247	ČSN 420461
TD75	Tvar grafitu: 93 % VI + 7 % V	Nodularita: 93 %	Perlit obsah P1: P0 (do 2 %)
	Velikost grafitu: 6/7	Počet částic/mm ² : 298	xxx
	Velikost útvarů grafitu: 15–60 μm	xxx	xxx
TO93	Tvar grafitu: 94 % VI + 6 % V	Nodularita: 95 %	Perlit obsah P1: P0 (do 2 %)
	Velikost grafitu: 7/8	Počet částic/mm ² : 269	xxx
	Velikost útvarů grafitu: <15 až 30 μm	xxx	xxx

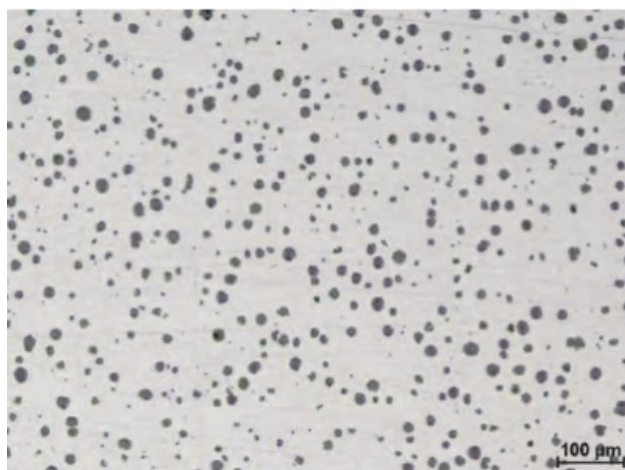


a) před leptáním
a) before etching

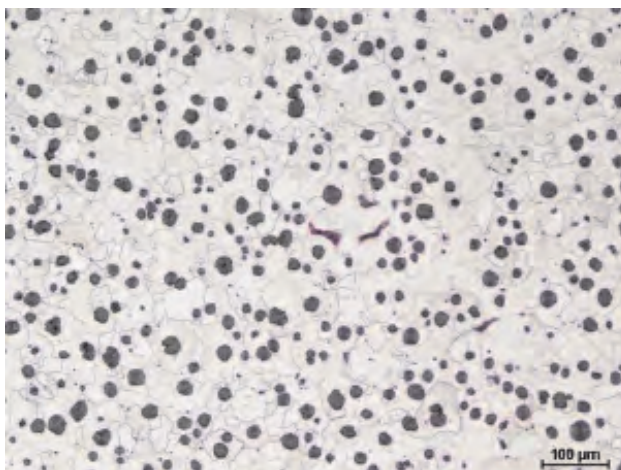


b) po leptání
b) after etching

Obr. 3 Ukázka snímků litiny s kuličkovým grafitem → tavba TD75
Fig. 3 Sample images of ductile iron → melt TD75



a) před leptáním
a) before etching



b) po leptání
b) after etching

Obr. 4 Ukázka snímků litiny s kuličkovým grafitem → tavba TO93
Fig. 4 Sample images of ductile iron → melt TO93

Závěr

V rámci uvedeného článku bylo provedeno porovnání dvou technologií modifikace a očkování v provozních podmínkách. Ve slévárně KOVOSVIT MAS Foundry, a.s. byla hodnocena výroba odlitku typu SCHAFT 1 z materiálu EN-GJS-400-18-LT při aplikaci klasické technologie → polévací metody / sandwich a inovované technologie →

plněných profilů pro modifikaci a očkování. Z výsledků zkoušek byly vyvozeny následující závěry:

- oba technologické postupy modifikace a očkování splnily parametry stanovené normou ČSN EN 1563 zaměřené na mez pevnosti, mez kluzu, tažnost a nárazovou práci při -20 °C pro materiál EN-GJS-400-18-LT pro odlitek typu SCHAFT 1,

- metalografickým hodnocením a analýzou struktury bylo zjištěno, že je získávána litina s kuličkovým grafitem obsahující vysoký počet grafitických částic s velkou nodularitou. Struktura je převážně feritická s méně než 2 % perlitu,
- na základě zde uvedených výsledků je tedy možné konstatovat, že slévárna KOVOSVIT MAS Foundry, a.s. úspěšně zavedla technologii plněných profilů pro modifikaci a předočkování litiny. Lze také konstatovat, že odlitky jsou kvalitativně srovnatelné s odlitky vyrobenými původní polévací metodou,
- v budoucnu je možné proces výroby zdokonalit využitím moderní technologie plněného profilu s dvoužilovým uspořádáním k modifikaci a očkování pouze plněným profilem, kdy v jedné žile bude modifikátor a v druhé očkovadlo.

Poděkování

Práce vznikla za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR v rámci programu TRIO, jako součást projektu FV 40036 „Výzkum a vývoj komplexní technologie výroby odlitků z vysoce jakostních tvárných litin“.

Literatura

- [1] LAINE, J., LEPPÄNEN, A., JALAVA, K., VAARA, J., FRONDELIS, T. and ORKAS, J. Ductile iron optimization approach for mechanically and thermally loaded components. *International Journal of Metalcasting*. 15 (2021) 3, 962-968. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00529-9>.
- [2] LIU, JH., YAN, JS., ZHAO, XB., FU, BG., XUE, HT., ZHANG, GX. and YANG, PH. Precipitation and evolution of nodular graphite during solidification process of ductile iron. *China Foundry*. 17 (2020) 4, 260-271. <https://doi.org/10.1007/s41230-020-0042-2>.
- [3] HARA, T., KITAGAWA, T., KUROKI, K., SAIKAWA, S., TERAYAMA, K., IKENO, S. and MATSUDA, K. Morphologies of Some Graphites in Ductile Cast Irons. *Materials Transactions*. 55 (2014) 9, 1500-1505. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2014167>.
- [4] IACOVIELLO, F., IACOVIELLO, D., DI COCCO, V., DE SANTIS, A. and D'AGOSTINO, L. Classification of Ductile cast iron specimens based on image analysis and support vector machine. *Procedia Structural Integrity*. 3 (2017), 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.04.042>.
- [5] KIANI-RASHID, A.R. and ROUNAGHI, S.A. The New Methods of Graphite Nodules Detection in Ductile Cast Iron. *Materials and Manufacturing Processes*. 26 (2011) 2, 242-248. <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.520788>.
- [6] FRANZEN, D., PUSTAL, B. and BÜHRIG-POLACZEK, A. Mechanical Properties and Impact Toughness of Molybdenum Alloyed Ductile Iron. *International Journal of Metalcasting*. 15 (2021) 3, 983-994. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00533-z>.
- [7] FRANZEN, D., PUSTAL, B. and BÜHRIG-POLACZEK, A. Influence of Graphite-Phase Parameters on the Mechanical Properties of High-Silicon Ductile Iron. *International Journal of Metalcasting*. (2022), <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00761-5>.
- [8] YASUDA, H., SUGIYAMA, A., KIATTISAKSRI, C., MORISHITA, K., NAGIRA, T., YOSHIYA, M., UESUGI, K. and TAKEUCHI, A. X-Ray Imaging of Formation and Growth of Spheroidal Graphite in Ductile Cast Iron. *Material Science Forum*. 925 (2018), 104-109. <https://doi.org/10.4028/www.scientificnet/MSF.925.104>.
- [9] GEDEONOVÁ, Z. and JELČ, I. *Metalurgia litin*. Košice: HF TU. 2000, ISBN 80-7099-516-5.
- [10] OTÁHAL, V. *Tvárná litina (Litina s kuličkovým grafitem)*. Brno: Technicko-ekonomické poradenství. 2008.
- [11] ROUČKA, J. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR. ISBN 80-214-1263-1. 1998.
- [12] GUZIK, E. and WIERZCHOWSKI, D. Using Cored Wire Injection Method in the Production of Austenitic High Ni Alloyed Ductile Iron Castings. *Archives of Metallurgy and Materials*. 58 (2013) 3, 969-972. <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0112>.
- [13] WANG, HM., SHI, YM., WANG, Y. and SU, J. Numerical simulation of the spheroidization process with cored wire injection in liquid iron using finite volume method. *AIP Advances*. 11 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0039201>.
- [14] GUZIK, E. and WIERZCHOWSKI, D. Modern Cored Wire Injection 2PE-9 Method in the Production of Ductile Iron. *Archives of Foundry Engineering*. 12 (2012) 2, 25-28. <https://doi.org/10.2478/v10266-012-0030-0>.
- [15] OTÁHAL, V. *Šedá litina (Litina s lupínkovým grafitem)*. Brno: Technicko-ekonomické poradenství. 2007.
- [16] SOCHA, L., GRYC, K., SVIŽELOVÁ, J., CHMIEL, M., FRONKOVÁ, P., KOZA, K. and KACHLÍŘOVÁ, H. Study of ductile iron production for castings designated for extreme conditions. In *METAL 2021, 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: Tanger Ltd. pp. 172-179. 2021, <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4095>.
- [17] ČSN EN 1563. Slévárnictví – Litina s kuličkovým grafitem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [18] ČSN EN 945-1. Mikrostruktura litin – Část 1: Klasifikace grafitu vizuální analýzou. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [19] ČSN 42 0461. Hodnocení metalografické struktury litin. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1975.
- [20] ASTM A 247-17. Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017.

MSV Metal Studénka získala certifikát EN ISO 14001:2015

Mezinárodně uznávanou normou vypovídající o ekologických postupech ve výrobě získala v těchto dnech dceřiná společnost Třineckých železáren MSV Metal Studénka. Od roku 2023 se bude moci pyšnit certifikátem pro Systém environmentálního managementu dle ISO 14001. Mezinárodní norma jí zvýší možnosti uplatnění výrobků na světových trzích. „Ochrana životního prostředí a udržitelné podnikání jsou dnes nezbytné faktory nejen pro plnění ekologické odpovědnosti, ale také pro uplatnění na trzích,“ potvrzuje generální ředitel společnosti Pavel Krajča. Dodává, že MSV Metal Studénka pracuje na dodržování ekologických postupů ve výrobních procesech dlouhodobě díky koncepční práci a investicím do modernizace výrobních zařízení. Nedílnou součástí je trvalá snaha o úsporu energií.

– z tiskové zprávy –

Development of the Structure and Properties of Aluminium Alloy EN AW 6082 after Severe Plastic Deformation

Vývoj struktury a vlastností slitiny hliníku EN AW 6082 po extrémní plastické deformaci

Ing. Ladislav Kander¹; Ph.D., doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.²; Ing. Jan Kander¹; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.¹

¹ MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Pohraniční 693/31, Vítkovice, 703 00 Ostrava, Česká republika

² Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika

Microstructure and texture development of an EN AW6082 alloy during equal channel angular pressing (ECAP) was investigated and correlated with the mechanical properties. The micro-structure was effectively refined by ECAP, and the original fibre texture of the extruded aluminium alloy was disintegrated, and a new texture was gradually developed by repetitive ECAP pressing. After 6 ECAP passes following the route B_c, the yield stress was lower than that of the as-extruded aluminium alloy, indicating that the texture softening was dominant over the strengthening due to grain refinement. Cross-section of original samples was 20 x 20 mm and their length was 125 mm. Deformation forces were measured during extrusion, resistance to deformation was calculated and deformation speed was determined approximately. Analysis of structure was made with use of light microscopy, TEM and SEM. Mechanical properties of the samples after extrusion were determined by tensile test and by the so-called penetration test.

Key words: micro-structures; properties; aluminium alloy; ECAP

Experimentálně byl ověřován vývoj mikrostruktury a mechanických vlastností slitiny hliníku EN AW 6082 při aplikaci extrémní plastické deformace protlačováním úhlovými kanály (ECAP) a stanoven vztah mezi strukturou a mechanickými vlastnostmi. Příčný průřez výchozích vzorků byl 20 x 20 mm, délka vzorků 125 mm. Vzorky byly protlačovány při teplotě místnosti. Pro zvýšení koncentrace a zrovnomnění deformace v objemu vzorku byly vzorky po jednotlivých protlačeních pootočený kolem podélné osy o 90° a znovu protlačovány (cesta B_c). Při aplikaci extrémní plastické deformace technologií ECAP probíhá intenzivní zjemňování zrna, už v počátečních průchodech vzorků maticí, ale deformace je v objemu vzorků nerovnoměrná. Se zvyšujícím se počtem průchodů vzorků maticí je intenzita zjemňování zrna menší, avšak velikost jednotlivých zrn je rovnoměrnější. Jednotlivá zrna jsou přednostně orientována ve směru hlavní deformace. Po šesti průchodech ECAP tažnost slitiny EN AW 6082 klesá i když zjemnění zrna bude pokračovat i při zvýšeném počtu průchodů ECAP. Při aplikaci ECAP byly měřeny deformační síly, vypočítány deformační odpory v jednotlivých průchodech, stanovena optimální deformační rychlost a teplota deformace se pohybovala pod teplotou rekrystalizace zpracovávané slitiny EN AW 6082. Rozbor struktury byl proveden pomocí světelné mikroskopie, pomocí TEM a SEM. Mechanické vlastnosti vzorků po protlačování byly stanoveny zkouškou tahem a provedením penetračního testu. Využití extrémní plastické deformace pro zvýšení mechanických vlastností Al slitin je v současné době stále ve stádiu laboratorních zkoušek.

Klíčová slova: micro-structures; properties; aluminium alloy; ECAP

1. Introduction

Extrusion by ECAP method enables to obtain a fine-grained structure in larger volumes. Products made by this technique are characterized by high strength properties, Fig. 1.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k d_g^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

where σ_y is the yield stress, σ_0 is a material constant for the starting stress of dislocation movement (or the resistance of the lattice to dislocation motion), k is the strengthening coefficient (a constant unique to each material), and d_g is the average grain diameter.

The Hall–Petch relation (1) predicts that as the grain size decreases, the yield strength increases. The Hall–Petch relation was experimentally found to be an effective model for materials with grain sizes ranging from 1 millimeter to 1 micrometer [2-4]. Consequently, it was believed that if the average grain size was decreased even more to the nanometer length scale, the yield strength would increase as well [5-7]. However, experiments on many nano-crystalline materials demonstrated that if the grains reached the critical grain size, which was typically less than 100 nm, the yield strength would either remain constant or decrease with the decreasing grain size [8]. This phenomenon has been termed as reverse or inverse Hall–Petch relation. A number of different mechanisms

have been proposed for this relation. As suggested by Poková et al. [9], they fall into four categories: (1) Dislocation based, (2) Diffusion based, (3) Grain boundary shearing based, (4) Two phase based [10, 11]. Other explanations, that have been proposed to rationalize the apparent softening of metals with nano-sized grains, include poor sample quality and suppression of dislocation pileups. Many of the early measurements of reverse Hall–Petch effect were likely the result of unrecognized pores in samples. The presence of voids in nano-crystalline metals would undoubtedly lead to their weaker mechanical properties. The pileup of dislocations at grain boundaries is a signature mechanism of the Hall–Petch relationship [12, 13]. However, once grain sizes drop below the equilibrium distance between dislocations, this relationship should no longer be valid. Nevertheless, it is not entirely clear what exactly the dependency of yield stress should be on grain sizes below this point.

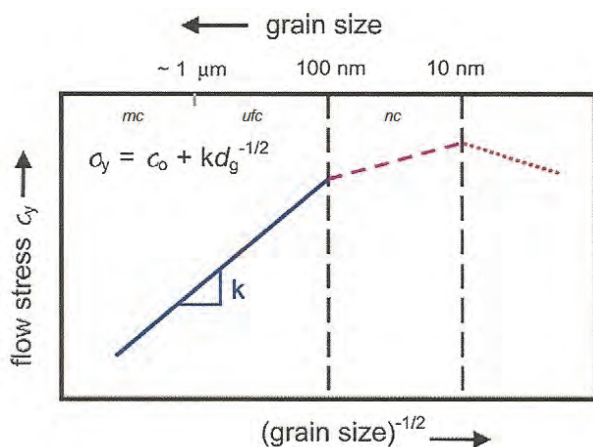


Fig. 1 Schematic representation of the variation of yield stress as function of grain size in mc, ufc and nc metals and alloys

Obr. 1 Závislost meze kluzu na velikosti zrna pro hrubozrnné (mc), ultrajemnozrnné (ufc) a nanostrukturální (nc) materiály

2. Development and structure

Influence of amount of plastic deformation on properties of metallic materials is connected with an increase of internal energy. Internal energy increases right to the limit value, which depends on the manner of deformation, purity, grain size, temperature, etc. As a result of inhomogeneity of deformation caused by the ECAP technique the internal energy gain differs at different places of the formed alloy. For example, the value of internal energy is different in slip planes, at boundaries and inside cells. It is possible to observe higher internal energy also in proximity of precipitates, segregations and solid structural phases. For usual techniques, pure metals, medium amount of deformation and temperatures, the values of stored energy are said to be approx. around $10 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ [14]. In cold extrusion density of dislocations increases with magnitude of plastic deformation. Density of dislocations depends linearly on amount of plastic deformation in accordance with the well-known Eq. (2) [15, 16]:

$$\rho = \rho_0 + K \cdot \varepsilon \quad (2)$$

where ρ_0 is initial dislocation density (10^{10} to 10^{12} m^{-2}), K is a constant, ε is amount of deformation.

Flow stress necessary for continuation of deformation is function of number of lattice defects as stated by Eq. 3 [17, 18]:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot G \cdot b \cdot \rho^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Where τ_0 is initial flow stress, k is a constant ($k = 0.3$), G , is modulus of elasticity in shear ($G \sim 25 \text{ GPa}$) and b is Burgers vector ($b = 0.3$ to 0.4 nm)

3. Experimental procedures

The objective of experiments was to verify deformation behaviour of the given alloy, determine its resistance to deformation, formability and change of structure in extrusion of this alloys. Experiments were made with use of an apparatus, the diagram of which is shown in Fig. 2. Chemical composition the alloy is given in Tab. 1.

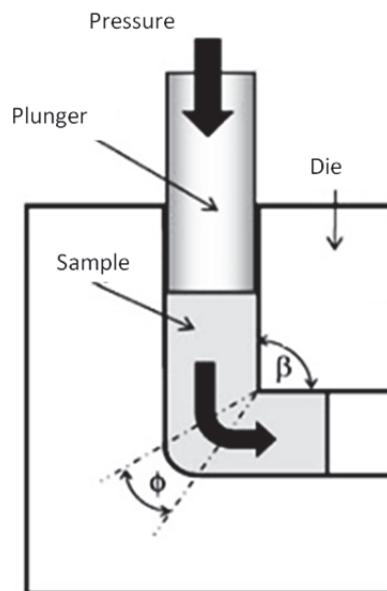


Fig. 2 Schematic illustration of a die used at the present investigation: a) with $\Phi = 90^\circ$ and $\psi = 20^\circ$

Obr. 2 Schématické znázornění tvaru zápustky ECAP: a) s vnitřním úhlem kanálů $\Phi = 90^\circ$ a vnějším úhlem kanálů $\psi = 20^\circ$

Tab. 1 Chemical composition of the EN AW 6082 alloy

Tab. 1 Chemické složení slitiny hliníku EN AW 6082

Contents of elements	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Zn	Ti	Cr	Al
[wt. %]	1.10	0.88	0.92	0.45	0.09	0.20	0.09	0.70	balance

During the process a metal billet is pressed through a die consisting of two channels, equal in cross section and intersecting at an angle Φ . The billet undergoes essentially simple shear deformation, but it retains the same cross-sectional geometry, so that it is possible to repeat the pressings for a number of passes, each one refining the grain to the extent, which is determined by the material characteristics.

Deformation forces were measured during extrusion and pressures in the die were calculated. At extrusion with the radius of rounding of edges ($R_y = 2$ mm; $R_{yn} = 5$ mm) the pressure in the die varied at the 1st pass around $\sigma_{max} = 620$ MPa, and it gradually increased in such a manner that at the fourth pass its value was approximately $\sigma_{max} = 810$ MPa. At extrusion through a die with smaller radii of rounding ($R_y = 0.5$ mm; $R = 2$ mm) the pressure at the first pass was approx. $\tau_{max} = 780$ MPa, and at the third pass it was approx. $\tau_{max} = 1560$ MPa. Significantly higher values of resistance to deformation and strengthening at extrusion are related to high absolute value of octahedral stress, which either contributes to more difficult formation of dislocations or decelerates their movement.

Another factor, which influences flow stress and development of micro-structure significantly, is the angle Φ , which is formed by the axis of vertical and horizontal channel. This angle determines magnitude of in individual passes, and it can be expressed by Eq. (4) [19, 21]:

$$\gamma = 2 \cotg (\Phi/2) \quad (4)$$

Shear strain at the angle $\Phi = 90$ reaches the value of 2, and normal deformation reaches 2.3. Smaller angle Φ leads to higher shear stress at each pass. We have checked the size of the angle Φ in the range from 90° to 120° with use of technological route B_C. We have ascertained, that refining of grains is the most efficient (under the same magnitude of deformation), at the angle of 90° . This is given by the fact that two slip planes in the sample make in this case the angle of 60° . For materials, forming of which is more difficult, it is more advantageous to apply the angle $\Phi = 120^\circ$ together with higher extrusion temperature. It is possible to calculate the magnitude of accumulated deformation from the Eq. (5) [1, 22]:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cotg g \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right] \quad (5)$$

where N is number of passes through a die, Φ is angle channels, Ψ is additional angle.

Values of total accumulated deformation, grain size and mechanical properties of the sample after increasing number of passes are shown in Tab. 2.

Tab. 2 Effective strain intensity, grain size, and mechanical properties samples EN AW 6082 after ECAP

Tab. 2 Nárůst intenzity deformace, velikost zrna a mechanické vlastnosti vzorků slitiny EN AW 6082 po jednotlivých průchodech ECAP

Number of passes	Total strain intensity	Equivalent area reduction	Grain size	0.2% YS	UTS	$\frac{UTS}{0.2\%YS}$	Elong.	$\bar{\sigma}$ $\bar{\sigma} = C \cdot \varepsilon^n$
	[ε]	[%]	[μm]	[MPa]			[%]	[MPa]
0	-	-	50	120	185	1.50	15.5	175.10
1	1.15	69	3.5	190	230	1.20	8.5	179.95
2	2.30	90	2.0	217	252	1.15	7.5	206.90
3	3.45	97	1.5	230	283	1.20	6.5	224.30
4	4.60	99	1.1	250	312	1.25	6.0	237.65
5	5.75	99.8	1.0	265	325	1.25	5.5	248.30
6	6.90	99.9	0.9	275	340	1.25	5.5	257.50

4. Experimental result and discussion

4.1 Micro-structure

Structure of initial original samples is shown in Fig. 3 and structure of samples after individual passes is shown in Fig. 4.

The structure contains ordinary inter-metallic phases corresponding to the given composition of the alloy. Average grain size in transverse direction was determined by quantitative metallography methods and it varied around $50 \mu\text{m}$. Change of shape of the front and rear end of the sample and maintenance of integrity at individual stages of extrusion depend on the level of lubrication and on radii of edges (R_v , R_{vn}) of the extruding channel. After individual passes accumulation of deformation strengthening occurred, the basis of which was in the formed sub-structure, which can be seen in Fig. 5.

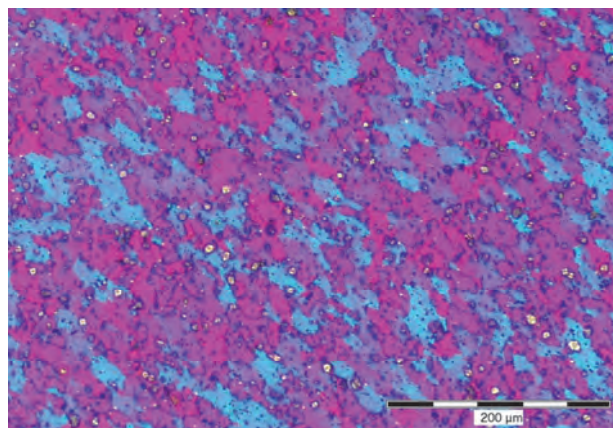


Fig. 3 Microstructure of initial sample EN AW 6082 alloy
Obr. 3 Počáteční mikrostruktura slitiny EN AW 6082

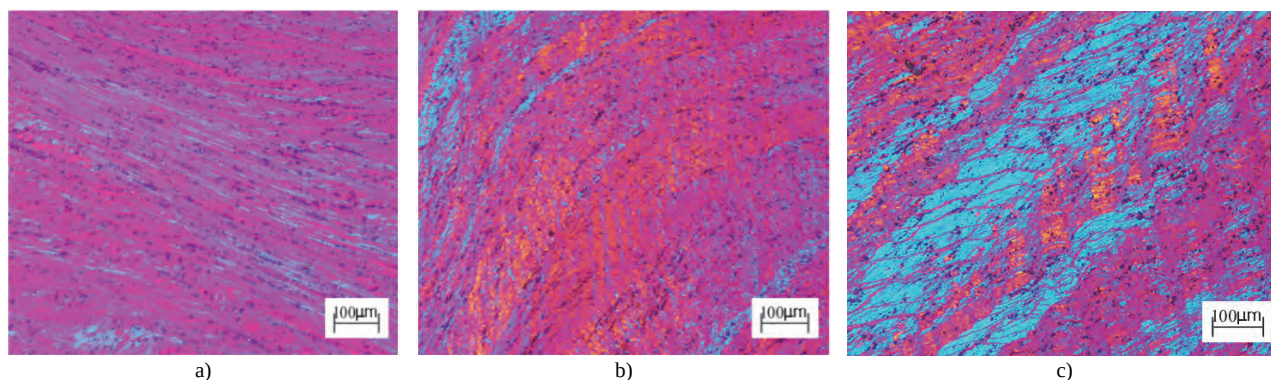


Fig. 4 Microstructure of the samples EN AW 6082 after ECAP extrusion in longitudinal direction: a) after the 1st pass b) after the 2nd pass c) after the 3rd pass

Obr. 4 Mikrostruktura vzorků slitiny hliníku 6082 po protlačování ECAP: a) po 1. průchodu, b) po 2. průchodu, c) po 3. průchodu

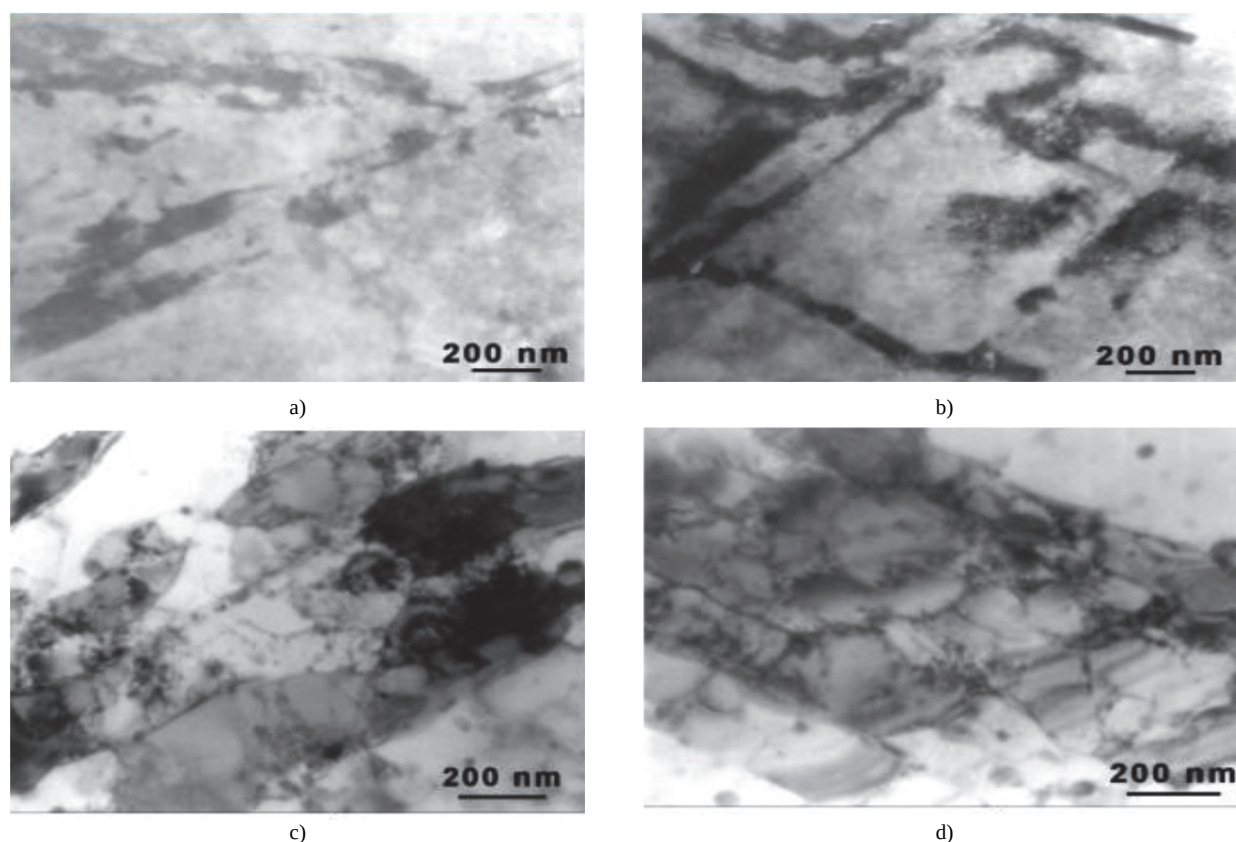


Fig. 5 Sub-structure of 6082 alloy after ECAP extrusion: a) after the 1st pass, b) after the 2nd pass, c) after the 3rd pass, d) after the 4th pass

Obr. 5 Substruktura slitiny hliníku 6082 po jednotlivých průchodech ECAPem: a) po 1. průchodu, b) po 2. průchodu, c) po 3. průchodu, d) po 4. průchodu.

4.2 Mechanical properties determined by tensile test

We have verified influence of rectangular extrusion on mechanical properties with use of classical mechanical tensile test and the so-called small punch test. Miniature test specimens were made from samples after application of the ECAP technique for the tensile test.

Obtained values of tensile strength vary for the aluminium alloy within the range from UTS = 185 to 340 MPa. Obtained values of tensile strength correspond very well with the values obtained by simulation and with approximate values based on the results of measurements of hardness. In the frame of evaluation of influence of the ECAP technique on mechanical properties, samples

without application of the ECAP technique were submitted to tensile test also. We have tested altogether 4 test specimens with cross-section of 2.5×5 mm.

From realized experiment we have determined tensile strength for the 6052 alloy, without ECAP, to be UTS = 185 MPa.

As it follows from comparison of strength properties resulting from rectangular extrusion, the strength of the aluminium alloy was increased approximately by 86.5 %. We have performed a fractography analyses on broken halves of test specimens. Results of the above mentioned analyses, including their graphical presentations are given below.

4.3 Mechanical properties determined by small punch test

Three test specimens in the form of disc with diameter of 8 mm and thickness of 0.5 mm [23] were made from the samples after application of the ECAP technique.

Basic mechanical properties were determined from small punch test, the principle of which consists in penetration of special puncher with spherical surface through the flat disc-shaped sample, which is fixed between the upper holder and the lower die. From said experiments, it is possible to state that tensile strength of the aluminium alloy EN AW 6082 obtained by small punch test varies in the range from UTS = 325 to 345 MPa, which demonstrates very good agreement with the values of tensile strength obtained by the standard tensile test (UTS = 335 to 340 MPa).

5. Conclusion

We have experimentally verified behaviour of the EN AW 6082 aluminium alloy after extrusion. ECAP method is a potential tool for refining of grain in polycrystalline metals. This procedure makes it possible to obtain the grain size of approx. 1 μm after 6 passes. In order to obtain an optimum microstructure, it is necessary to apply more passes with turning of the sample between individual passes by 90° around the longitudinal axis. After 4 passes development of sub-structure occurs. When the die with the angle of 90° is used more intensive deformation is achieved and resistance to deformation is higher than at extrusion with higher angles. Radii of working edges of extruding channel must correspond to conditions for laminar flow of metal.

Acknowledgement

„This paper was created as part of the drawing and use of institutional support for Long-term and conceptual development of a research organization in 2022, provided by the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic“.

References

- [1] VALIEV, R.Z. and LANGDON, T. G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progr. Mater. Sci.* 51 (2006) 881–981.
- [2] HORITA, Z., FUJINAMI, T., NEMOTO, M. and LANGDON, T.G. Equal-channel angular pressing of commercial aluminium alloys: Grain refinement, thermal stability and tensile properties. *Met. Mater. Trans. A* 31 (2000), 691–701.
- [3] XU, C., SZÁRAZ, Z., TROJANOVÁ, Z., LUKÁČ, P. and LANGDON, T.G. Evaluating plastic anisotropy in two aluminium alloys processed by equal-channel angular pressing. *Mater. Sci. Eng. A* 497 (2008), 206–211.
- [4] VALIEV, R. Z., ZHILYAEV, A.P. and LANGDON, T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2014.
- [5] LIU, M., ROVEN, H.J., YU, Y. and WERENSKIOLD, J.C. Deformation structures in 6082 aluminium alloy after severe plastic deformation by equal-channel angular pressing. *Mat. Sci. Eng. A* 483 (2008), 59–63.
- [6] LACKOVÁ, P., MILKOVIČ, O., BURŠÁK, M. and KVACKAJ, T. The Influence of Severe Plastic Deformation on Structure and Mechanical Properties the Aluminium Alloy EN AW 6082. *Key Eng. Mat.* 635 (2014), 18–21.
- [7] RAVISANKAR BALASUBRAMANIAN. Equal-Channel Angular pressing (ECAP). In *Aliofkhazraei Mahmood*, editor. Chapter 13 in handbook of mechanical nanostructuring; 2015.
- [8] JIANG, D., NING, J., SUN, J., HU, Z. and HOU, Y. Annealing Behavior of Al-Mg-Mn Alloy Processed by ECAP at Elevated Temperature. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 18 (2018), 248–254.
- [9] POKOVÁ, M., ZIMINA, M. and CIESLAR, M. The Influence of ECAP on Microstructure Evolution of Aluminium Alloys During in-situ Heating in TEM. *International Journal of Materials Research*, 106 (2015) 7, 676–681.
- [10] GUPTA, A., CHANDRASEKHAR, B. and SAXENA, K.K. Effect of Equal Channel Angular Pressing on Mechanical Properties: An overview. *Mater. Today Proc.* 45 (2021), 5602–5607.
- [11] ABIOYE, O.P., ATANDA, P.O., OSINKOLU, G.A., ABIOYE, A.A., OLUMOR, I.D., ODUNLAMI, O.A. and AFOLALU, S.A. Influence of Equal Channel Angular Extrusion on the Tensile Behavior of Aluminium 6063 Alloy. *Procedia Manuf.* 35 (2019), 1337–1343.
- [12] HOWEYZE, M., ARABI, H., EIVANI, A. and JAFARIAN, H. Strengthening of AA5052 Aluminium Alloy by Equal Channel Angular Pressing Followed by Softening at Room Temperature. *Mater. Sci. Eng. A* 72 (2018), 160–168.
- [13] CABIBBO, M. Microstructure Strengthening Mechanism in Different Equal Channel Angular Pressed Aluminium Alloys. *Materials Science and Engineering A*, 560 (2013), 413–432.
- [14] SNOPIŃSKI, P., TAŃSKI, T. and KRÓL, M. Effect of SPD Processing on the Structure and Properties of Al-Mg Alloy. *Inżynieria materiałowa*. (2018), 4–9.
- [15] DERAKHSHAN, J.F., PARSA, M. and JAFARIAN, H. Microstructure and mechanical properties variations of pure aluminium subjected to one pass of ECAP-Conform process. *Mater. Sci. Eng. A* 747 (2019), 120–129.
- [16] CERRI, E., DE MARCO, V. and LEO, P. FEM and metallurgical analysis of modified 6082 aluminium alloys processed by multipass ECAP: Influence of material properties and different process settings on induced plastic strain. *J. Mater. Proc. Techn.* 209 (2009) 3, 1550–1564.
- [17] MURASHKIN, M., SABIROV, I., KAZYKHANOV, V., BOBRUK, E., DUBRAVINA, A. and VALIEV, R. Z. Enhanced Mechanical Properties and Electrical Conductivity in Ultra-Fine Grained Al Alloy Processed via ECAP-PC. *J. Mater. Sci.* 48 (2013), 4501–4509.
- [18] MACKENZIE, P.W.J. and LAPOVOK, R. ECAP with Back Pressure for Optimum Strength and Ductility in Aluminium Alloy 6016. Part 1: Microstructure. *Acta Mater.* 58 (2010), 3198–3211.
- [19] ANGELLA, G., BASSANI, P., TUISSI, A. and VEDANI, M. Aging Behaviour and Mechanical Properties of a Solution Treated and ECAP Processed 6082 Alloy. *Materials Transactions*, 45 (2004) 7, 2282–2287.
- [20] GUPTA, A., SAXENA, K., BHARTI, A., LADE, J., CHADHA, K. and PARESI, P.R. Influence of ECAP Processing Temperature and Number of Passes on Hardness and Microstructure of Al-6063. *Adv. Mater. Process. Technol.* (2021), 1–12.
- [21] JIANG, J.F., YING, W., LIU, Y.Z., XIAO, G.F. and HUA, L. Microstructure and Mechanical Properties of 7005 Aluminium Alloy Processed by one-pass Equal Channel Reciprocating Extrusion. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 31 (2021), 609–625.
- [22] BARENJI, A.B., EIVANI, A., HASHEMINIASARI, M., JAFARIAN, H. and PARK, N. Effects of Hot Forming Cold die Quenching and Inter-Pass Solution Treatment on the Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of AA2024 Aluminium Alloy after Equal Channel Angular Pressing. *J. Mater. Res. Technol.* 9 (2020), 1683–1697.
- [23] GREGER, M. and KANDER, L. Evaluation of Mechanical Properties of Ultra-Fine Grain Titanium Using Small Punch Tests. In 5th Int. Conf. *NANOCON 2013*. Brno (Czech Republic): Tanger, s.r.o., 2013, 560–565. ISBN 978-80-87294-44-4.

Experimentální výzkum snižování obsahu škodlivých příměsových prvků z kovové taveniny v přetlaku argonu

Experimental Research of Reducing the Content of Harmful Impurity Elements from Metal Melt in Argon Overpressure

Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.; Ing. Ondřej Kotásek; Petr Teplárek

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

Práce se zabývá posouzením vlivu vápníku a jeho sloučenin na odstranění zejména síry a fosforu z ocelové taveniny legované chromem a manganem o obsazích vyšších než 1 hm. %. Pozornost byla zaměřena také na možnou redukci dalších škodlivých prvků, jako jsou arsen, antimon a cín. Experimenty byly provedeny ve vakuové indukční peci v přetlaku argonu cca 0,5 MPa na dvou tavných modifikované oceli dle ČSN 17 102. Získané výsledky prokázaly, že za daných experimentálních podmínek lze působením vápníku v kovové tavenině legované Cr významně snížit obsah nežádoucích příměsí, síry o 0,007 hm. % a fosforu o 0,004 hm. %. U druhé experimentální tavy došlo k významnému snížení rovněž arsenu, antimonu a cínu, což pravděpodobně souviselo s větším podílem reakčního činidla (CaFe), které se dostalo do objemu kovové taveniny při aplikaci. Pro potvrzení výsledků a rozšíření získaných poznatků v dané oblasti výzkumu by bylo vhodné pokračovat v další experimentální činnosti.

Klíčová slova: kovová tavenina; škodlivé příměsové prvky; vápník; vakuová indukční pec; přetlak argonu

The work deals with the assessment of the effect of calcium and its compounds on the removal of mainly sulphur and phosphorus from chromium and manganese alloyed steel melts. The content of these alloying elements was higher than 1 wt. %. Attention was also focused on the possible reduction of other harmful elements such as arsenic, antimony and tin. The experiments were carried out in a vacuum induction furnace under argon overpressure of about 0.5 MPa on two CSN 17 102 modified steel melts. The obtained results showed that content of harmful impurities, namely sulphur and phosphorus, can be significantly reduced by the application of calcium profile into the molten steel containing 1 wt. % of chromium or higher. In the second experimental melt, arsenic, antimony and tin were also significantly reduced, which was probably related to the larger amount of the CaFe reactant that entered the molten steel volume during application. Further experimental work would be advisable to confirm the results and extend the knowledge gained in this field of research.

Key words: molten steel; harmful impurity elements; calcium; vacuum induction furnace; argon overpressure

1. Úvod

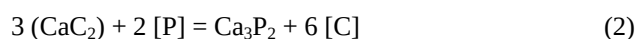
Nežádoucí příměsové prvky v ocelích mohou snižovat jejich mechanické a další užité vlastnosti. Jejich odstranění standardními pochody sekundární metalurgie je nepatrné a v některých případech zcela nemožné. Především u legovaných ocelí je použití oxidačních metod nežádoucí z důvodu snižování obsahu legujících prvků v tavenině (zvýšením jejich propalu v oceli) a v důsledku toho i zvýšení energetické a ekonomické náročnosti výroby spojené mimo jiné i s vyšší produkcí CO₂. U oxidačních pochodů závisí oxidace škodlivých prvků na jejich afinitě ke kyslíku. Lze rovněž využít i redukčních pochodů, kde odstranění škodlivého příměsového prvku závisí na velikosti jeho afinity k redukčnímu prvku. Jedním z nejsilnějších redukčních činidel, ale také dezoxidačních, desulfuračních a modifikčních, užívaných v sekundární metalurgii, je vápník [1].

Dle [2-4] činí při atmosférickém tlaku 0,1 MPa teplota tavení vápníku 842 °C a teplota varu 1492 °C. Čistý CaC₂ s teplotou tavení 2300 °C se taví v tekuté oceli již v rozmezí 1400-1700 °C. Jako výsledné produkty chemických reakcí sledovaných škodlivých prvků a vápníku a jeho sloučenin se předpokládají CaO, CaS, Ca₂Sn, Ca₂Pb, Ca₃N₂, Ca₃P₂, Ca₃As₂, Ca₃Sb₂, CaZn a CaCu₂. Průběh vybraných reakcí při 1600 °C prezentuje obr. 1 [5, 6].

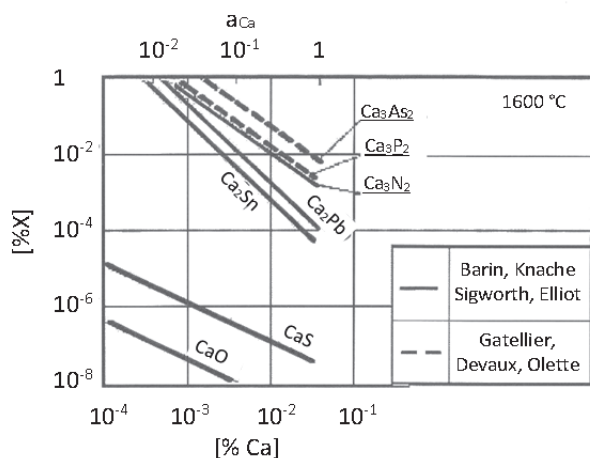
Leal a Torssell [7] popisují chemickou reakci mezi CaC₂ a S následovně



Chemická reakce mezi CaC₂ a P podle [4] probíhá obdobně



V případě použití Ca místo CaC_2 lze reakci s fosforem vyjádřit následovně



Obr. 1 Termodynamická stabilita produktů reakcí některých škodlivých prvků s vápníkem v tavenině železa [7, 8]

Fig. 1 Thermodynamic stability of reaction products of selected harmful elements with calcium in molten steel [7, 8]

2. Popis experimentu

Cílem předložené práce bylo posouzení vlivu vápníku a jeho sloučenin na odstranění zejména síry a fosforu z ocelové taveniny legované chromem a manganem o obsazích vyšších než 1 hm. %. Pozornost byla zaměřena také na možnou redukci dalších škodlivých prvků, jako jsou arsen, antimon a cín. Experimenty byly provedeny na dvou tavnách modifikované oceli dle ČSN 17 102, které se významně lišily zejména obsahem uhlíku. Průběh taveb byl v zásadě totožný.

Na atmosférické indukční tavicí peci (IP) byla vyrobena základní vsázka a spodem odlita do ingotu V2A o hmotnosti cca 1400 kg. Odlitý ingot byl po stripování použit jako základní vsázka pro vakuovou přetlakovou indukční tavicí pec (VPIM, příkon 600 kV, frekvence 1 khz), ke které byly přidány legující přísady, viz tab. 1 a tab. 2. Po uzavření kesonu byl tlak v jeho prostoru snížen vakuováním na hodnotu 100 Pa (abs.), po čemž následovalo napuštění kesonu argonem na požadovaný tlak 0,4-0,5 MPa (abs.). Realizace taveb v přetlaku argonu byla zvolena z důvodu udržení redukčních procesů v objemu taveniny. Kelímek pece byl zhotoven z magnetitové výdušky o složení 96,8 hm. % MgO , 0,1 hm. % Al_2O_3 , 1,3 hm. % SiO_2 , 0,3 hm. % Fe_2O_3 a 2,0 hm. % CaO . [8, 9].

Po roztavení byl odebrán první vzorek kovové taveniny pro provedení chemické analýzy, poté následovalo dávkování směsi karbidu vápníku CaC_2 (29 kg na 1 t taveniny) a kazivce CaF_2 (19 kg na 1 t taveniny).

Druhý vzorek kovové taveniny pro chemickou analýzu byl odebrán za cca 20 min po přísadě směsi CaC_2 a CaF_2 . Bezprostředně poté bylo pod hladinu tekutého kovu, za pomoci dávkovacího přípravku (obr. 2, 3), ponořeno

reakční činidlo – plněný profil CaFe (97 hm. % Ca a 3 hm. % Fe). Dávkovací přípravek udržoval CaFe pod hladinou taveniny po celou dobu jeho chemických reakcí. Hmotnost CaFe byla 8 kg na 1 t taveniny.

Třetí vzorek kovu pro provedení chemické analýzy byl odebrán cca 20 min po přísadě CaFe . Vzorky kovové taveniny byly odebírány ponornými sondami, se současným měřením teploty.

Inertní argonová atmosféra uvnitř kesonu během celého metalurgického procesu (tavení, dosazování, legování, odebírání vzorků a měření teploty) dosahovala tlaku 0,4-0,5 MPa (abs.).



Obr. 2 Dávkovací přípravek s reakčním činidlem – plněný profil CaFe (97 hm. % Ca a 3 hm. % Fe)

Fig. 2 Reagent doser – CaFe filled profile (97 wt. % Ca, 3 wt. % Fe)



Obr. 3 Dávkovací přípravek s reakčním činidlem po dávkování do taveniny oceli v přetlaku argonu.

Fig. 3 Reagent doser after dosing into the molten steel in argon overpressure.

3. Dosažené výsledky

3.1 První experimentální tavba

V tab. 1 je uvedeno chemické složení 1. tavby. Vzorek 1 byl odebrán po roztavení vsázky a vzorek 2 po cca 15 min pro kontrolu.

Následovalo dávkování přísad CaF_2 a CaC_2 na hladinu tekutého kovu a ponořením CaFe do objemu taveniny, za 10 min byl odebrán vzorek 3 a následně po 30 min vzorek 4.

Z tab. 1 je patrné snížení obsahu S o 0,005 hm. % a P o 0,002 hm. %. Z výše uvedených skutečností je možno konstatovat, že bylo úspěšně provedeno odstranění síry a z části také fosforu. Po první experimentální tavbě bylo zjištěno znehodnocení výdusky VPIM v oblasti struskové čáry. Ta se od hladiny tekutého kovu, do výšky 200-300 mm, zcela, až na výmaz rozpustila do strusky. Je potřeba dodat, že během dávkování CaF_2 , CaC_2 a CaFe došlo k zadýmení vnitřního objemu kesonu.

Po opravě výdusky VPIM šamotovým opravárenským materiálem, byla provedena druhá experimentální tavba.

3.2 Druhá experimentální tavba

Pro druhou experimentální tavbu byl kelímek naplněn na cca 2/3 (1000 kg) svojí tonáže z důvodu zamezení styku kovu nebo strusky s opravenou výduskou,

V tab. 2 je uvedeno chemické složení vsázky kovu, před dosazením legujících přísad. Z tavebních zkoušek po natavení přísad (vzorek 1 a 2) nebylo možno zjistit chemické složení, a proto je pro vyhodnocení přidáno chemické složení vsázkového ingotu. Stejně jako u první experimentální tavby následovalo dávkování přísad CaF_2 a CaC_2 na hladinu tekutého kovu a ponořením CaFe (ponoření asi z jedné poloviny) do objemu taveniny, po cca 10 min byl odebrán vzorek 3 a po dalších 20 min (30 min po dávkování CaFe) byl odebrán vzorek 4

Tab. 1 Chemické složení ocelové taveniny (hm. %), 1. tavby

Tab. 1 Chemical composition of steel melt (wt. %), the 1st heat

Označení vzorku	C	S	Mn	Si	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	W	Co	As	Sb	Sn
1 - po roztavení	0,54	0,011	0,42	0,23	0,014	0,13	0,11	6,08	0,028	0,024	0,005	<0,003	<0,005	0,007	0,005	0,003	0,008
2	0,52	0,012	0,42	0,24	0,015	0,13	0,10	5,29	0,028	0,023	<0,005	<0,003	<0,005	0,006	0,005	0,003	0,009
3	0,68	0,006	0,46	0,30	0,014	0,13	0,10	5,24	0,023	0,024	0,007	<0,003	<0,005	0,007	0,005	0,003	0,007
4	0,63	0,006	0,46	0,32	0,012	0,13	0,10	5,22	0,024	0,024	0,007	<0,003	<0,005	0,006	0,005	0,003	0,008

Tab. 2 Chemické složení ocelové vsázky a ocelové taveniny (hm. %), 2. tavby

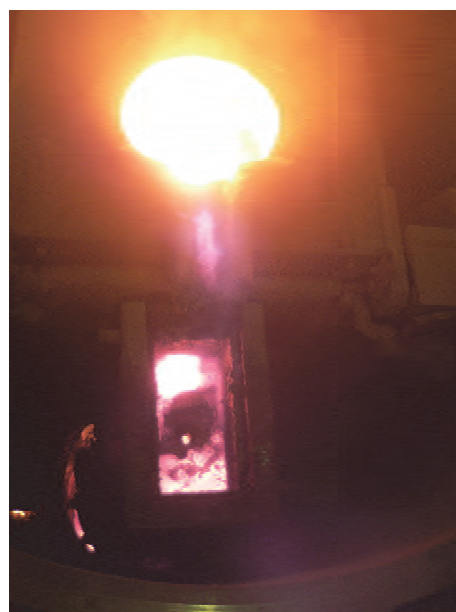
Tab. 2 Chemical composition of steel batch and steel melt (wt. %), the 2nd heat

Označení vzorku	C	S	Mn	Si	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	W	Co	As	Sb	Sn
Vsázka kovu (ingot)	0,14	0,011	0,66	0,18	0,017	0,17	0,062	0,085	0,013	0,007	<0,005	<0,003	0,005	0,003	0,007	0,004	0,011
3	1,17	0,003	0,63	0,24	0,014	0,16	0,079	5,23	0,006	0,016	0,009	<0,003	0,005	0,003	0,003	0,001	0,007
4	1,11	0,004	0,63	0,23	0,013	0,16	0,078	5,18	0,010	0,016	0,009	<0,003	0,005	0,003	0,003	0,001	0,008

Z tab. 2 je patrné snížení obsahu S o 0,007 hm. %, P o 0,004 hm. %, As o 0,004 hm. %, Sb o 0,003 hm. % a Sn o 0,003 hm. %. Snížení množství škodlivých prvků As, Sb, Sn oproti první experimentální tavbě pravděpodobně souviselo s větším podílem reakčního činidla (CaFe), které se dostalo do objemu kovové taveniny při aplikaci. Na základě výše uvedených skutečností je možno konstatovat, že odstranění škodlivých příměsových prvků je popsáním způsobem v daných podmínkách schůdné a proveditelné.

Projevil se fakt, že i při tlaku 0,5 MPa se část Ca z reakčního činidla odpaří a způsobí zadýmení vnitřního prostoru kesonové nádoby. Zadýmení bylo příčinou toho, že reakční činidlo nebylo zcela ponořeno.

Na závěr byla, při otevřeném kesonu zařízení VPIM, odlita tavenina z tavicí pece, přes mezípaneve, horem do kokilové sestavy V2A (viz obr. 4). Vzhledem k hornímu odlévání ingotu a vyššímu obsahu strusky v tavicím kelímku při odlévání, měl ingot velmi špatnou kvalitu povrchu (viz obr. 5 a obr. 6).



Obr. 4 Otevřený keson zařízení VPIM, nahoře indukční tavicí pec, před ní mezípaneve, která leží na kokilové sestavě typu V2A, po odlití taveniny

Fig. 4 The open caisson of the VPIM device, the induction melting furnace on top, in front of it the tundish, which rests on the V2A type mold assembly, after the melt has been cast



Obr. 5 Odlitý ingot typu V2A
Fig. 5 Poured V2A ingot



Obr. 5 Odlitý ingot se zalitou dopadovou deskou používanou při odlévání horem
Fig. 5 Ingot with impact plate encased due to the use of top pouring technology

Závěr

Článek se zabýval posouzením vlivu vápníku a jeho sloučenin na odstranění síry, fosforu a některých dalších škodlivých příměsových prvků z ocelové taveniny dvou experimentálních taveb z modifikované oceli ČSN 17 102. Experimenty byly realizovány ve vakuové přetlakové indukční peci. Získané výsledky experimentálních taveb prokázaly, že za přetlaku argonu

0,5 MPa abs. lze působením vápníku v kovové tavenině legované Cr významně snížit obsah nežádoucích příměsí, a to síry až o 0,007 hm. % a fosforu až o 0,004 hm. %. Pro potvrzení výsledků a rozšíření získaných poznatků by bylo vhodné experimenty v této oblasti výzkumu dále pokračovat.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci Institucionální podpory dlouhodobého a koncepčního rozvoje výzkumné organizace v roce 2022, kterou poskytlo Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky.

Literatura

- [1] RYŠ, P., CENEK, M., MAZANEC, K. a HRBEK, A. *Nauka o materiálu I, Nauka o kovech, 4. svazek Železo a jeho slitiny*, Brno: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1975, 554 s.
- [2] KURKA, V., KRATOCHVÍL, I., KRAYZEL, M. a MRÁČEK, J. *Nové technologie odstraňování škodlivých příměsových prvků z kovové taveniny*. In *Teorie a praxe výroby a zpracování oceli*, 2.-3. dubna 2008, Rožnov pod Radhoštěm. Ostrava: Tanger, 2008, ISBN 978-80-86840-39-0.
- [3] ALLIBERT, M. *Slag Atlas*. 2. vydání. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 1995. ISBN 3-514-00457-9.
- [4] TAKENOUCHI, T. *Dephosphorization under reducing conditions*. In *Scaninject V*, part II, 6.-8. 2008 června, 1989, Lulea, Švédsko. Lulea: MEFOS, 1989.
- [5] SHUI, Z. and FENG, G. *The reducing dephosphorization of stainless steel by injection powder*. In *Scaninject IV*, part II, 11-13. 1986, Lulea, Švédsko. Lulea: MEFOS, 1986.
- [6] KRAYZEL, M. et al. *The short assessment of development state-of-art and practical experiments with accompanied element removal from steel melts in the strong reducing setting (Stručné shrnutí stavu znalostí a výsledků praktických experimentů s odstraňováním doprovodných prvků z ocelových tavenin v silně redukčním prostředí)*. In *Iron and Steel Making*, 4-6.10.2006, Szczyrk, Polsko. ISBN 978-83-912054
- [7] LEAL, C. and TORSSELL, K. *Dephosphorization of chromium steels by injection of calcium carbide*. In *Scaninject IV*, part I, 11-13 června, 1986, Lulea, Švédsko. Lulea: MEFOS, 1986.
- [8] KURKA, V., KRATOCHVÍL, I., KRAYZEL, M. a RAŠKA, P. *Vakuová a přetlaková indukční tavící pec - Zkušební provoz. Dílčí zpráva o řešení projektu MŠMT „Výzkumný záměr č.MSM 2587080701“ za rok 2006, Ostrava, prosinec 2006.*
- [9] KURKA, V., KRATOCHVÍL, I. a KRAYZEL, M. *Vakuová a přetlaková indukční tavící pec - Experimentální tavby. Dílčí zpráva o řešení projektu MŠMT „Výzkumný záměr č.MSM 2587080701“ za rok 2007, Ostrava, prosinec 2007.*

Numerická simulace odlévání a tuhnutí 1,6t ingotu z nástrojové oceli pomocí softwaru THERCAST

Numerical Simulation of Casting and Solidification of 1,6t tool steel ingot in THERCAST Software

Ing. Ondřej Kotásek; Ing. Marek Dobiáš; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.; Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.

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

Předložený článek se zabývá numerickou simulací odlévání a tuhnutí ingotu o hmotnosti 1,6 t z nástrojové oceli 40CrMnMo7, která se používá na formy a rámy větších rozměrů pro zpracování plastů a rámy pro tlakové lití kovů. Numerické simulace byly realizovány ve společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. pomocí softwaru THERCAST® pracujícím na bázi metody konečných prvků. Cílem práce bylo při zadaných okrajových podmínkách prověřit plnění kokily ocelí, parametry tuhnutí a predikování možného vzniku mikroporozity. Dosavadní získané výsledky ukázaly, že navržená technologie odlévání a tvar ingotu se z kvalitativního pohledu jeví jako vyhovující. V rámci budoucích výzkumných aktivit budou pro daný typ ingotu provedeny další série numerických simulací, při kterých bude sledován např. výskyt a rozložení segregací a vybrané napěťově-deformační charakteristiky.

Klíčová slova: numerická simulace; sw THERCAST®; nástrojová ocel 40CrMnMo7; ingot; lití; tuhnutí

The paper deals with numerical simulation of casting and solidification of a 1.6 t ingot made of 40CrMnMo7 tool steel, which is used for moulds and frames of larger dimensions for plastics processing and frames for metal die casting. The numerical simulations were carried out at MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. using THERCAST® software based on the finite element method. The aim of the work was to verify the mould filling with steel, the solidification parameters and the prediction of possible microporosity formation under the given boundary conditions. The obtained results shown that designed casting technology and ingot shape appear to be satisfactory from a qualitative point of view. In the framework of future research activities, further series of numerical simulations will be carried out for this type of ingot to investigate e.g. the occurrence and distribution of segregations and selected stress-strain characteristics.

Key words: numerical simulation; THERCAST® sw; 40CrMnMo7 tool steel; ingot; casting; solidification

1. Úvod

Řešení tepelných úloh v systémech s rozloženými parametry lze provést analyticky, numericky nebo experimentálně. V počítačových simulačních výpočtech tepelných dějů mezi odlitkem a slévarenskou formou mají uplatnění numerické metody. Jejich podstata závisí na diskretizaci proměnných, k čemuž přispívá typická opakovatelnost jednoduchých algebraických operací určitého typu. Numerické metody nám umožňují získat řešení dané tepelné úlohy v konečném počtu diskretních míst, a to jak v celé oblasti, tak i pouze v povrchové části. K řešení úloh se používá jedna ze dvou numerických metod – metoda konečných prvků nebo metoda konečných diferencí [1]. Metoda konečných prvků (Finite Elements Method) je numerickou metodou řešení (parciálních) diferenciálních rovnic v kontinuu. FEM využívá prostorové diskretizace většinou tzv. triangulací řešené oblasti, kde se hledá po částech spojitá funkce. Tímto se hranice řešené oblasti nahrazují polynomy. Základní elementy popisující plochu jsou plošky ve tvaru trojúhelníku [1, 2].

Pro optimalizaci metalurgických procesů pomocí numerických simulací využívá společnost MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. jako jednu z možností software THERCAST® pracující na bázi FEM. S vybraným termomechanickým modelem dokáže výkonný řešič vektorových rovnic predikovat relativně přesné výsledky tepelného pole kovu, eventuálně i vybraných okolních komponentů lící sestavy. Pomocí daného sw je možné stanovit např. dobu tuhnutí kovu, tlak, napětí, deformaci v kovu, jeho smrštění, přenos tepla mezi jednotlivými prvky lící soustavy a další a následně pak umožní určit přesný tvar finálního odlitku [3].

Hlavním cílem této práce bylo pomocí numerického modelování prozkoumat fyzikální vlastnosti nástrojové oceli během procesu odlévání, respektive tuhnutí a matematicky ověřit navrženou technologii lití. Byly prověřeny nastavené okrajové podmínky, jako je teplota, rychlost lití, geometrie ingotu (poměr H/D), sledován vývoj smrštění kovu a možných vad ingotu. Bylo rovněž ověřováno, zda během solidifikace nezůstane tekuté jádro uzavřené v kritické centrální oblasti ingotu.

Popis experimentu

Numerický výpočet se obecně skládá z následujících etap: preprocessing – zahrnuje tvorbu geometrie a generaci výpočetní sítě; processing – definice a samotné řešení výpočtu; postprocessing – analýza výsledků numerické simulace [4]. Pro experimenty byla použita nástrojová ocel 40CrMnMo7, jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 1. Jedná se o ocel používanou na formy a rámy větších rozměrů pro zpracování plastů, rámy pro tlakové lití kovů apod. Vyznačuje se dobrou obrobiteľnosťou i v zušlechťeném stavu, dobře se prokaluje i ve větších rozměrech a je rovněž vhodná k nitridování a cementování. [4-6].

Tab. 1 Chemické složení oceli 40CrMnMo7 [hm. %]

Tab. 1 Chemical composition of the 40CrMnMo7 steel [wt. %]

C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P
0,40	1,50	0,30	2,00	0,20	0,035	0,035

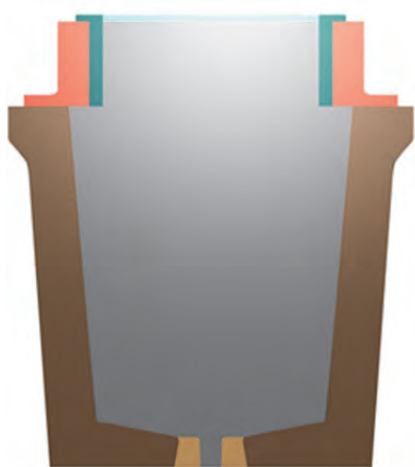
Vlastnosti žáruvzdorných materiálů, včetně materiálůvých modelů byly vygenerovány z knihovny softwaru THERCAST®. Vybrané termo-fyzikální veličiny použité pro simulace jsou uvedeny v tab. 2. Ocel byla odlévána spodem do litinové kokily o středním průměru 0,58 m, výšce 0,7 m a úkosu plochy stěny kokily od základní

kolmice na vtok 96,4°. Geometrie kokily a ingotu (1,6 t) jsou znázorněny na obr. 1. Objemová výpočetní síť ingotu byla tvořena čtyřstěny o velikosti strany 1,5 cm a v oblasti vtoku čtyřstěny o velikosti strany 0,8 cm. Počet definovaných elementů v těle ingotu byl 19729 a 2884 ve vtokové části, celkem tedy 22613. Zjemnění výpočetní sítě v oblasti vtoku kokily bylo provedeno za účelem přesnější simulace proudění, viz obr. 2. Výpočetní úloha byla nadefinována jako termomechanická.

Tab. 2 Vybrané termo-fyzikální veličiny použité pro simulace

Tab. 2 The thermo-physical variables used for simulations setting

Tepelná vodivost	31 [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Specifické teplo	824 [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Latentní teplo	245 000 [J·kg ⁻¹]
Hustota	7064 [kg·m ⁻³]
Teplota likvidu	1433 [°C]
Teplota solidu	1463 [°C]
Teplota lití	1540 [°C]
Rychlost lití	0,00132 [m ³ ·s ⁻¹]
Viskozita	0,0066 [kg·m·s ⁻¹]

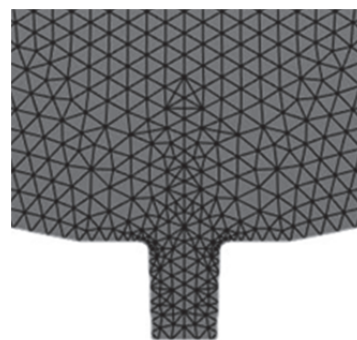


(a)



(b)

Obr. 1 Geometrie (a) kokily a (b) ingotu
Fig. 1 Mould (a) and ingot (b) geometry

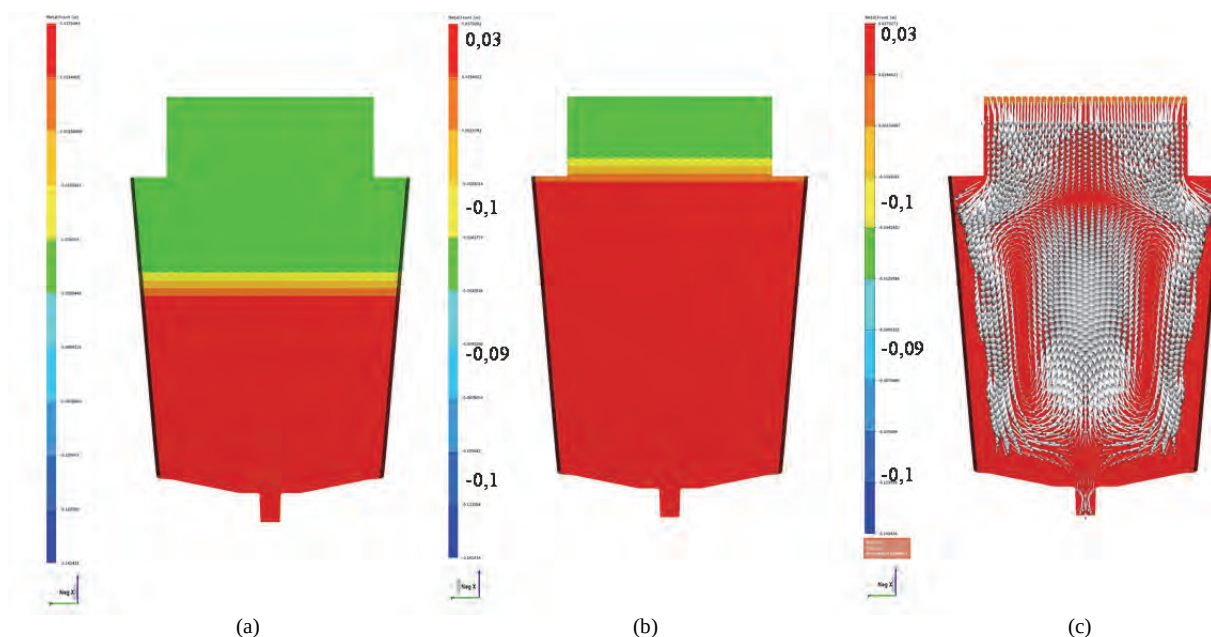


Obr. 2 Detail výpočetní sítě v oblasti vtoku do kokily
Fig. 2 Detailed view on the computational mesh in the mould inlet area

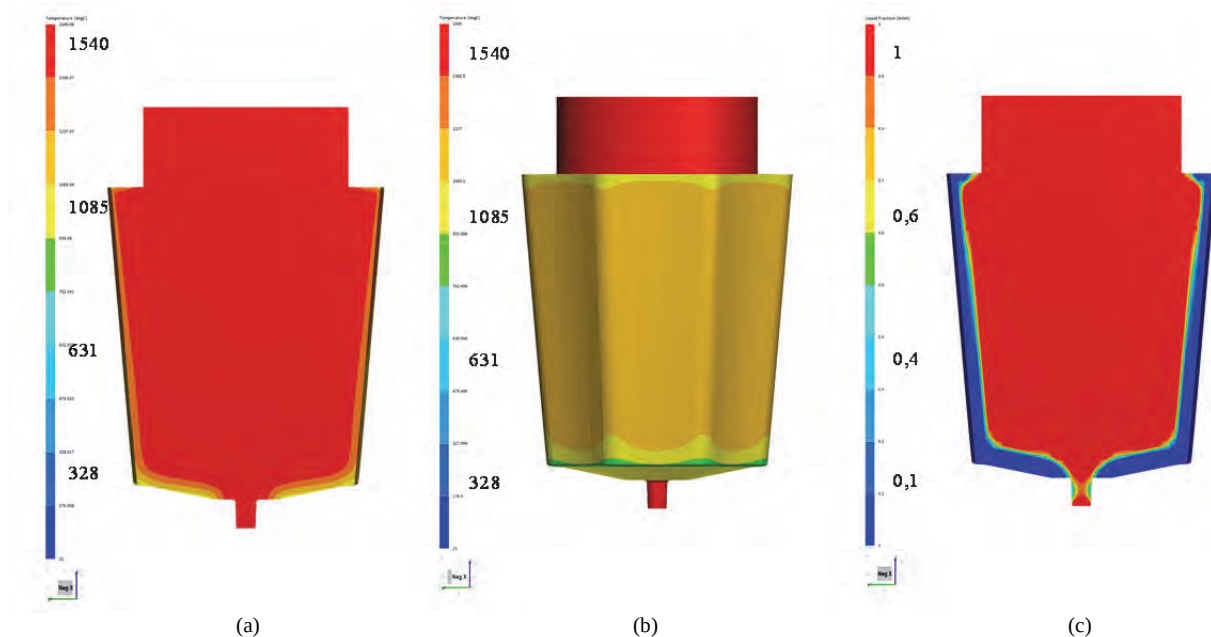
2. Výsledky

Výsledky simulace můžeme z časového hlediska rozdělit do dvou skupin. První skupina zahrnuje výsledky od počátku do konce lití oceli do kokily a druhá skupina výsledky související s procesy tuhnutí a ochlazování odlitého kovu v kokile. Obr. 3 prezentuje zaplnění ingotu v 50 %, 90 % a plnění ingotu na 99 % s vektory znázorněnými s relativním zmenšením na 20 %. Jejich

hodnoty (z povrchu) jsou kladné uvnitř kovu a záporné směrem ke vzduchu (m). U laminárního proudění je v celém objemu vidět pouze proudnicové proudění, kde jsou dráhy jednotlivých kapalných částic ve vrstvách vzájemně rovnoběžných. Celková doba lití ingotu byla simulována na 220 sekund. Obr. 4 ukazuje příklad teplotního pole a frakce kapalně fáze bezprostředně po úplném naplnění kokily. Výsledky ukazují teplotu ve °C.



Obr. 3 Plnění kokily taveninou při 50 % (a), 90 % (b), vektorový tok taveniny při 99 % zaplnění (c)
Fig. 3 Mould filling (a) 50%, (b) 90%, (c) flow using velocity vectors - 99%



Obr. 4 Teplotní pole (°C) po odlití - po průřezu ingotu (a), povrch ingotu (b), podíl tekuté fáze po dokončení lití (c)
Fig. 4 Temperature field (°C) after full ingot filling (a), in cross section (b), around the ingot liquid phase fraction (c)

Při simulaci byla sledována teplota od počátku odlévání až do úplného utuhnutí ingotu. Podíl tekuté a pevné fáze je určen stupnicí, na které 1 znamená tekutou fázi a 0 znamená pevnou fázi (obr. 5). Podle tepelného výpočtu bylo úplného ztuhnutí dosaženo přibližně za 11 000 s, tedy za cca 3 hodiny. Obr. 5 ukazuje podíl tekuté fáze oceli během tuhnutí při 50 %, 75 % a 95 % podílu pevné fáze. Výsledky simulace ukázaly, že se ve střední části ingotu vytváří tepelný uzel, který se postupně se zvětšujícím se podílem utuhlé fáze v čase posouvá směrem k hlavě ingotu. Je tedy možno konstatovat, že podmínky odlévání a design kokily byly vhodně zvoleny, protože umožňovaly postupné dosazování tekuté oceli do

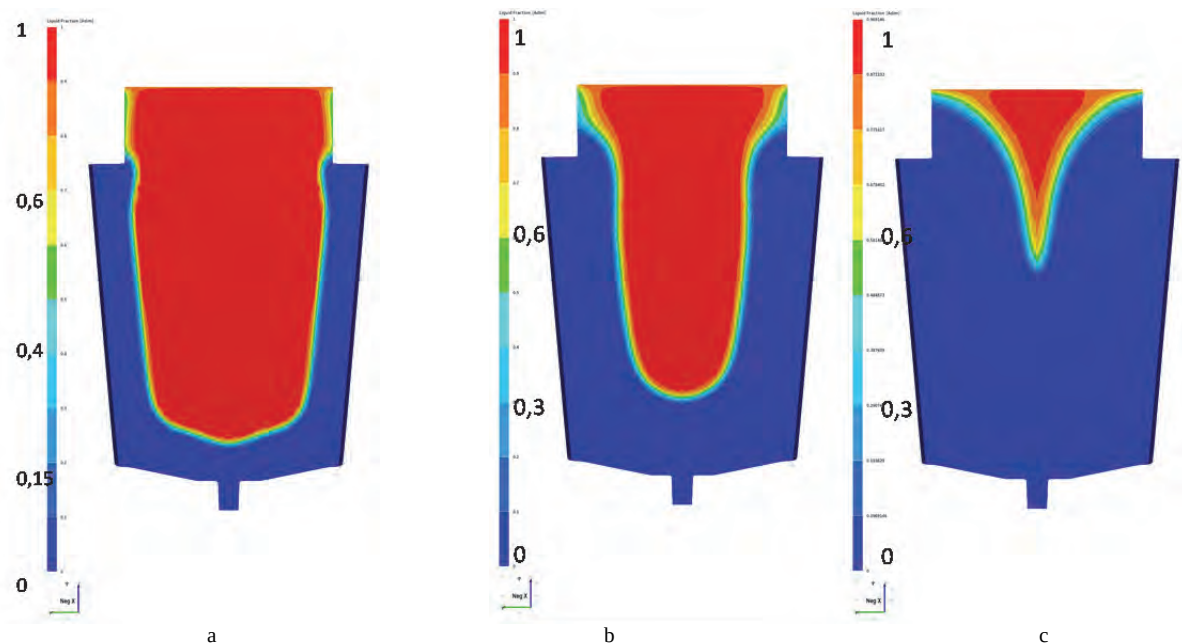
těla ingotu a nebylo pozorováno uzavření kapalného jádra v kritické centrální oblasti.

Snižováním teploty (ochlazováním), ale také např. v důsledku zvýšení tlaku dochází k objemovým ztrátám kovu v objemu tuhneícího ingotu, tzv. smrštění, viz obr. 6. Přehřátá tavenina při styku s kokilou následkem tepelného šoku a vysokého odvodu tepla vytvoří na povrchu ingotu natuhlou vrstvičku, takzvanou licí kůru. Smrštěním této kůry vzniká mezera mezi povrchem ingotu a kokilou. Přerušuje se tak dokonalý styk mezi těmito povrchy. Odvod tepla je poté omezený. Smršťování povrchu tuhneícího ingotu je v prvních fázích tuhnutí

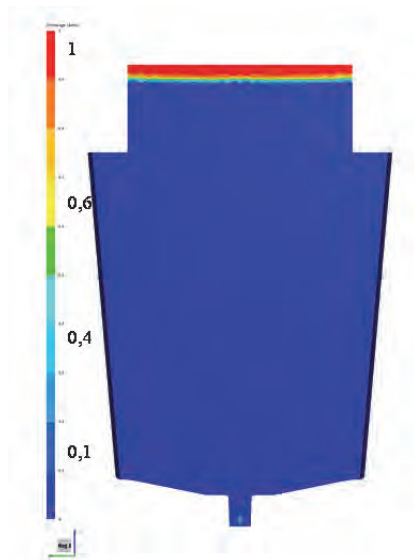
kompenzováno plastickou deformací oceli. U experimentálního 1,6 t ingotu bylo smrštění zvláště výrazné v hlavě ingotu a méně výrazné po obvodu ingotu. V rámci numerické simulace byl predikován rovněž vznik vnitřní porozity vzniklé v důsledku smrštění (obr. 7). Posouzení bylo provedeno dle Niyamova kritéria - rov. 1,

kde $\dot{T}$ je rychlost ochlazování a ΔT je gradient teploty. Zjištěná hodnota 0,02 poukázala na velmi nízkou pravděpodobnost možnosti vzniku defektů v těle ingotu.

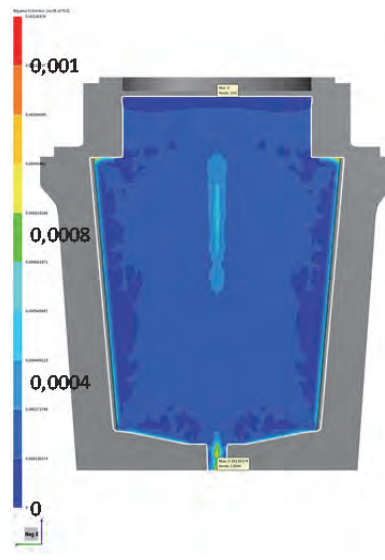
$$Ni = \frac{\sqrt{\|\dot{T}\|}}{\|\Delta T\|} \quad (1)$$



Obr. 5 Podíl tekuté fáze (50 % - a, 75 % - b, 95 % - c)
Fig. 5 Fraction of the liquid phase (50% - a, 75% - b, 95% - c)



Obr. 6 Smrštění 1,6 t ingotu
Obr. 6 Shrinkage of the 1.6 t ingot



Obr. 7 Výskyt porozity po průřezu ingotu
Fig. 7 Porosity in cross section of ingot

3. Závěr

S využitím softwaru THERCAST®, francouzského výrobce Transvalor, byly provedeny numerické simulace lití a tuhnutí 1,6 t těžkého ingotu z nástrojové oceli značky 40CrMnMo7. Práce se zabývala posouzením fyzikálních vlastností nástrojové oceli, vlivem vybraných

okrajových podmínek na lití a tuhnutí a predikcí možného výskytu vad v ingotu. Pozornost byla zaměřena na teplotu v ingotu při odlévání a ochlazování, na poměr kapalně fáze jako funkci teploty a času. Simulace ukázaly, že k úplnému ztuhnutí dojde přibližně za 3 hodiny, geometrie ingotu byla navržena vhodně, to znamená, že ingot chladl pozvolna, aniž by došlo k uzavření kapalně

jádra v jeho středu, což je mimo jiné důležitý parametr také pro kritérium podle Niyamy, které bylo vypočítáno jako velice malé, tj. minimální výskyt vad (porozity) v těle ingotu. Celkovým smrštěním se po utužení zmenšil objem těla ingotu přibližně o 5 %. Dosavadní získané výsledky ukázaly, že navržená technologie odlévání a tvar ingotu se jeví jako vyhovující. V rámci budoucích výzkumných aktivit budou pro daný typ ingotu provedeny další série numerických simulací, při kterých bude sledován např. výskyt a rozložení segregací a vybrané napěťově-deformační charakteristiky.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci Institucionální podpory dlouhodobého a koncepčního rozvoje výzkumné organizace v roce 2022, kterou poskytlo Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky.

Literatura

- [1] ZIENKIEWICZ, O. C., TAYLOR, R. L. and FOX, D. D. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. 7th Ed. Elsevier, 2013. e-ISBN9780080951362.
- [2] DHAWAN, S., KAPOOR, S. and KUMAR, S. Numerical Method for Advection Diffusion Equation using FEM and B-Splines. *Journal of Computational Science*, 2012, 3, 5: 429–437.
- [3] TRANSVALOR [Software]. THERCAST®, THERCAST reference documentation: Part 1: Ingot Casting, 2020. [2022-11-13].
- [4] BARTON, G., LI, X. and HIRT, G. Finite-Element Modeling of Multi-Pass Forging of Nickel-Base Alloys Using a Multi-Mesh Method. In *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd., 2007. pp 2503–2508.
- [5] KUTILOVÁ, K. *Návrh vytápění tvarově složité formy*. Diplomová práce. ZČU v Plzni. 2014. 101 s.
- [6] HAMMOND, D. R., DIMITROV, D. M. and TREURNICHT, N. F. The Effects of Cooling and Cutting Tool Coating on Tool Wear During Milling of Ti6Al4V and 40CrMnMo7. In *Southern African Institute of Industrial Engineering*. 2013.

Celosvětově unikátní CT zařízení se testovalo na high-tech surfech z Česka

Mnohonásobně silnější, výkonnější a s možností prozářit i velké bloky leteckých motorů. Speciální počítačovou tomografii na bázi 9MeV lineárního urychlovače, jedinou svého druhu, která je postavena v Cincinnati v USA, v prosinci 2023 otestovali vědci z CEITEC VUT.

Výzkumná laboratoř CT LAB CEITEC a celosvětový výrobce CT zařízení společnost Waygate Technologies se rozhodli ověřit studii proveditelnosti na vybraném produktu nejpokročilejší dostupné technologie, na kterém by se nejlépe prezentovaly výhody tohoto zařízení. Proto se tito partneři spojili s brněnskou firmou MSR Engines s.r.o., která se zabývá vývojem a výrobou motorových surfů, elektrických skateboardů a dronových pohonných jednotek. Jejich motorové surfovací prkno Jetsurf, které svou délkou téměř 2 metry a karbonovým tělem obsahující pohonnou jednotku, bylo ideálním předmětem na ověření geometrických i detekčních limitů CT přístroje.

Prkno se podařilo v rámci 9 dílčích skenů kompletně digitalizovat s voxelovým rozlišením 150 mikrometrů za 30 hodin. Měření se odehrálo v zákaznickém centru společnosti Waygate Technologies v USA. Vygenerovaný datový soubor o objemu 250 GB byl poté analyzován výkonnými stanicemi v CT laboratoři v Brně.

Všechna tato aktivita je součástí přípravné fáze projektu LINACTON, na jehož realizaci se podílí laboratoř počítačové tomografie (CT LAB). Cílem projektu je dostat vysokoenergetické CT do České republiky a zavést tuto technologii jak v průmyslu, tak i ve výzkumu. V Cincinnati je toto zařízení v provozu více než rok a zájem průmyslu o tento druh analýzy je velký.

„Jelikož se jedná o významný trend v oblasti nedestruktivního testování, bylo potřeba ověřit možnosti a aplikovatelnost této technologie na reálném produktu. Jsem rád, že se tato zkouška podařila realizovat právě s českou firmou. Věřím, že tato technologie může mít zanedlouho klíčovou roli ve zkušebnictví pro obranný, letecký a bateriový průmysl či neustále se rozvíjející aditivní výrobě,“ uvedl Jozef Kaiser, vedoucí výzkumné skupiny Pokročilé instrumentace a metody pro charakterizace materiálů.

– z tiskové zprávy –

Informační články

Strojírny a stavby Třinec, a.s. se podílely na dodávce dvou ocelových lávek a silničního mostu pro město Hlučín

Ing. Ivana Žižková

Strojírny a stavby Třinec, a.s., Průmyslová 1038, 739 61 Třinec - Staré Město, Česká republika

Společnost Strojírny a stavby Třinec, a.s. se zapojila svými dodávkami mostů do projektu „Sanace, rekultivace a revitalizace území po těžbě šterkopísku u Hlučína“, jehož investorem je Ministerstvo financí ČR a stavebníkem město Hlučín. Generálním dodavatelem celé této akce je společnost Gardenline s.r.o.

Nové lávky přes řeku Opavu a potok Juliánku jsou již plně v provozu a silniční most přes řeku Opavu je ve fázi dokončení a bude zprovozněn počátkem příštího roku.

Na všech těchto třech akcích se naše společnost podílela od zpracování výkresové dokumentace, přes stavební práce spodní stavby až po výrobu, dodávku a montáž nosné ocelové konstrukce.

Lávka přes řeku Opavu

Lávka je určena pro smíšený provoz, tzn. pro pěší a cyklisty přes řeku Opavu. Zajišťuje propojení cyklostezek na obou březích řeky Opavy, tj. propojení oblasti Hlučínského jezera s obcí Jilešovice a umožňuje tak využití plánovaných sportovních rekreačních aktivit i pro občany této obce.

Nosná konstrukce mostu je navržena jako trvalý kolmý ocelový příhradový most s horní mostovkou s mírným vzepětím o jednom poli. Základními prvky nosné konstrukce jsou dvě trubky horního pásu a dvě trubky pásu dolního, spojené v celek jak diagonálami, tak jednotlivými příčníky a mezilehlou ocelovou ortotropní mostovkou mezi horními trubkami. Lávka, která má rozpětí 56,4 m a má hmotnost 92 t, byla zhotovena ze tří dílů, které byly převáženy na staveniště jako nadrozměrný náklad. Finální montáž byla realizována na místě stavby pomocí pásového jeřábu s nosností 750 t.



Lávka přes potok Juliánku

Tato lávka slouží pro pěší přes potok Juliánku a zajišťuje prodloužení cyklostezek kolem jezera na místní komunikaci.

Nosná konstrukce mostu je navržena jako trvalý kolmý ocelový obloukový most se zavěšenou dolní mostovkou

o jednom poli, tzv. Langrův nosník. Oblouk Langrova nosníku je parabolický o vzepětí 2,6 m. Lávka, která má rozpětí nosné konstrukce 15,7 m a hmotnost 12,5 t, byla převezena na staveniště vcelku. Jedna opěra je tvořena monolitickým železobetonovým rámem o jednom poli, druhá opěra je monolitická železobetonová. Dřívky opěr jsou vetknuté do základových pásů a založení je hlubinné na vrtaných velkopřůměrových pilotách.

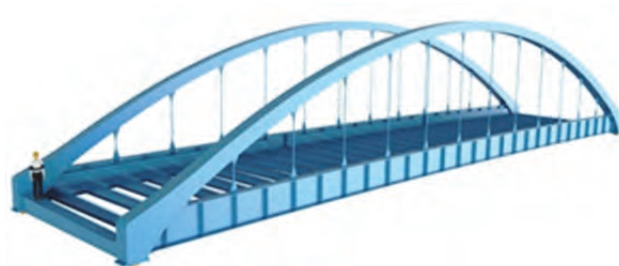


Obě lávky se nacházejí v bezprostřední blízkosti Hlučínského jezera a proto stavební podmínky nebyly nijak jednoduché, zejména v jarních měsících, kdy došlo ke zvednutí hladiny toků.

Silniční most přes řeku Opavu

Jedná se o nový silniční most přes řeku Opavu jako náhrada za starý, který byl shledán jako nevyhovující se známkami značného opotřebení, které bylo způsobeno neúměrným zatížením těžkou nákladní dopravou během dřívější těžby šterkopísku v oblasti.

Realizace této akce nebyla jednoduchá, protože nejdříve bylo nutno odstranit starý most, ke kterému nebyla žádná původní dokumentace a současně bylo nutné provést přeložky stávajících inženýrských sítí.



Konstrukce nového mostu byla navržena jako trvalý kolmý ocelový obloukový most se zavěšenou dolní mostovkou o jednom poli, tzv. Langrův nosník. Mostní ocelová konstrukce je tvořena ocelovým roštem se spřaženou betonovou monolitickou deskou o tloušťce 250 mm. Most, který má rozpětí nosné konstrukce 41,4 m a hmotnost 110 t, byl zhotoven z několika dílů, které byly převáženy postupně na staveniště a na předmontážní ploše zkompleťovány do jednoho celku.

Šířka nosné konstrukce je 9,15 m a v podélném směru je ve vrcholovém oblouku o poloměru 800 m. Založení mostní konstrukce je hlubinné na 18 ks vrtaných velkopřůměrových pilotách o průměru 900 mm a délce 7 m. Zvedání konstrukce pomocí kolového jeřábu s nosností 550 t a její následné položení na připravené opěry nebylo jednoduchou záležitostí, ale vše se nakonec podařilo úspěšně usadit s požadovanou přesností.

Společnost Strojírny a stavby Třinec, a.s. má nadále zájem rozšiřovat své aktivity v oblasti dodávek mostů a mostních konstrukcí, a to od projektu přes výrobu až po konečnou montáž včetně stavebních prací.



**STROJÍRNY A STAVBY
TŘINEC**

Inteligentní dusíko-methanolová vstřikovací tryska pro nauhličování a kalici atmosféry. Případová studie.

Maximus Akuh¹; Tim Nitsch¹; Guido Plicht¹; Felix Steinbach²

¹ Air Products pro CZ, SK, HU

² Steinbach GmbH & Co KG, Technologie kalení, Wuppertal, Německo

Inovativní vstřikovací tryska Smart Lance se používá na mnoha pracovištích k automatickému vyhodnocování tvorby atmosféry. Pro dosažení optimálních výsledků je instalována v kombinaci s dalšími prvky z řady Air Products Smart Technology (APST), které zajišťují monitorování a vizualizaci procesů včetně dokumentace a řízení případné preventivní údržby. Při testování v reálných aplikacích byly zjištěny její následující vlastnosti: zajišťuje spolehlivý zdroj ochranné atmosféry s minimálním tolerančním rozmezím jejího složení, zvyšuje produktivitu díky menšímu počtu cyklů vypalování a kratším dobám zpracování vsázky, snižuje počet zmetkovitost, snižuje náklady na atmosféru, dokumentuje atmosféru a procesní parametry v souladu s normami CQI-9, indikuje provádění preventivní údržby během plánovaných odstávek a snižuje časové ztráty na odstraňování závad při poruchách pece.

V procesu tepelného zpracování uhlíkových ocelí se používá přizpůsobených pecních atmosfér pro dosažení požadovaných cílových vlastností materiálu. Existují dva hlavní důvody pro použití řízené atmosféry. Může to být požadavek na reaktivní atmosféru. Nebo to může být požadavek na ochrannou atmosféru, nebo její na rovnovážný stav se složkou v povrchu zpracovávané vsázky.

Tato studie se zabývá atmosférami obsahujícími uhlík pro tepelné zpracování uhlíkových ocelí, které mohou být vyrobeny pomocí generátorů endoplynu, nebo přímým vstřikováním dusíku a methanolu.

Generátory endoplynu vyrábějící atmosféru ze zemního plynu se široce používají při tepelném zpracování, jako je nauhličování, kalení a žíhání součástí z uhlíkové oceli. V dnešním světě je stále více v centru pozornosti udržitelnost a ekologie provozu. Z tohoto pohledu generátory zatěžují životní prostředí emisemi, které se v budoucnu mohou ještě zvýšit v důsledku výroby umělého zemního plynu. Kromě toho generátory endoplynu musí mít v režimu zálohy další generátor na provozní teplotě, čímž se zbytečně spotřebovává energie, která se přímo nepodílí na výrobě.

Tyto a další faktory vedou společnosti zabývající se tepelným zpracováním k hledání jiného řešení. Osvědčenou alternativou je již dlouhou dobu známé použití dusíku a methanolu k výrobě potřebné směsi oxidu uhelnatého (CO), vodíku (H₂) a dusíku (N₂).

Společnost Air Products vyvinula novou dusíko-methanolovou trysku, která dosahuje takřka ideálního štěpení methanolu na CO a H₂ prostřednictvím optimální atomizace methanolu v komoře pece a současně zajišťuje spolehlivý proces s vyšším výkonem a sníženým počtem zmetků.

Následující studie ilustruje výhody dosažené při praktickém provozu komorové pece ve společnosti

Härtetechnik Steinbach GmbH & Co. KG ve Wuppertalu v Německu.

DUSÍKO-METHANOLOVÝ PROCES

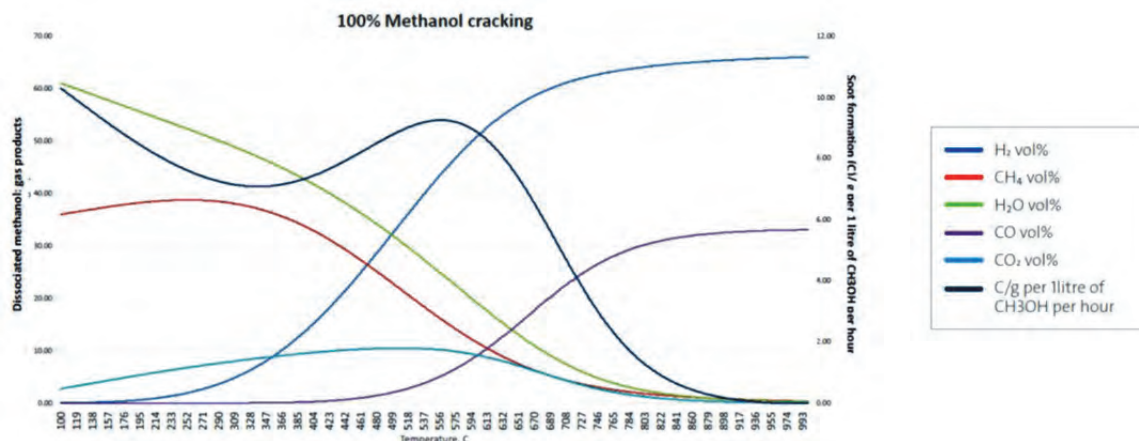
Použití dusíku a methanolu při tepelném zpracování na zajištění ochranné atmosféry při neutrálním žíhání, kalení nebo nauhličování je dobře známé. Atmosféra vytvořená na bázi methanolu je jednoduchou a praktickou alternativou k atmosféře z generátoru endoplynu a při použití má vysokou míru flexibility s možností přesného řízení.

Dusík a methanol se skladují na místě v nádržích. Alternativně lze dusík vyrábět v areálu provozovny. Obě média mohou být odebírána podle potřeby konkrétního složení atmosféry v peci. To umožňuje přesně řídit obsah CO v atmosféře a snížit tak emisi CO₂. Pokud v průběhu procesu není potřeba reaktivní nebo ochranná atmosféra, tryska se jednoduše vypne. Nespotřebovává se žádná energie, na rozdíl od generátoru endoplynu, který je třeba udržovat v pohotovostním režimu.

Teoreticky může být složení atmosféry generované štěpením methanolu při teplotách vyšších než 800 °C srovnatelné se složením z generátorů endoplynu v závislosti na reakci štěpení:

$\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CO} + 2\cdot\text{H}_2$ s vedlejšími produkty CO₂ a H₂O (obr. 1)

V praxi se však dosahuje optimálního složení, pouze pokud je vstřikování methanolu do pece realizováno v takové míře, aby docházelo ke štěpení methanolu z kapalně fáze přímo za vysoké teploty pece. Obr. 1 znázorňuje variace složení methanolu při štěpení za různých teplot ze simulace v programu FactSage. Pomalý ohřev methanolu s odpařováním při teplotách nad 400 °C vede k vysokému obsahu sazí.

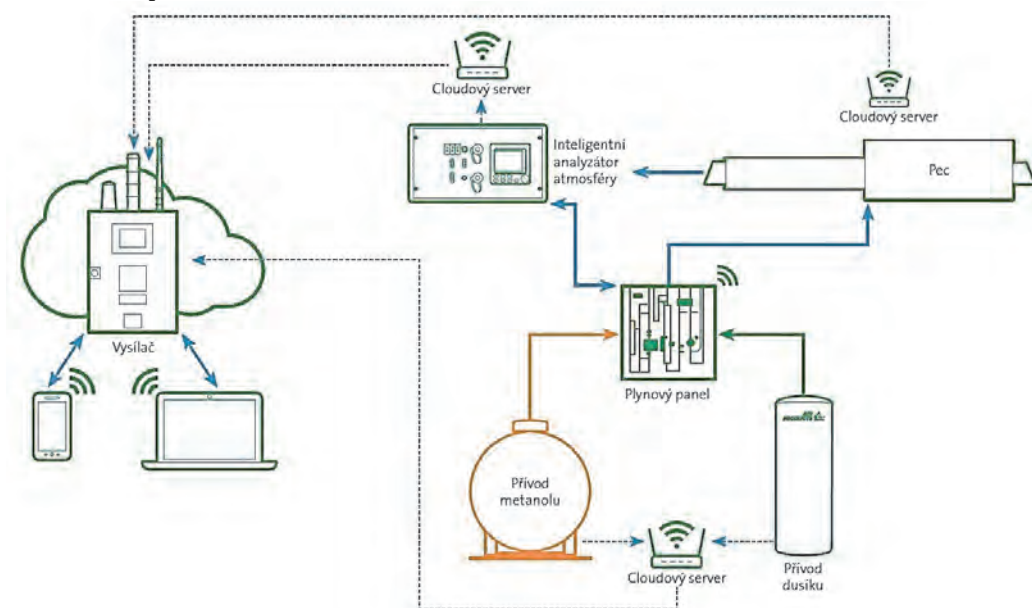


Obr. 1 Simulace štěpení methanolu v softwaru FactSage

Při teplotách nad 850 °C se většina plynu štěpí na požadovaný oxid uhelnatý a vodík. Vedlejší nežádoucí produkty, jako např. CH₄, H₂O, CO₂ a saze vznikají jen ve velmi malém množství.

Vývojový tým společnosti Air Products s dlouholetými zkušenostmi v oblasti zpracování kovů si stanovil úkol

optimalizovat vstřikování dusíku a methanolu a vyvinul inteligentní trysku, která umožňuje přesné řízení atmosféry a k tomu má několik dalších vyšších funkcí. Schéma zapojení systému při kompletní instalaci včetně řízení atmosféry je znázorněno na obr. 2



Obr. 2 Instalace dusíko-methanolové trysky

Inovativní inteligentní dusíko-methanolová tryska (Smat Nitrogen-Methanol Lance) a systém „Air Products Smart Technology“ (APST)

Na základě praktických aplikací v průmyslu a provedených optimalizací byly pro dosažení požadovaného štěpení methanolu identifikovány následující klíčové body:

- Pokud methanol kape přes trysku na kovovou desku v peci, způsobuje to jeho pomalé odpařování a vede k vyššímu obsahu sazí, CO₂, H₂O a CH₄. V generované atmosféře je vyšší obsah H₂O a dochází k vyšší spotřebě nahličujícího plynu. Tím se zvyšuje

koncentrace CH₄, což má za následek ještě vyšší tvorbu sazí.

- Je třeba zabránit pomalému zahřívání (odpařování) a štěpení methanolu při nízké teplotě uvnitř trysky. Vytváří se saze, které mohou ucpat trysku a také vzniká zvýšený obsah CO₂ a H₂O.
- V peci musí být vytvořeno homogenní rozložení jemného methanolového aerosolu (mikrometrová velikost částic), což poskytuje velkou plochu povrchu, aby se dosáhlo maximálního štěpení na CO a H₂, čímž se sníží tvorba nežádoucích vedlejších produktů jako je CO₂ a H₂O. Vytváření aerosolu znamená, že methanol musí vstoupit do atmosféry pece ještě v kapalném skupenství.

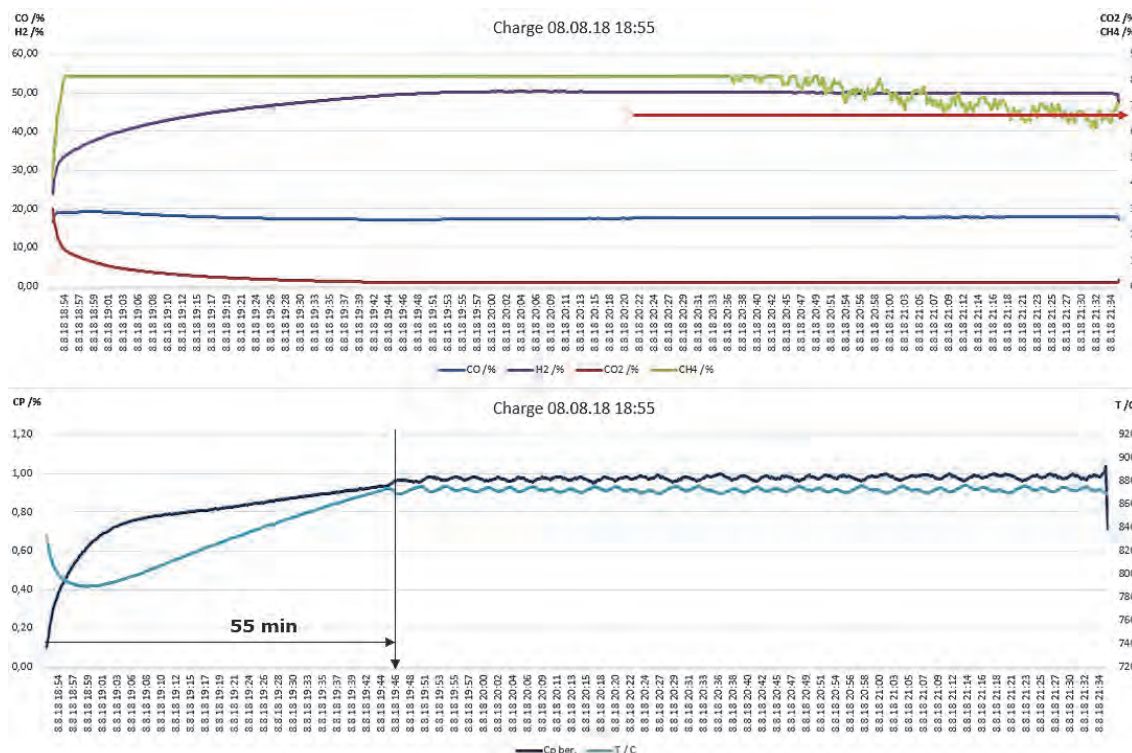
- V případě zděné pece nesmí být methanol rozstřikován na zdvo. Způsobilo by to pomalé odpařování s tvorbou CO_2 a H_2O a sazí.
- Sledování teploty a tlaku obou médií v trysce může v reálném čase poskytnout informace o jejím stavu. Tímto způsobem lze správně nastavit parametry trysky a odhalit případné zhoršení jejího stavu v peci dříve, než dojde k tvorbě nekvalitní atmosféry nebo selhání systému.

Tyto požadavky pro dosažení optimálního výkonu byly zohledněny při vývoji nové inteligentní trysky. Výsledky a výhody dosažené s inteligentními tryskami ve srovnání se stávajícími konvenčními tryskami jsou uvedeny níže.

INTELIGENTNÍ TRYSKA VE SROVNÁNÍ S BĚŽNOU DUSÍKO-METHANOLOVOU TRYSKOU

Úvod

Před instalací nové dusíko-methanolové trysky bylo provedeno dlouhodobé měření, které zaznamenalo stávající parametry atmosférické co největšího počtu různých tepelně zpracovávaných šarží. Údaje získané z takové analýzy atmosféry v peci tvoří základ pro následné porovnání s provozem inteligentní trysky a zviditelňuje přímé rozdíly a jejich krátkodobé přínosy. Dlouhodobé přínosy, jako je prodloužení cyklů vypalování nebo snížení počtu zmetků díky preventivní údržbě, se pak dají zjistit z porovnání delších časových úseků provozu.



Obr. 3 Příklad vsázkové analýzy s konvenční tryskou

Následující studie byla provedena na komorové peci vybavené konvenční dusíko-methanolovou tryskou instalovanou v blízkosti dmychadla, která vypouští methanol na ventilátor. Pro pozdější srovnání byly zaznamenány profily různých atmosfér při nauhličování a kalení. Příklad měření šarže ukazuje obr. 3.

Na výše uvedeném diagramu byla vsázka tepelně zpracována při teplotě 870 °C, která byla udržována 1 hodinu a 46 minut. Stabilizace atmosféry v peci trvala 55 minut. To je doba, za jakou atmosféra dosáhla požadované hodnoty uhlíkového potenciálu (C_p), který byl v tomto případě nastaven na 1,0 %. Na rychlost stabilizace C_p mají vliv různé parametry, např. teplota, rychlost vstupu oxidačních médií a složení atmosféry, které závisí na kvalitě štěpení methanolu. Jak již bylo vysvětleno, nekvalitní štěpení má za následek vyšší množství H_2O a CO_2 , které je třeba redukovat přidáním většího množství

nauhličujícího plynu (zemního plynu nebo propanu), což zase může vést k větší tvorbě sazí. Prodlužuje se také doba potřebná na stabilizaci atmosféry v peci. Doba stabilizace atmosféry, zejména pokud je delší než doba ohřevu vsázky, lze považovat za neproduktivní čas náročný na zdroje. Zkrácení této doby snižuje výrobní náklady a výrazně zvyšuje produktivitu. Za zmínku stojí také to, že povrch vsázky a teplota procesu také ovlivňují složení atmosféry.

O tom, že se po dosažení C_p v atmosféře pece nachází příznivý stav požadovaných plynů, svědčí nízký obsah zbytkového CH_4 . To také naznačuje dobré štěpení methanolu a dobře nastavené přidávání nauhličujícího plynu k regulaci nastaveného bodu C_p v peci. Není tedy nutné přidávat nadměrné množství nauhličujícího plynu ke kompenzaci vnějších vlivů (jako je CO_2 , H_2O nebo vnikání vzduchu).

INSTALACE INTELIGENTNÍ DUSÍKO-METHANOLOVÉ TRYSKY SMART LANCE

Po analýze pecní atmosféry vytvořené pomocí konvenční methanolové trysky byla na stejné peci použita inteligentní tryska Air Products.

Inteligentní tryska se skládá ze dvou částí:

- samotné methanolové a dusíkové vstřikovací trysky, obvykle instalované přes střechu pece (obr. 4a),
- komunikační jednotky a zařízení pro sběr dat (obr. 4b).



Obr. 4a Tryska Smart Lance



Obr. 4b Komunikační jednotka

Obě součásti spolu komunikují prostřednictvím Wi-Fi. Komunikační jednotka shromažďuje v reálném čase údaje o tlaku a teplotě methanolu a dusíku proudící přes trysku do pece. Zpracovává a poskytuje okamžitou zpětnou vazbu o stavu trysky a prostřednictvím zeleného, žlutého a červeného světla stav signalizuje na komunikační jednotce. Data jsou nahrávána do cloudového serveru k dalšímu zpracování, pro vizualizaci a archivaci. Okamžitá zpětná vazba je následující:

- Zelená kontrolka: vstřikování funguje správně.
- Žlutá kontrolka: atmosféra je stále optimální, ale je potřeba provést kontrolu systému (např. kontrolu trysky a přívodu média). Pokud není zřejmý žádný problém s přívodem médií, je vhodné provést preventivní údržbu a kontrolu trysky při prvním zastavení výroby.
- Červená kontrolka znamená, že buď teplota nebo tlak, methanolu nebo dusíku je mimo požadovaný rozsah. Aby nedošlo k neplánovanému zastavení výroby, je třeba co nejdříve zkontrolovat přívod média a trysku.

Náročnost instalace inteligentní trysky do pece je srovnatelná s konvenčními tryskami. Po instalaci trysky do komory pece se nastaví komunikační jednotka a po spárování s tryskou prostřednictvím sítě WLAN je pec připravena k provozu.

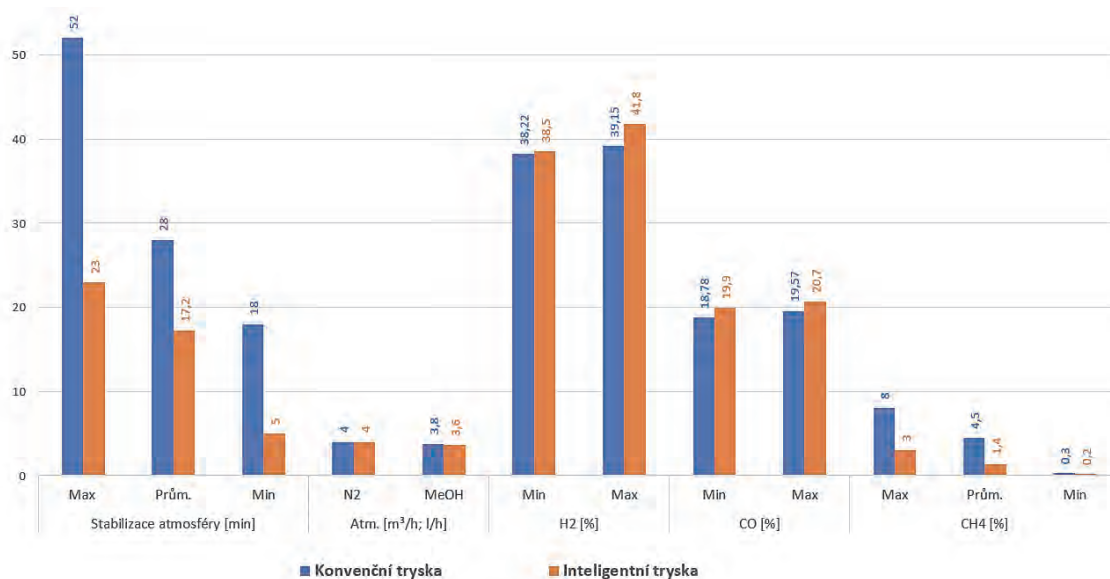
V rámci studie byly pomocí analyzátoru plynů měřeny také hladiny CO , CO_2 , H_2 a CH_4 . Nastavení průtoku médií bylo stejné jako u běžné trysky. Po dosažení teploty 750°C se složení atmosféry poměrně rychle ustálilo a po celou dobu měření bylo na stálých hodnotách. Koncentrace CO a H_2 byla stabilní a vyšší než u konvenční trysky se stejnými průtoky N_2 a CH_3OH . Po získání standardních hodnot 20 % CO a 40 % H_2 byl průtok methanolu o něco snížen, což mělo první pozitivní vliv na snížení nákladů.

Na obr. 5 jsou uvedeny výsledky tepelného zpracování 240 kilogramové vsázky žilhané při teplotě 870°C po dobu 40 minut. Stabilizace atmosféry trvala pouhých 16 minut, což výrazně přispělo ke zvýšení produktivity.

Srovnání výkonnosti obou trysek je shrnuto v obr. 6. V obou případech byla provedena měření při běžné výrobě se smíšenými šaržemi. Celkem bylo analyzováno 32 vsázek pro konvenční trysku a 28 vsázek pro inteligentní trysku.



Obr. 5 Příklad vsázkové analýzy s inteligentní tryskou



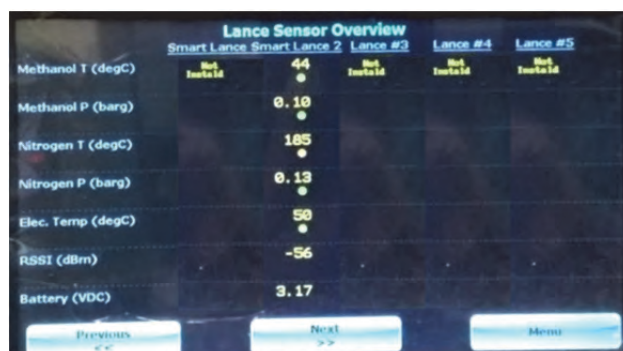
Obr. 6 Přímé srovnání konvenční a inteligentní trysky

VÝHODY DOSAŽENÉ TRYSKOU SMART LANCE

Štěpení methanolu, jak je uvedeno v grafu výše, bylo u inteligentní trysky výrazně lepší, což potvrzuje její vysokou účinnost. V souhrnu bylo dosaženo následujících výhod:

- Vyšší koncentrace požadovaných složek CO a H₂ v pecní atmosféře při stejných průtocích methanolu a dusíku.
- Nižší koncentrace nežádoucích složek H₂O, CO₂ a CH₄.
- Pro dosažení stejného složení atmosféry jako při použití konvenční trysky bylo možné snížit průtok methanolu, čímž byly dosaženy jeho úspory.
- Díky vylepšenému štěpení došlo ke zkrácení času stabilizace atmosféry, což vedlo ke zvýšení produktivity.
- To bylo doprovázeno snížením množství zemního plynu použitého k dosažení uhlíkového potenciálu.
- A vzhledem k nižšímu obsahu CH₄ v atmosféře se snížilo množství sazí v peci, čímž se snížil počet cyklů vypalování, což rovněž vedlo ke zvýšení produktivity.

Stav inteligentní trysky v reálném čase si můžete prohlédnout na komunikační jednotce prostřednictvím alarmových zpráv a na displeji, který zobrazuje teplotu a tlak obou médií v trysce v reálném čase (obr. 7). Teplota methanolu v tomto příkladu je 44 °C, což znamená, že je stále v kapalném stavu. Tlak je 0,1 baru, což naznačuje, že nedochází k ucpávání trysky. Nárůst tlaku by znamenal možné ucpání trysky a vyžadoval by pozornost obsluhy. Za dobu pozorování více než rok v běžné praxi tryska vykazovala stabilní provozní parametry.



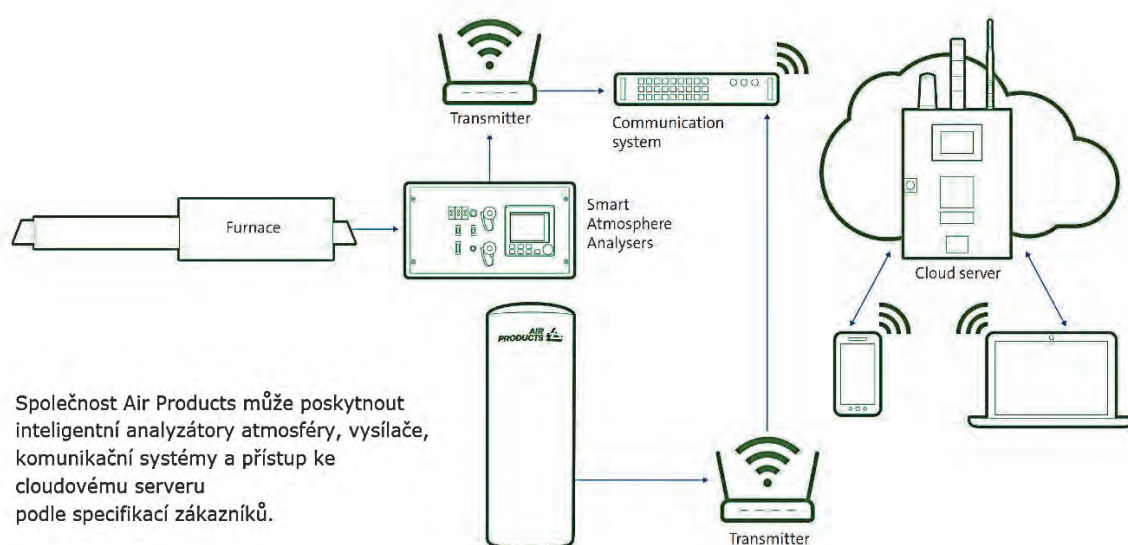
Obr. 7 Snímek obrazovky stavu trysky SMART LANCE

INTELENTNÍ MONITOROVACÍ SYSTÉM (APST)

Kromě inteligentních trysek firma Härtetechnik Steinbach využívá také systém APST, díky kterému zvyšuje produktivitu a snižuje náklady. Jedná se o cloudový systém pro sledování a vizualizaci procesních dat, jak je znázorněno na obr. 8 a obr. 9.

Hlavní výhody systému:

- Vizualizace a dokumentace parametrů procesu a volitelně i atmosféry s podporou normy CQI-9.
- Provádí se historické srovnání trendů, které vyhodnocují provozní parametry a umožňují optimalizaci procesu.
- Online dálkové sledování důležitých procesních dat umožňuje přístup z jakéhokoli počítače nebo telefonu s připojením k internetu.
- Upozorňování prostřednictvím e-mailu nebo SMS.
- Záznam dlouhodobých trendů pro sledování kritických ukazatelů výkonnosti s prezentací anomálií.



Obr. 8 Schéma zapojení APST



Obr. 9 On-line vizualizace APST dat

SHRNUTÍ

Inovativní inteligentní tryska v kombinaci se systémem APST společnosti Air Products se již v běžné výrobní praxi používá k dosažení optimálních výsledků atmosféry, monitorování a vizualizaci procesů včetně dokumentace a hlášení případné preventivní údržby.

Z provozu v reálných aplikacích ve společnosti Härtetechnik Steinbach byly zaznamenány následující výhody:

- zajištění spolehlivého přívodu ochranné atmosféry v úzkém tolerančním rozsahu,
- zvýšení produktivity díky menšímu počtu vypalovacích cyklů a zkrácení doby náběhu pece,
- snížení zmetkovitosti,
- snížení nákladů na atmosféru,
- dokumentace atmosféry a procesních parametrů v souladu s normami CQI-9,
- indikace pro provádění preventivní údržby během plánovaných odstávek, čímž se snižují časové ztráty.

ENERGETIKA Třinec ukončila revizi vysokopecního plynojemu

Činnost společnosti ENERGETIKA TŘINEC, a.s. (ET) je zaměřena na výrobu, distribuci a prodej energií, zejména pro potřeby mateřské společnosti TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s. (TŽ). Jedná se o elektřinu, teplo v páře, horké a teplé vodě, dmýchaný a stlačený vzduch a provozní vody. Společnost provozuje rovněž rozmrazovnu uhlí, kanalizační řády a čistírny odpadních vod. Palivem pro výrobu vysokotlaké páry a dalších energií jsou především černé a hnědé uhlí, biomasa a hutní topné plyny, které vznikají jako druhotný energetický zdroj při výrobě surového železa, oceli a koksu v TŽ. ENERGETIKA Třinec pro doplnění energetické bilance zajišťuje nákup zemního plynu a jeho distribuci. Společnost dále dodává teplo pro vytápění areálu TŽ, město Třinec a blízké okolí.

Organizačně je společnost ENERGETIKA Třinec členěna na 2 výrobní provozy:

- Tepelná energetika
- Teplárny

Středisko Plynové hospodářství, které je součástí provozu Tepelná energetika, zajišťuje distribuci a úpravu topných plynů vyráběných na hutních agregátech TŽ, tj. vysokopecního, koksárenského a konvertorového plynu a distribuci zemního plynu. Součástí rozvodů plynů jsou 2 plynojemy – vysokopecní a konvertorový a 3 směsné stanice. Nejvýznamnější je směsná stanice topných plynů „Jih“, která zabezpečuje míchání směsného plynu pro zásobování odběratelů v areálu TŽ.



Největší objem v distribuci hutních plynů představuje vysokopecní plyn (VPP). Ten je před zaústěním do hlavního potrubního řádu zbaven nečistot na plynočistírnách vysokých pecí (prašník, skrubr, Venturiho trubice, odlučovač kapek, expanzní stanice) a vybaven brýlovým uzávěrem. Hlavní rozvod VPP DN 2600/3000 je veden v areálu TŽ a do lokality Borek do plynojemu VPP, který podle polohy zvonu a teleskopu reguluje tlak v síti VPP na 2,2 až 3,6 kPa. Celková průměrná výroba VPP ve 2 vysokých pecích je 360 tis. m³/hod. Z pohledu celkové výroby a jeho distribuce představuje objemově takřka 1/3 spotřeby zemního plynu v České republice. VPP je spotřebován jako čistý nebo jako směsný plyn na

ohřívacích větrů, koksárenských bateriích, ohřívacích pecích válcoven, slévárnách, teplárnách E2 a E3 a rozmrazovnách. Případné přebytky jsou bezpečně spalovány odřukovacím komínem nebo přetlakovou pojistkou.

Chemické složení VPP je závislé na vsázce a technologii vysokopecního procesu, jeho průměrné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Složení	CO	CO ₂	N ₂	H ₂	O ₂
[%]	21,5	20,3	55,2	2,4	0,6

Pro velký obsah inertních plynů (cca 75 %) má nízkou výhřevnost (cca 3,2 MJ/m³) a také relativně nižší výbušnost než ostatní topné plyny.

Vzhledem k vysokému obsahu oxidu uhelnatého je vysokopecní plyn velmi jedovatý. CO se mnohonásobně lépe váže na hemoglobin než kyslík, a tím zabraňuje okysličování lidského organismu a způsobuje tedy jeho otravu. Nebezpečnost vysokopecního plynu se zvyšuje tím, že je bezbarvý, bez chuti i bez zápachu, a tudíž jeho přítomnost v ovzduší není lidskými smysly zjištělná.

Součástí plynové sítě je také plynojem vysokopecního plynu, který byl konstruován jako mokřý, má objem 100 tisíc m³ VPP a do provozu byl uveden v roce 1992. Jeho konstrukce je tvořena ze tří základních částí:

- Spodní část tvoří ocelová válcová nádrž se dnem (bazén), která je otevřená a naplněná vodou až po hranu přepadu.
- Střední část – teleskop, jehož vedení umožňuje 64 spodních kladek, které jsou umístěny 700 mm nad spodní hranou teleskopu. Kladky pojíždějí po vodítkách, která jsou přivařena na vnitřní straně bazénu. Horní kladky - vnější, jsou přišroubovány na konzolách ochozu teleskopu a pojíždějí po vodítkách navařených na nosných sloupech ocelové konstrukce. Horní kladky teleskopu (pro vedení zvonu) - vnitřní, jsou taktéž na ochozu teleskopu a pojíždějí po vnějších vodítkách zvonu.
- Horní část plynojemu tvoří válcový zvon, který je na obvodu opatřen vodicími kladkami (horní a dolní),

kteří zajišťují plynulý pohyb zvonu při změnách objemu najímaného množství VPP plynu.

Přípojné potrubí VP plynu DN 2000 do plynojemu začíná uzavírací armaturou DN 2000 před plynojemem. Za ní je umístěn nadzemní odvodňovač a je zde napojeno a zaslepeno potrubí dusíku DN 80 s uzavíracím ventilem. Potrubí vstupuje kolmo dolů do betonové šachty, kde je 180° oblouk a přes dno plynojemu vystupuje 500 mm nad hladinu bazénu. Potrubní oblouk tvaru "U", při zaplnění vodou, vytváří kapalinový uzávěr plynojemu.

Ovládání plynojemu je řízeno počítačem SIMATIC a je rozděleno do technologických skupin. Každá skupina může pracovat v automatickém a ručním režimu nezávisle na sobě. Plynový operátor ovládá řídicí systém na plynovém dispečinku.

Revize plynojemu

V období května a června letošního roku proběhla plánovaná odstávka a revize vnitřních ocelových konstrukcí a dna bazénu plynojemu.

Vlastní odstávka plynojemu byla zahájena dne 2. 5. 2022 jeho odplyněním, které bylo provedeno inertním plynem dusíkem, a následným zaslepením přívodního potrubí DN 2000. Poté bylo provedeno vypouštění vodní náplně spodní části, tj. bazénu plynojemu o objemu 67 000 m³, což je pro představu asi 25 plaveckých padesátimetrových bazénů. Vypouštění trvalo 16 dnů.



Otevření pláště plynojemu pro následné čisticí práce proběhlo 17. 5. 2022, což bylo o 2 dny dříve než stanovil harmonogram. Ihned poté bylo zahájeno čištění dna od vysokopecního kalu a jeho ekologická likvidace. Následovaly revize všech ocelových částí plynojemu, tedy zvonu, teleskopu a bazénu o průměru 70,8 m a výšce 17 m. V průběhu revizních prací byly prováděny opravy ocelových konstrukcí a nátěry. Ke dni 18. 6. 2022 byly všechny opravy dokončeny a následně bylo zahájeno uzavírání všech částí plynojemu. Od 22. 6. 2022 byl bazén plynojemu napouštěn vodou z řeky Olše průtokem cca 300 m³/hod., tj. cca 7 tisíc m³/den. Po nezbytných zkouškách chodu zvonu a teleskopu byl plynojem zaplněn a uveden do provozu 1. 7. 2022.

V průběhu odstávky plynojemu byla síť vysokopecního plynu v areálu Třineckých železáren provozována se stálým, ale velmi nízkým přebytkem VPP, který byl bezpečně spalován na odfukovacím komíně. Pro regulaci tlaku v potrubí navíc sloužila přetlaková pojistka.

Na organizaci prací plynojemu se podíleli pracovníci střediska plynového hospodářství a technického úseku ENERGETIKY Třinec. Na vlastních revizích a opravách plynojemu pracovalo 9 dodavatelských firem. V průběhu prací bylo zkontrolováno celkem 96 vodičích kladek zvonu a teleskopu plynojemu. Na dně plynojemu bylo zkontrolováno 2486 m svarů metodou ECA, což je inspekční technika pro detekování trhlin v uhlíkových ocelích, nádržích a zásobnících. Vybrané plochy, například vstupní potrubí, byly kontrolovány metodou PEC (metoda využívající pulzních vířivých proudů pro zjišťování zbytkové tloušťky materiálů a zařízení). Na nátěry bylo spotřebováno 1300 kg speciálních nátěrových hmot.

Revize prokázala minimální opotřebení plynojemu a možnost plynojem dále bezpečně provozovat do příští revize.

Ing. Petr Matuszek, ředitel společnosti ENERGETIKA TŘINEC, a.s.

Pomocí Plzeňských podnikatelských voucherů jsme rozšířili výrobní portfolio a získali nové zákazníky, říká ředitel Slévárny Hájek

Provozovna společnosti První plzeňská galvanovna s.r.o. se zaměřuje na výrobu odlitků z litiny technologií lití do pískových forem. Své procesy inovuje ve spolupráci s výzkumnou organizací COMTES FHT.

Tradice Slévárny Hájek sahá do první republiky. V roce 1928 byla zahájena výroba a první odlitky ze šedé litiny byly převážně armatury, kanalizační a kamnová litina.

„Setkávali jsme se se zvýšenou poptávkou po odlitcích ze speciálních litin, kterou jsme z technologických důvodů nebyli schopni realizovat. Pro zavedení nových materiálů je třeba provést mnoho zkoušek, abychom si byli jistí kvalitou. Na takové zkoušky u nás nemáme vybavení a ani personální kapacity. Obrátili jsme se proto na dobránskou výzkumnou společnost COMTES FHT a.s., která má k dispozici špičkové vybavení a dlouhodobé zkušenosti v oblasti metalurgie,“ říká Ing. Pavel Rous, ředitel Slévárny Hájek. „Cílem naší spolupráce bylo optimalizovat proces výroby tvárné a žáruvzdorné litiny, čímž zároveň dojde k rozšíření portfolio nabízených druhů litin,“ dále upřesňuje.

Ve spolupráci s COMTES FHT se podařilo ověřit kvalitativní požadavky na legovanou žáruodolnou litinu a legované litiny s vysokým obsahem chromu, navrhnout technologické změny a úpravy na konkrétních odlitcích a zároveň je podrobit potřebným zkouškám a rozborům.

Výstupy projektu se již povedlo uplatnit ve výrobním procesu pro konkrétní zakázky. „Díky novému materiálu jsme se nyní dohodli na dlouhodobé spolupráci s významným českým výrobcem kotlů na tuhá paliva a biomasu,“ doplňuje Pavel Rous.

Pavel Rous také zmiňuje přínosy projektu pro region. „Dříve někteří naši zákazníci museli tvárnou litinu objednávat ve slévárnách především na Moravě. Tím, že jsme nyní schopni nabídnout šedou i tvárnou litinu zároveň, stáváme se pro ně jednoznačně zajímavějšími, neboť mohou nakupovat z jednoho místa. A to je vzhledem k nákladům na dopravu obrovská výhoda. Což pomáhá regionu – tím, že se odlitky vyrábí přímo u nás, zůstávají zde i další návazné činnosti, jako např. obrábění a povrchová úprava,“ doplňuje informace.

Spolupráce s výzkumnou organizací přinesla společnosti také nápady na další inovace. „Rádi bychom pokračovali v řešení tvárné litiny do nízkých teplot, nebo na řešení ořeuodolné litiny. Oceňujeme, že jsme s pomocí programu Plzeňské podnikatelské vouchery mohli navázat spolupráci s výzkumnou organizací. Pozitivně hodnotíme snadnou dostupnost podpory a poměrně nízkou administrativní náročnost oproti jiným dotačním programům, které známe,“ uzavírá Pavel Rous.

- z tiskové zprávy -

Zprávy z Ocelářské unie a.s.

Meziroční porovnání měsíčních a postupných hutních výrob roku 2021 a 2022 v České republice

Výroba *)			Výroba	Index	Výroba	Index	Výroba	Index
Září	Říjen	Leden-Říjen	Září		Říjen		Leden-Říjen	
2022	2022	2022	2021	2022/2021	2021	2022/2021	2022	2022/2021
[tis. t]			[tis. t]	[%]	[tis. t]	[%]	[tis. t]	[%]
KOKS								
125,09	132,76	1427,06	153,36	81,56	149,32	88,91	1551,23	92,00
AGLOMERÁT								
327,79	336,70	4043,16	382,98	85,59	421,24	79,93	4662,55	86,72
SUROVÉ ŽELEZO								
267,48	198,85	2913,61	244,24	109,51	267,06	74,46	3284,58	88,71
SUROVÁ OCEL								
340,30	250,96	3694,00	296,44	114,80	329,41	76,18	4068,12	90,80
KONTISLITKY								
320,70	234,40	3502,70	277,57	115,54	309,85	75,65	3834,66	91,34
BLOKOVNY								
51,27	40,96	462,06	3,69	1387,93	47,85	85,61	470,46	98,21
VÁLCOVANÝ MATERIÁL								
316,88	291,48	3491,70	282,53	112,16	358,29	81,35	4017,94	86,90
TRUBKY								
28,01	29,73	289,36	28,90	96,92	26,35	112,82	312,96	92,46
TAŽENÁ, LOUPANÁ, BROUŠENÁ OCEL								
19,31	10,62	167,36	10,78	179,03	17,69	60,00	179,88	93,04
STUDENÁ PÁSKA KLASICKÁ								
0,98	0,86	11,76	1,36	72,19	1,54	55,71	12,91	91,08

POZNÁMKA: *) Za poslední měsíc jsou údaje předběžné.

Zpracoval: Jiří Dufek, Ocelářská unie a.s. Praha



Meziroční porovnání měsíčních a postupných hutních výrob roku 2021 a 2022 v České republice

Výroba *)			Výroba	Index	Výroba	Index	Výroba	Index
Říjen	Listopad	Leden-Listopad	Říjen		Listopad		Leden-Listopad	
2022	2022	2022	2021	2022/2021	2021	2022/2021	2022	2022/2021
[tis. t]			[tis. t]	[%]	[tis. t]	[%]	[tis. t]	[%]
KOKS								
132,76	133,87	1560,93	149,32	88,91	149,25	89,70	1700,48	91,79
AGLOMERÁT								
336,70	361,36	4404,52	421,24	79,93	422,87	85,45	5085,43	86,61
SUROVÉ ŽELEZO								
198,85	247,52	3161,14	267,06	74,46	323,47	76,52	3608,05	87,61
SUROVÁ OCEL								
250,96	316,98	4010,98	329,41	76,18	409,14	77,48	4477,25	89,59
KONTISLITKY								
234,40	299,95	3802,65	309,85	75,65	384,67	77,98	4219,33	90,12
BLOKOVNY								
40,96	50,18	512,24	47,85	85,61	47,23	106,24	517,70	98,95
VÁLCOVANÝ MATERIÁL								
291,48	286,39	3778,09	358,29	81,35	395,19	72,47	4413,12	85,61
TRUBKY								
29,73	29,07	318,43	26,35	112,82	30,17	96,35	343,13	92,80
TAŽENÁ, LOUPANÁ, BROUŠENÁ OCEL								
10,62	16,22	183,59	17,69	60,00	14,94	108,59	194,82	16,22
STUDENÁ PÁSKA KLASICKÁ								
0,86	1,19	12,95	1,54	55,71	1,39	85,58	14,31	90,54

POZNÁMKA: *) Za poslední měsíc jsou údaje předběžné.

Zpracoval: Jiří Dufek, Ocelářská unie a.s. Praha



Meziroční porovnání měsíčních a postupných hutních výrob roku 2021 a 2022 v České republice

Výroba *)			Výroba	Index	Výroba	Index	Výroba	Index
Listopad	Prosinec	Leden-Prosinec	Listopad		Prosinec		Leden- Prosinec	
2022	2022	2022	2021	2022/2021	2021	2022/2021	2022	2022/2021
[tis. t]			[tis. t]	[%]	[tis. t]	[%]	[tis. t]	[%]
KOKS								
133,87	141,67	1702,60	149,25	89,70	159,11	89,04	1859,59	91,56
AGLOMERÁT								
361,36	329,73	4734,24	422,87	85,45	438,39	75,21	5523,82	85,71
SUROVÉ ŽELEZO								
247,52	224,13	3385,27	323,47	76,52	265,78	84,33	3873,83	87,39
SUROVÁ OCEL								
316,98	278,36	4289,34	409,14	77,48	340,08	81,85	4817,33	89,04
KONTISLITKY								
299,95	264,35	4067,00	384,67	77,98	323,82	81,64	4543,15	89,52
BLOKOVNY								
50,18	48,84	561,08	47,23	106,24	41,48	117,75	559,17	100,34
VÁLCOVANÝ MATERIÁL								
286,39	218,05	3996,15	395,19	72,47	308,66	70,65	4721,78	84,63
TRUBKY								
29,07	17,36	335,79	30,17	96,35	22,43	77,40	365,56	91,86
TAŽENÁ, LOUPANÁ, BROUŠENÁ OCEL								
16,22	11,02	194,61	14,94	108,59	11,08	99,45	205,90	94,51
STUDENÁ PÁSKA KLASICKÁ								
1,19	0,75	13,70	1,39	85,58	1,02	73,60	15,32	89,42

POZNÁMKA: *) Za poslední měsíc jsou údaje předběžné.

Zpracoval: Jiří Dufek, Ocelářská unie a.s. Praha



EUROPEAN GREEN DEAL

Průlomový nanokatalyzátor rozkládá páchnoucí sirovodík na vodík a síru

Sirovodík smrdí, je jedovatý a dělá problémy všude možně. Američtí nanofotonici vyvinuli plazmonický katalyzátor s nanočásticemi zlata, který naporcuje sirovodík na cenný plyný vodík a síru. Zdrojem energie pro tuto jednoduchou reakci je přitom jenom viditelné světlo.

Sirovodík čili sulfan se dvěma vodíky a jednou sírou si nespletete. Smrdí jako čert, tedy jako zkažené vejce. Je to problematická sloučenina, počínaje tím, že je prudce jedovatá. Vyskytuje se například v sopečných plynech, ale často se s ním lze setkat i v civilizaci. Hojně se objevuje ve stokách, různých skladištích nebo skládkách. Obzvláště nepříjemný je jako vedlejší produkt v petrochemickém průmyslu nebo třeba při výrobě bioplynu, přičemž je často nutné sirovodík komplikovaně odstraňovat. Co kdybychom ale tenhle smradlavý problém proměnili ve výdělečný podnik? Přesně o to se svými kolegy usiluje Naomi Halasová z americké Rice University. Vyvinuli technologii založenou na nanočásticích zlata, se kterou je možné přeměnit sirovodík na cenný vodík a síru. Tato přeměna probíhá v jediném kroku. Ještě lepší je, že veškerou energii pro tuto reakci poskytuje světlo, tedy například sluneční záření, ale i jiné zdroje.

Jak říká Halasová, emise sirovodíku komplikují průmyslu život, ale jeho likvidace stávajícími postupy je velmi nákladná. Jejich nanofotonický tým přichází s převratným a komerčně životaschopným nanokatalyzátorem. Jde o plazmonickou fotokatalýzu, která by mohla být mnohem levnější než soudobé postupy pro likvidaci nežádoucího sirovodíku. Badatelé vyrobili nanokatalyzátor tak, že pokryli povrch zrn oxidu křemičitého nanočásticemi zlata. Každá z těchto nanočástic intenzivně reaguje se specifickou vlnovou délkou viditelného světla. Tyto plazmonické reakce vytvářejí vysokoenergetické a krátkověké elektrony („hot carriers“), které pohánějí fotokatalýzu. Halasová s kolegy názorně předvedli v laboratorních experimentech, že tuto fotokatalýzu je možné provést i se soustavou LEDek. Katalyzátor prostě přeměňuje sirovodík na plyný vodík a síru. Je to velmi křiklavý kontrast k dnešnímu zpracovávání sirovodíku, které se typicky spoléhá na Clausův proces. Ten má snad všechny nevýhody, co člověka napadnou. Jde o spalování sirovodíku na oxid siřičitý a následnou katalytickou reakcí oxidu siřičitého se zbylým sirovodíkem. Proces vyžaduje řadu různých kroků a teploty až kolem 815 °C. Je to nákladné a asi nejhorší je, že nevzniká vodík. Produktem Clausova procesu je síra s vodou.

Na uplatnění plazmonické fotokatalýzy sirovodíku již pracuje startup Syzygy Plasmonics z Houstonu, u jehož zrodu stála i Halasová. Se svými kolegy věří, že jejich metoda může být natolik levná a účinná, že ji bude možné využít pro likvidaci sirovodíku i ze zdrojů mimo průmysl, jako například z kanalizačního plynu anebo živočišné výroby. Zároveň bude možné k rozkladu sirovodíku používat LEDky nebo ještě „zelenější“ solární elektřinu.

Zdroj: <https://www.osel.cz/12565-prulomovy-nanokatalyzator-rozklada-pachnouci-sirovodik-na-vodik-a-siru.html>

Globální kapacita zařízení na zachycování emisí CO₂ by mohla do roku 2030 vzrůst na 6násobek

Globální kapacita zařízení na zachycování emisí CO₂ by mohla do roku 2030 dosáhnout 279 mil. tun/rok. To je více než 6násobek stávající kapacity těchto zařízení, která činí 43 mil. tun/rok. Vyplývá to z výhledu výzkumníků z BloombergNEF (BNEF). Pokud by všechny oznámené projekty zaměřené na zachycování a ukládání emisí CO₂ byly realizovány, mohlo by být v roce 2030 díky těmto zařízením zachyceno téměř 280 mil. tun emisí CO₂. Aktuálně zachytí tato zařízení ročně zhruba 43 mil. tun emisí CO₂. Pro srovnání, podle dat zveřejňovaných Eurostatem činily emise skleníkových plynů v EU v roce 2020 3,1 mld. tun. Podle BNEF je dnes je většina zařízení pro zachycování emisí CO₂ využívána v oblasti zpracování zemního plynu. V roce 2030 by měla být zhruba polovina těchto zařízení využívána při výrobě elektřiny a pro výrobu nízkouhlíkového vodíku a čpavku.

„Zařízení na zachycování, využívání a ukládání emisí CO₂ (CCUS) jsou klíčovou technologií potřebnou pro dekarbonizaci sektorů, jako jsou petrochemický či cementárenský průmysl, a pro poskytování nepřetržitě dostupné výroby elektřiny v elektrárnách spalujících zemní plyn vybavených tímto zařízením. Přesto však není, ani přes významné zrychlení rozvoje tohoto sektoru v posledních dvou letech, rozvíjena kapacita zařízení na zachycování emisí

CO₂ dostatečně rychle na to, aby byly splněny klimatické cíle pro konec této dekády,“ uvedl BNEF. Do roku 2030 by se měl změnit také způsob, jakým bude nakládáno se zachyceným oxidem uhličitým. Zatímco v dnešní době je zachycený oxid uhličitý využíván zejména při těžbě ropy, v roce 2030 by již většina zachyceného CO₂ měla být ukládána do podzemních úložišť.

„Tato změna je vyvolána legislativou, která preferuje ukládání CO₂ místo jeho využívání, a dále projekty, které cílí na využití technologií na zachycování a ukládání emisí CO₂ pro dekarbonizační účely, kdy musí být zachycený CO₂ ukládán, aby došlo ke splnění cílů,“ dodal BNEF.

Zdroj: https://oenergetice.cz/emise-co2/globalni-kapacita-zarizeni-zachycovani-emisi-co2-by-mohla-roku-2030-vzrust-6nasobek?utm_source=www.seznam.cz&utm_medium=sekce-z-internetu#dop_ab_variant= 0&dop_source_zone_name=hpfeed.szhnp.context

Další nápad na odstraňování CO₂. Startup má speciální reaktor s řasami

I když snad už každá automobilka slíbila nadobro skončit s auty na fosilní paliva a mohutně investuje do elektrifikace, na boj s klimatickou krizí to nestačí a svět hledá další řešení. Vedle lapačů CO₂ to nově mohou být i řasy. Na klimatické konferenci COP27 se členské státy OSN každoročně domlouvají, jak omezit globální oteplování a rovněž se vypořádat s jeho důsledky. A to už od uzavření první dohody o klimatu v roce 1992. Tentokrát byla v Egyptě a důraz se kladl na udržení cílů Pařížské dohody z roku 2015 při životě, jinými slovy na omezení růstu teploty na 1,5 stupně oproti době před průmyslovou revolucí.

Podle analýz OSN ale svět míří současným tempem ke katastrofálnímu 2,5 stupně do konce tohoto století. EU proto svůj cíl snížit emise do roku 2035 aktualizovala o dva procentní body na 57 procent. Nulové emise prý svět před ohněm neuchrání. Třeba podle českých ekologických organizací to je ale stále nedostačující a unie by do té doby měla snížit objem skleníkových plynů vypouštěných do ovzduší snížit o 65 procent. A někteří experti tvrdí, že i cíl nulových emisí k roku 2050 musí nahradit cíl negativních emisí, čili aby se CO₂ začal z ovzduší i odčerpávat. Takzvané lapače už s podporou soukromých i vládních investic testují a rozšiřují startupy třeba v USA či Švýcarsku. O pozornost finančníků ale usilují i další firmy a technologie včetně unijních.

„Musíme firmám usnadnit eliminování jejich emisí CO₂ z provozů. My k tomu používáme přírodní cesty-řasy a fotosyntézu-abychom vyřešili jednu z největších výzev současnosti: Jak můžete odstranit CO₂, aniž byste z toho udělali tíživý proces pro vlastníky producentů CO₂?“ říká pro agenturu AP ředitel dánského startupu Algicel, Henrik Busch-Larsen.

Lodní kontejner se srdcem z řas

Jeho firma vyrobila asi 12metrový lodní kontejner, v jehož útrobach klíčový skleníkový plyn nejenže mizí, ale mění se na životodárný kyslík a biomasu bohatou na omega-3 mastné kyseliny. Srdcem tohoto „fotobioreaktoru“, jak ho označují sami Dánové, jsou mikrořasy, které jako všechna zeleň v přírodě absorbují CO₂ jako nezbytný zdroj pro svůj růst. Sestrojit prototyp trvalo jeden rok.

„Řasy jsou vystavené světlu, které pohání fotosyntézu a přeměňuje energii - fotonovou energii - a oxid uhličitý na biomasu. Řasy pumpujeme skrz ústrojí a pořád je bombardujeme světlem a zásobujeme CO₂ za produkce biomasy a kyslíku,“ uvádí k principu fungování laboratorní vědec Jonathan Burns-Tang z dánské firmy.

Zdroj: https://www.seznamzpravy.cz/clanek/tech-technologie-dalsi-napad-na-odstranovani-co2-startup-ma-specialni-reaktor-s-rasami-219628#dop_ab_variant=0&dop_source_zone_name=hpfeed.szhnp.box&utm_source=www.seznam.cz&utm_medium=sekce-z-internetu

Lapače CO₂. Havaj jako první čistí oceán a Biden dá 80 miliard do vzduchu

Přestože jsou relativně malé, mořské řasy absorbují z atmosféry obrovské množství CO₂ - podle studií dokáže jeden akr řas odstranit až 2,7 tuny oxidu uhličitého za den. A to má pilotní reaktor startupu Algicel ještě urychlit. Mikrořasy se v něm pumpují skrz dlouhé horizontální trubky, které jsou neustále vystavené ostrému světlu z LED žárovek, přísunu živin, a právě i skleníkového plynu-čili všemu, co řasy potřebují k růstu.

Neustálé osvětlení dělá sice technologii energeticky náročnou, ale s příkonem z obnovitelných zdrojů ji lze pořád brát jako ekologickou. „Když se podíváte na stromy, tak ty si musí postavit každou buňku, musí si postavit veškerou svou strukturu, a potom si teprve postaví list, který dělá celou fotosyntézu-řasy tohle celé osekávají. Řasa je prostě jedna buňka, která musí zvládnout celou fotosyntézu sama-bez struktury, bez potřeby všech těch dalších věcí, ona prostě jen roste,“ dodává vědec z dánského startupu.

Nápad může podpořit bioplyn

Firma prý svou technologií cílí na bioplynový průmysl čili energetické řešení, které je v Evropě aktuálně prosazované v úsilí oprostit se od závislosti na plynu z Ruska. Od roku 2013 bylo v Dánsku do tamní infrastruktury připojeno 51 zařízení na bioplyn a k začátku letoška obstarávala přibližně pětinu spotřeby plynu v zemi. Algiecel by chtěl tento sektor ještě posílit a plánuje nabízet své modulární fotobioreaktory na míru.

„V bioplynu je velký potenciál - a zvláště se současnou geopolitickou krizí. Tady v Evropě potřebujeme vyrábět víc plynu, víc zeleného plynu. A pokaždé, když zvýšíte kapacitu v bioplynce, také bude mít víc CO₂ vypouštěného z její produkce. A tady někde přicházíme na řadu my, protože teď můžete nafouknout celý bioplynový průmysl a přidat tuto technologii, abyste se zbavili oxidu uhličitého,“ dodává šéf firmy.

Sen všech ekologů. Auto na elektřinu, které při jízdě lapá CO₂

Biomasa z kontejnerů pak může podle startupu posloužit jako krmivo pro dobytek a omega-3 mastné kyseliny prý lze prodávat kosmetickým firmám. Podle kosmetické společnosti Australian Bodycare se cena jejich surovin včetně olejů jenom letos zvýšila o 20 procent.

„Největší výzvou teď je, že naše suroviny těžce zdražují. Ale to v podstatě všechno, energie, doprava, balení, materiály a tak dále. Ale zdražování surovin je naší největší obavou. Naše přírodní oleje dovážíme z celého světa, takže doprava za námi do Vissenbjergu v Dánsku za sebou nechává docela velkou uhlíkovou stopu,“ přiznává ředitel Australian Bodycare Jan Kruse Hansen.

Dánský startup založený teprve v květnu roku 2021 vybral na svůj nápad už asi 14,3 milionu dánských korun, v přepočtu skoro 50 milionů českých korun. Finance na vývoj získal od kodaňského akcelérátoru BioInnovation Institute, ale i od Inovačního fondu Dánska (IFD) a Evropského fondu pro regionální rozvoj (ERDF).

Vědci umí vyrobit letecké palivo a naftu ze slunce, CO₂ a vody

Tisíce kontejnerů, miliony tun CO₂ ročně z ovzduší

Přestože je technologie Algiecelu stále v pilotní fázi, pokud vše půjde podle plánu, mělo by už příští rok vzniknout první „full-scale“ (neprototypové) demonstrační zařízení. V příští dekádě jich chce mít v provozu tisíce a čistit z ovzduší miliony tun CO₂ ročně.

Prototyp zatím stojí od června v areálu partnerského Dánského technologického institutu (DTI). Tato nezisková výzkumná organizace asi 20 kilometrů od Kodaně sama hledá cesty pro boj s klimatem už řadu let. „Pracovali jsme více než 10 let na vývoji zelených řešení a zelených technologií. A jednou z nich je to, jak můžete vypěstovat mikrořasy. Ty my používáme jako velice dobrý produkční organismus tvořící proteiny a tuky. A mikrořasy jsou úžasný organismus, protože pohlcují obrovské množství oxidu uhličitého a zároveň můžete produkovat tyto proteiny,“ doplňuje ředitelka DTI Anne Maria Hansen.

Zdroj: FocusOn

Česká firma nabízí reaktor měnící odpad na energii i teplo, a bez emisí

Nerecyklovatelné plasty, lopatky z větrných turbín, autovraky, ale hlavně jedovaté čistírenské kaly umí měnit na plyn, energii i stavební materiál komerční verze plazmového reaktoru z Dubé. Díváte se na reaktor s plazmovým hořákem, jinak také plazmatronem, který generuje výron žhavého plazmatu čili vodivého plynu, dosahující teploty až 5 tisíc stupňů Celsia. Skoro tolik je i na povrchu Slunce. Tuto výheň ale najdete také v Česku, v prostoru vědecko-technického parku v Dubé na Českolipsku, kde ji už od přelomu tisíciletí vyvíjela česká společnost Millenium Technologies. Slouží ke zpracování těžko odbouratelných odpadů.

Jeho unikátnost spočívá v tom, že tento reaktor spaluje odpad pomocí energie, kterou si sám vyrobí a při likvidaci materiálu ještě trocha energie zbude. „Mezi anodou a katodou se utváří elektrický oblouk, který tlakovým vzduchem vyháníme ven do prostoru reaktoru, a tam dochází k výronu přehřátého plynu. Ten používáme k tomu, abychom předali energii materiálu, který chceme zplynit,“ vysvětluje pro SZ Tech fungování stroje zakladatel firmy a člen představenstva Grischa Kahlen.

Jaké procesy v reaktoru probíhají a co vytváří

Inovativní reaktor ale nebezpečný materiál z nemocnic, komunální odpad, sklolaminát, nerecyklovatelný plast a části autovraků nespaluje. V komoře o teplotě 1400 stupňů Celsia na to není kyslík a probíhá v ní takzvaná vitifikace a plazmové zplyňování.

První proces je roztavení anorganické čili neživé části odpadu a její zesklovatění na černou hrubozrnnou strusku, která neškodí prostředí, má dobré izolační vlastnosti a používá se ve stavebnictví. A druhý krok je přeměna organického dílu odpadu na syntézní plyn, který slouží k výrobě elektřiny i tepla, ale i k získání cenného vodíku. Celá technologie je údajně zcela bezemisní.

„Tu energii, kterou získáváme zplyněním kalů a vitifikací (přeměnou materiálu na sklo) anorganické části, tak ta stačí na ten proces samotný. To znamená, že toto není příklad, kde bychom vyráběli energii pro ostatní obyvatelstvo. Ale nepotřebujeme žádnou energii k tomu, abychom je zpracovali. Kdybychom do této velikosti reaktoru dali například komunální odpad, což v budoucnosti jistě jednou budeme dělat, tak bychom tím uspokojili město, jako je třeba Česká Lípa,“ dodává pro redakci Kahlen.

Půl tuny odpadu za hodinu. Kalů by zbavil i 50 tisíc lidí

Prototyp zařízení v Millenium Technologies představili už v roce 2018 a letos od konce ledna testovali v reálném provozu už jeho třetí verzi, která zpracovala 140 kilogramů odpadu za hodinu.

Zdroj: https://www.seznamzpravy.cz/clanek/tech-technologie-ceska-firma-nabizi-reaktor-menici-odpad-na-energii-i-teplo-a-bez-emisi-219892#dop_ab_variant=0&dop_source_zone_name=hpfeed.szhnp.box&utm_source=www.seznam.cz&utm_medium=sekce-z-internetu

Dánsko připravuje Projekt Greensand, aneb nacpi uhlík do ropného chřtánu

Představte si ropné pole pod dnem Severního moře, z něhož byla vytěžena ropa i zemní plyn, ale zůstaly tam ropné plošiny. Dánský projekt počítá s tím, že pošlou uhlík opačným směrem. Ropu a zemní plyn pod mořem nahradí zkapalněný oxid uhličitý. V roce 2030 tam chtějí ukládat 8 milionů tun uhlíku ročně.

Dánsko intenzivně připravuje ambiciózní Projekt Greensand, jehož cílem je, řečeno jen s jemnou nadsázkou, vrátit ropnému vrtu uhlík přímo do chřtánu. Hodlají napustit velké množství polapeného uhlíku do vyčerpaného ropného vrtu v Severním moři, aby zůstal uvězněn ve vrstvách písků, které donedávna obsahovaly ropu a zemní plyn. S tímto projektem je spojený největší grant, který byl kdy v historii Dánska udělen. Získala ho společnost Ineos Energy a má hodnotu 26 milionů eur. Tento pozoruhodný projekt využije v pilotní fázi ropnou plošinu Nini A, která se nachází asi 200 kilometrů od pobřeží Dánska v Severním moři. Operátoři plošiny otočí obvyklý směr proudění a napumpují tam zkapalněný oxid uhličitý, zhruba 1,8 kilometru pod mořské dno. Tím začnou plnit rezervoár Siri Field (část Nini West), který je tvořený vrstvami písků z období paleocénu. Právě tato oblast byla vytipována jako velmi vhodná pro ukládání polapeného uhlíku.

Dánsko si vytyčilo cíl, že od roku 2025 tam uloží 1,5 milionu tun uhlíku ročně. V roce 2030 by rádi dosáhli 8 milionu tun ročně, což představuje více než 13 procent dnešních emisí Dánska. Technologie ale zatím má své mouchy. Například, uhlík tam budou vozit lodě, které v současnosti generují emise. Tím se samozřejmě efektivita Greensandu snižuje.

Představitelé projektu uvádějí, že v tomto jediném rezervoáru je dost místa na veškerý uhlík, který kdy Dánsko ve své historii vypustilo. A ještě zbude. Velkou výhodou je možnost využití ropného vrtu, takže není nutné kvůli ukládání uhlíku pod zem, nebo v tomto případě pod moře, budovat novou infrastrukturu. Prostě nacpou uhlík tam, odkud jsme ho předtím vzali.

Zdroj: <https://www.osel.cz/12607-dansko-pripravuje-projekt-greensand-aneb-nacpi-uhlik-do-ropneho-chrtanu.html>

Víme, jak Evropu zbavit CO₂. Island má přelomový nápad, staví speciální úložiště

Oxid uhličitý vzniká při spalování v autech, uhelných elektrárnách i průmyslové výrobě. Jako jeden z neškodlivějších skleníkových plynů přispívá k oteplování planety, a zhoršuje tak klimatickou krizi. Na Islandu ale objevili způsob, jak svět plynu naopak zbavovat. V podzemních úložištích chtějí sbírat oxid z Británie i kontinentální Evropy. Stavba terminálu pro jeho dovážení začne ještě letos.

Páteř ambiciózních plánů Islandu tvoří technologie takzvaného projektu Carbfix, který vznikl už v roce 2006. Podílí se na něm energetická společnost hlavního města Reykjavíku a řada zahraničních vědců. Myšlenka je jednoduchá: CO₂ se smísí s vodou a vstříkne do čediče - lávové horniny, které je na Islandu dostatek - v hloubce několika set metrů pod zemí. Taková voda je kyselá, a kámen rozleptává. Uvolňují se z něj minerály jako vápník, hořčík nebo železo, které se po čase s oxidem uhličitým spojí. Za dva roky je výsledkem nová hornina, uhličitánová. Ta vyplní volný prostor v pórovitém čediči v podzemí a plyn se trvale odstraní ze zemské atmosféry, kde jeho přebytek způsobuje problémy.

Jak ukázal výzkum, který Carbfix provedl už před pěti lety, tímto způsobem se dá zneutralizovat až 98 procent veškerého plynu. Na jednu tunu CO₂ je potřeba pětadvacetinásobné množství vody. Islandané dosud používali vodu z geotermální elektrárny Hellisheiði. Nyní začínají stavět nové úložiště v oblasti zátoky Straumsvík, nedaleko hlavního města. První vrty jsou naplánovány na příští rok, začátek provozu o tři roky později. Celková kapacita by měla po roce 2030 přesáhnout tři miliony tun plynu ročně. Převážet ho bude v konečné fázi šest lodí.

Na první pohled se může zdát nesmyslné vozit plyn z Evropy na ostrov, který je od nejbližší pevniny (Norska) vzdálený bezmála 1500 kilometrů. Je ale pravděpodobné, že zájemci se najdou. Vypouštění oxidu uhličitého v energetice, ocelářství, železářství a některých dalších odvětvích je totiž v Evropské unii regulováno systémem obchodování s emisními povolenkami - kdokoli chce do vzduchu uvolnit CO₂, musí si koupit povolení v odpovídajícím objemu.

Jenže ceny povolenek v posledních letech výrazně rostou, a tím zdražuje i znečišťování. Před týdnem se cena za tunu skleníkových plynů vyšplhala na více než 45 eur (1163 korun), Islandané slibují náklady na jednu tunu o polovinu menší. S financováním projektu pomáhá EU.

Podobné technologie se označují zkratkou CCS (z anglického *carbon capture and storage*, tedy zachycení a uložení uhlíku). Řada zemí, například Spojené státy nebo Norsko, už s nimi experimentuje. Jedná se ale většinou o obyčejné ukládání CO₂, ne jeho faktickou neutralizaci. Například v německém Braniborsku testovali možnost úložiště již před lety, plány nakonec skončily kvůli odporu místních obyvatel a ekologických organizací. Vadilo jim „zašpinění půdy“, možnost úniku plynu i to, že metoda by pomáhala prodloužit dobu, po kterou se v zemi vyrábí elektřina spalováním z uhlí.

Tato otázka je nyní vyřešená, Německo s uhlím skončí nejpozději v roce 2038 a zástupci průmyslu ukládání CO₂ dále prosazují. „Samotné omezování emisí skleníkových plynů, rozšiřování obnovitelných zdrojů energie nebo zvyšování energetické účinnosti nebude stačit k dosažení klimatické neutrality,“ míní Svaz německého průmyslu. Tento cíl, který si EU vytyčila do roku 2050, počítá se zásadním snížením emisí a vyvážením těch zbylých právě metodami na jejich odstraňování z atmosféry.

Této logiky se drží například Velká Británie. Do roku 2040 chtějí Britové vybudovat obří úložiště na oxid uhličitý pod hladinou Severního moře, v blízkosti průmyslových podniků jižního Walesu by pak měla vzniknout zařízení, která pomocí vodíku CO₂ neutralizují. Na celý koncept CCS britská vláda vyčlenila 1,17 miliardy eur (přes 30 miliard korun). I Londýn se zavázal být do roku 2050 klimaticky neutrální.

Zdroj: ČTK

Proklamace Třineckých železáren

Vnímáme nebezpečí klimatické změny a její důsledky. Hodláme postupně redukovat naši uhlíkovou stopu a nadále zodpovědně přistupovat k ochraně životního prostředí. Výroba naší oceli doznala díky investicím do nejnovějších technologií významných změn a patří k nejekologičtějším v Evropě. Veškerá výrobní zařízení splňují požadavky BAT, a to bez jakýchkoliv výjimek, každoročně plníme přísné ekologické limity v ochraně ovzduší, vody i půdy. Snažíme se o maximální recyklaci a využití vedlejších produktů a odpadů vznikajících ve výrobních procesech. V současnosti není známa komerčně fungující technologie výroby oceli bez vzniku uhlíkové stopy. Toho jsme si plně vědomi, a proto připravujeme inovativní projekty pro její redukci. Zároveň realizujeme dílčí akce kompenzující výskyt emitovaného CO₂. Na cestě k uhlíkové neutralitě je naším postupným cílem snížení emisí CO₂ do roku 2030 o 55 % oproti roku

1990. Neustále inovujeme naše výrobky s cílem směřovat ocelové produkty z našich výrobních linek v co nejvyšší míře do odvětví průmyslu, která se na snižování uhlíkové stopy podílí. 94 % naší produkce realizujeme na evropských trzích, čímž přispíváme ke snižování uhlíkové stopy z přepravy.

Zdroj: https://www.trz.cz/modul_werk_uhlik_neutralita/dokumenty/proklamaceTZ_cz.pdf

Za vypouštění CO₂ se bude platit víc. EU se dohodla na zpřísnění emisních povolenek

Evropská unie se v neděli nad ránem předběžně dohodla na zpřísnění a rozšíření fungování trhu s emisními povolenkami. Přihlásila se tím k ústřednímu bodu své zelené dohody pro Evropu, jejímž cílem je učinit unijní ekonomiku do poloviny století uhlíkově neutrální. Informovalo o tom dnes české předsednictví a Rada EU. Na změně se dohodli zástupci unijních zemí a Evropského parlamentu. Systém obchodování s povolenkami se nyní bude vztahovat i na vytápění a na silniční dopravu, neunikne mu ale ani námořní doprava. Unie zároveň zrychlí tempo, jakým firmy z různých odvětví – od výroby elektřiny až po ocelárny – budou muset snižovat škodlivé emise. Ekonomické dopady přechodu na čistší energetiku má spotřebitelům pomoci mírnit nově zřízený klimatický fond.

Hluboké reformy tvoří plán EU na snížení emisí oxidu uhličitého (CO₂) do roku 2030 minimálně o 55 procent proti úrovni z roku 1990. Do roku 2050 chce EU dosáhnout uhlíkové neutrality, což znamená, že se do ovzduší nebude vypouštět více skleníkových plynů, než kolik jich může být technicky uskladněno nebo kolik příroda může sama vstřebat.

„Je to zatím největší zákon na ochranu klimatu v Evropě, podle některých i ve světě,“ řekl novinářům na ráno vyjednávač Evropského parlamentu Peter Liese. „Ovzduší tím získá mnoho, ušetří se velký objem CO₂, a to za nejnižší možnou cenu,“ dodal podle agentury Bloomberg. Vyjednávání trvalo zhruba 29 hodin.

Zdroj: <https://www.novinky.cz/clanek/ekonomika-za-vypousteni-co2-se-bude-platit-vic-eu-se-dohodla-na-zpriseneni-40417774>

Pokud firmy vypouštějí CO₂, musejí si teď kupovat povolenky, což je má motivovat k tomu, aby vypouštěly méně škodlivin. Do roku 2034 se nyní postupně zruší bezplatné certifikáty.

Dopady na spotřebitele, jako je například růst nákladů na vytápění, by měl kompenzovat klimatický sociální fond, pro který se počítá s 86 miliardami eur (téměř 2,1 bilionu Kč). Má financovat například investice do energeticky efektivnějších budov. Projekty jsou jádrem balíčku „Fit for 55“, který Evropská komise představila v létě 2021. Dohodu ještě musí oficiálně potvrdit Evropský parlament a členské státy, což se ale považuje už jen za formalitu. Ceny emisních povolenek v očekávání přísnějších pravidel už letos vystoupily na rekordních 99,22 eura za tunu. V pátek se cena termínových kontraktů na povolenky v Amsterdamu pohybovala těsně nad 83 eury za tunu, což je více než pětinašobek ve srovnání s cenou před pěti lety.

Oceláři: Rozhodnutí EU o povolenkách a energiích je líbivé, realita bude krutá

Za líbivé, ale odtržené od reality označili oceláři rozhodnutí Evropské unie o revizi systému obchodování s emisními povolenkami i nouzové zastropování cen plynu na evropské úrovni. Dekarbonizace je sice prioritou firem vyrábějících ocel, ale její příliš rychlé zavádění bude znamenat ztrátu konkurenceschopnosti. ČTK to dnes řekl předseda představenstva Ocelářské unie Daniel Urban. Podle něho jsou uvedené dohody výsledkem politického handlování lidí, kteří „chtějí vypadat dobře, ale ví velmi málo o proveditelnosti překotné dekarbonizace průmyslu v EU a nechtějí slyšet o dopadu drahých povolenek a energií na jeho konkurenceschopnost.“

Oceláři si podle Urbana uvědomují důležitost dekarbonizace. Analýzy totiž uvádějí, že za každou vyrobenou tunou oceli jsou asi dvě tuny emisí oxidu uhličitého. Firmy ale už teď mají velké problémy a bojí se, jak se situace dále vyvine. „Revize EU ETS (systému obchodování s emisemi) byla za českého předsednictví schválena, aniž by evropské instituce zohlednily reálné možnosti, časovou náročnost a náklady na dekarbonizaci firem. Je to spíše zbožné přání, které dobře vypadá na twitteru a v médiích, ale reálné dopady budou bohužel kruté,“ řekl dnes Urban ČTK.

Zástupci evropských institucí se o víkendu dohodli na zprísnění a rozšíření fungování trhu s emisními povolenkami, čímž se přihlásili k ústřednímu bodu své Zelené dohody pro Evropu. Cílem je učinit unijní ekonomiku do poloviny století uhlíkově neutrální. Do roku 2030 má klesnout bezplatná alokace povolenek sektorům ohroženým únikem uhlíku o polovinu.

Ocelářská unie uvádí, že jedna z českých hutí za emisní povolenky již dnes zaplatí kolem jedné miliardy korun ročně. Nově schválená pravidla podle Urbana tyto náklady postupně násobně zvýší. Dodal, že „brutální“ je i rychlost snižování objemu bezplatných povolenek, která vůbec neodráží reálné možnosti snižování emisí v ČR, kde chybí zelená elektřina i přenosová kapacita, která by do hutí dovedla dostatečný objem elektřiny. „Dnes ještě neexistuje zcela bezemisní výroba oceli, teprve se rozjíždí nějaké pilotní vodíkové projekty,“ řekl Urban. Dodal, že ani vodíku nebude v EU dlouho dostatek, zcela jistě ne do roku 2030. Cena povolenky bude podle něj stoupat, firmy jich budou muset kupovat víc, takže se zvednou jejich náklady.

Velkou neznámou je podle Urbana i zavádění uhlíkového cla na hranici EU (CBAM). Poplatek, který mají při dovozu do EU hradit dodavatelé neekologicky vyráběného železa, oceli, hnojiv a dalších produktů ze třetích zemí, se začne vybírat od roku 2026 v souladu s postupným rušením bezplatných povolenek v těchto odvětvích. „Nevíme, zda to bude skutečně fungovat, a zda to nebudou někteří exportéři do EU obcházet“ uvedl. Ocelářů se dotkne i pondělní dohoda EU ohledně parametrů nouzového omezení cen plynu v případě jejich výrazného růstu. Urban řekl, že podle jeho názoru by pomohlo jedině oddělení ceny plynu a elektřiny. „To nechtěli Němci ani Nizozemci, takže se pondělní dohoda vydává za úspěch, i když je to spíš cesta, jak zachránit tvář zúčastněných“ řekl.

Evropa podle Urbana vyváží mimo EU ocel za 45 miliard eur (v přepočtu 1,09 bilionu Kč), což je asi 20 procent produkce. Pokud se evropská ocel stane mimo EU nekonkurenceschopná, bude to znamenat ztrátu desítek tisíc přímých pracovních míst, obává se Urban. „Bylo by smutné, kdybychom se stali uhlíkově neutrální tak, že nastane postupný konec průmyslu v Evropě a my budeme všechno dovážet,“ řekl Urban.

Zdroj: https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/ocelari-rozhodnuti-eu-o-povolenkach-a-energiich-je-libive-realita-bude-kruta/2302312?utm_source=www.seznam.cz&utm_medium=sekce-z-internetu#dop_ab_variant=863801&dop_source_zone_name=hpfeed.sznhp.box

Palivo budoucnosti. Podařilo se výrazně zvýšit jeho produkci

Inženýři použili zvukové vlny k 14násobnému zvýšení produkce zeleného vodíku. Roztok usnadňuje extrakci prvku vody. Vědci z australské univerzity RMIT vyvinuli inovativní způsob, jak výrazně zvýšit výrobu ekologického vodíku. Pomocí zvukových vln a elektrolýzy při štěpení vody se jim podařilo získat tento prvek jako alternativu k fosilním palivům. Podle inženýrů by jejich objev mohl výrazně snížit náklady na výrobu obnovitelných zdrojů energie.

Jedním z hlavních problémů elektrolýzy je vysoká cena používaných elektrodových materiálů, jako je platina nebo iridium. Díky zvukovým vlnám je získávání vodíku z vody mnohem snazší, a proto není třeba používat žíravé elektrolyty a drahé elektrody. Protože voda není korozivní elektrolyt, můžeme použít mnohem levnější elektrodové materiály, jako je například stříbro,“ uvedl v prohlášení docent Amgad Rezk z RMIT, který práci výzkumníků vedl.

Levná energie budoucnosti?

Při svém experimentu použili inženýři z RMIT vysokofrekvenční zvukové vlny k „rozdělení a ovládnutí“ jednotlivých molekul vody během elektrolýzy. „Elektrická účinnost elektrolýzy se zvukovými vlnami byla při daném vstupním napětí asi 14krát vyšší než elektrolýza bez nich. To odpovídalo množství vyrobeného vodíku,“ uvedla Yemima Ehrnst, která se výzkumu zúčastnila.

Další z výzkumníků, profesor Leslie Yeo, v rozhovoru pro Interesting Engineering uvádí, že vyvinutá metoda umožňuje zlepšit účinnost přeměny, což znamená 27% nárůst čistého pozitivního výsledku, pokud jde o úspory energie. Výzkum vědců z australské univerzity byl publikován v časopise Advanced Energy Materials. Na ochranu nové technologie již byla také vydána předběžná patentová přihláška.

Zdroj: https://techsvet.cz/nejnovjsi-zpravy/palivo-budoucnosti-podarilo-se-vyrazne-zvysit-jeho-produkci/mediatrend/?utm_source=www.seznam.cz&utm_medium=sekce-z-internetu#dop_ab_variant=0&dop_source_zone_name=hpfeed.sznhp.box

Nanovláknenné membrány Metamorph zachytí a zpracují oxid uhličitý

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT se podílí na vývoji technologie pro zachyt a průmyslové využití CO₂. Na projektu spolupracuje s Fakultou chemicko-inženýrskou Vysoké školy chemicko-technologické v Praze (VŠCHT), Přírodovědeckou fakultou Univerzity Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem (UJEP) a soukromými společnostmi SINTEF a InoCure.

Emise oxidu uhličitého jsou považovány za jeden z nejvýznamnějších globálních problémů 21. století. Dosud však neexistuje efektivní technologie pro zachyt CO₂ a jeho průmyslové využití. Cílem projektu METAMORPH je tvorba systémů pro zachyt oxidu uhličitého pomocí kombinace nanočástic a nanovláken, která umožní jak sorpci CO₂ z průmyslových par, tak jeho proměnu na etanol nebo metanol s dalším využitím pro výrobu ekologických paliv nebo bioproduktů.

Klíčovou inovací přinese vývoj účinnějšího procesu zachycování a využití uhlíku pomocí spojení materiálů pro sorpci CO₂ s pokročilými fotochemickými katalyzátory v jednoduchých nanovláknenných membránách vytvořených procesem vysokokapacitního zvláknění. Projekt propojuje experty na CO₂ sorpční nanočástice (VŠCHT, UJEP) s odborníky na fotokatalýzu (SINTEF) a na výrobu nanovláken (UCEEB a InoCure). Projekt METAMORPH byl podpořen částkou 2 268 100 € Norskými fondy a Technologickou agenturou ČR v rámci Programu KAPPA.

Zdroj: https://www.volty.cz/2022/12/23/nanovlakenne-membrany-metamorph-zachyti-a-zpracuji-oxid-uhlicity/?utm_source=www.seznam.cz&utm_medium=sekce-z-internetu#dop_ab_variant=0&dop_source_zone_name=hpfeed.szhnp.box

Kvůli Putinovi se odsunul zajímavý vodíkový projekt s Ukrajinou

Vodíkový speciál: Většina spotřeby vodíku bude v těžké dopravě. Jakým způsobem česká vláda podporuje vodíkový průmysl, kde budeme tuto důležitou surovinu získávat a kdy se pojedeme vodíkovým vlakem po republice, nám v rozhovoru objasnil Petr Mervart, zmocněnec ministra průmyslu a obchodu pro vodíkové technologie.

Českem nedávno projížděl vodíkový vlak i nákladní auto, vrátí se zase někdy?

Určitě. V Česku jsme dokonce teď měli i vodíkový autobus, který chvíli jezdil v Mostě. Věříme, že autobusy a vlaky se vrátí, děláme pro to všechno možné. Nejdřív bych možná mluvil o autobusech, protože v Praze by hned na jaře měl začít jezdit vodíkový autobus. Konkrétně na lince do Barrandova, protože tam vzniká první plnicí stanice v Praze. Druhý autobus bude jezdit úplně na druhé straně republiky, mezi Havířovem a Ostravou. Vyvinuli ho na Slovensku. Je to takový velice zvláštní autobus, protože je dělaný z kompozitů. Díky tomu je lehký a jeho výhodou je, že ta teoretická spotřeba je někde kolem tří a půl kilogramu vodíku na 100 kilometrů, což je jenom trochu víc, než má Toyota Mirai. Jsme hodně zvědaví, jestli provozní výsledky budou skutečně taky takové a jestli spotřeba bude tak nízká, jak to vypadá po prvních testech. Když spotřeba bude kolem tří čtyř kilogramů vodíku, tak už dneska ten autobus může být konkurenceschopný alespoň po provozní stránce s normálními naftovými autobusy. Co se týče nákladů, tam to není tak rychlé. Musíme opravdu počkat, než někdo nákladní automobily začne vyrábět. A co se týče vlaků, tam diskutujeme několik možností. Asi to první, o čem dneska mluvíme a o čem jsme vedli několik diskuzí i se saskou vládou, by mohlo být propojení mezi Děčínem a Bad Schandau, nahoře do Sebnitz, pak do Rumburka a odsud buď přes Polsko a Zittau do Liberce, anebo dolů na Českou Lípou.

Jak dlouho se takový vlak vůbec plní a jakou má dojezdovou vzdálenost?

V tom je právě ta největší výhoda vodíkových technologií, že plnění je výrazně kratší než dobíjení baterií. Vodíkové vlaky, aspoň na základě zkušeností, co jsou z Německa, se plní kolem 15–20 minut a s tímto naplněním jsou schopné jezdit kolem tisíce kilometrů. Hodně se teď mluví o vlaku Alstom Coradia iLint, který má rekord na jedno naplnění vodíkem – ujel asi 1175 kilometrů.

Na druhou stranu musím říct, že když se mluví o bateriových vlcích, tak i tam doba dobíjení je kolem 20 minut. Ale za těch 20 minut se dobije jenom tak, aby mohl projet přes nějaký úsek, který není elektrifikovaný. To znamená cca kolem 70 kilometrů, kdežto vodíkový vlak na to ujede 1000 kilometrů. Stačí naplnit ho vodíkem ráno a pak může jezdit pořád po celé lince tam a nazpátek.

V Německu už je první trasa, na které vlaky od Alstomu jezdí. Zajímavé určitě je, že chtějí změřit, kolik energie opravdu potřebují. A zdá se, že v Dolním Sasku, kde to funguje, jim stačí dva větrníky a pět megawattový elektrolyzátor k tomu, aby vyráběl dostatek vodíku pro jeden vlak.

A kdy by třeba mohlo mít Česko svůj vlastní vodíkový vlak, který by křižoval Českou republiku.

Už jsme si povídali o vlaku, co by vyjížděl z Děčína – severní Čechy mají hned několik možností. Pak se ještě bavíme o tzv. švestkové dráze, tam by mohl být také vodíkový vlak. Na druhou stranu ale nechceme mít jenom vlaky, které by u nás jezdily, chtěli bychom mít i takové, které by se u nás vyráběly. Diskutujeme s několika výrobci možnost výroby posunovacích lokomotiv s palivovými články.

Znamená to, že by tady v Česku opravdu mohl vzniknout takovýto vlak?

Ano, ale zatím to není hotové. Co je už funkční, tak autobus od Škody Electric. Můžeme se taky bavit o Tatře, která by příští rok měla mít svůj velký nákladník, čtyřicetitunové vozidlo, které budou pohánět palivové články. Může to vypadat divně, tak těžký nákladní automobil poháněný palivovými články, ale ukazuje se, že Tatra našla velice zajímavý segment trhu. Vodík totiž může paradoxně pomáhat bateriovým technologiím. Dneska se už hodně bavíme o celkovém řetězci výroby, od těžby surovin až po výrobu baterií. Baterie se sice představují jako ekologická technologie, ale jejich výroba není zatím příliš ekologická, a tak výrobci hledají možnost, jak minimalizovat uhlíkovou stopu. Jedna z věcí, kde toho dosáhnout jde, je těžba surovin. A tam právě potřebují vozidla, která mají minimální uhlíkovou stopu.

Co brání většímu rozvoji? Laicky předpokládám, že to je především nedostatek samotných plnicích stanic, kde bychom mohli příslušné vozy nebo vlaky plnit...

V krátkodobém horizontu samozřejmě nedostatek plnicích stanic. Baval jsem s lidmi z Hyundai a Toyoty, kteří prodávají vodíkové osobní vozy, a ti čekají na to, až tady budou nějaké plnicí stanice. Nikdo si nekoupí auto, které mu bude sedět v garáži a čekat, až někdo jiný otevře plnicí stanice. Doufejme, že se nám jich letos podaří otevřít víc. Už máme jednu veřejnou v Ostravě a teď začátkem roku by se měly otevřít tři další tady v Praze. A pak doufejme, že se celý postup budování plnicích stanic zrychlí. Nicméně největší brzdou je stále cena vodíku. My ho potřebujeme dostat na takovou úroveň, aby minimálně provoz byl srovnatelný nákladově s provozem vozidel na fosilní paliva. A proto jsme třeba uváděli příklad toho malého kompozitního autobusu, kde bychom mohli dosáhnout provozní parity dřív. Na druhou stranu, i ty informace, které máme z provozu vlaků Alstomu, jsou, že už dneska dosáhly stejné cenové parity, co se týče provozu. Samozřejmě vodíkový vlak je dražší než diesellový.

Vždy když se rozvíjí nějaká nová technologie, včetně vodíku, tak na začátku to stojí peníze. Kolik do toho rozvoje dává samotný český stát a jak si stojíme, kdybychom to porovnali s okolními zeměmi?

Peněz, které by mohly jít do té technologie, by mělo být relativně dost. A my se snažíme maximálně využívat různých existujících fondů. Každý z nich pokrývá nějakou jinou oblast pro výzkum a vývoj. Chceme používat peníze, které jsou v programu OP spravovaném ministerstvem. Třeba právě plnicí stanice se budou platit z programu ministerstva dopravy, část výroby obnovitelného vodíku by měla být pokryta z modernizačního fondu, stejně jako některé další technologie. Kraje, které patří mezi zasažené uhelnou těžbou a musí se přetřansformovat, využívají program spravedlivé transformace. A teď se snažíme ještě dostat nějaké zdroje i z národního plánu obnovy, tak abychom se mohli lépe zaměřit na vodíkové technologie. Nicméně problém je v tom, že každý z těch programů je zaměřen na nějakou jinou oblast. My hledáme i něco, co by pokrylo celý řetězec, od výroby přes distribuci až po spotřebu. Protože dneska sice máme program na nákup autobusů, máme program na podporu výstavby stanic, program na výrobu vodíku, ale ty všechny věci se musejí dělat samostatně.

Dá se tedy říct trochu konkrétně, o jaké částce se bavíme?

O miliardách korun dohromady. Na druhou stranu se ve všech těch programech snažíme dodržovat tzv. technologickou neutralitu. Já tedy nejsem schopen říct, že na vodík máme vyhrazeno tolik a tolik peněz. Celá řada peněz je určena na nízkoemisní technologie, na nízkoemisní dopravu, ale může být použita jak pro vodík, tak třeba bateriovou dopravu.

Válka na Ukrajině ukázala známou bolest Česka, a to přílišnou závislost na zemním plynu. Uvažuje se už i o přechodu na vodík. Jak složité to je? A jaká je aktuální situace, mohli bychom se tady toho někdy dočkat?

Na to není úplně jednoduchá odpověď. My se samozřejmě dlouhodobě musíme zbavit závislosti na zemním plynu obecně, krátkodobě ovšem hlavně závislosti na ruském zemním plynu. To znamená, že musíme posílit dovozy i z jiných zemí. A abych uvedl třeba konkrétní příklad, ještě před válkou jsme měli jednání na Ukrajině, protože se vytváří tzv. Central European Hydrogen Corridor pro dovoz vodíku z Ukrajiny přes Slovensko a Českou republiku až do Německa. Ten projekt je relativně dobře rozpracovaný, existuje tam už dohoda všech čtyř operátorů. To, co nám chybí, je výroba na ukrajinské straně. A to právě měl být úkol pro tento rok, ale pan Putin nám zcela zničil veškeré risk analýzy. Přece jenom soláry jsou velice křehké na to, aby se stavěly ve válečných zónách. Nicméně v tom projektu chceme pokračovat. Otevíráme diskusi i o jiných možnostech dovozu vodíku nebo vodíkových derivátů i ze vzdálených zemí, jako může být třeba Uruguay nebo Chile. Bavíme se o možnostech dovozu z Blízkého východu. A právě minulý týden jsme měli jednání s Rumunskem, Bulharskem a Tureckem, abychom otevřeli možnosti, jestli vodík nemůžeme vyrobit tady blíž v Evropské unii.

Kdy by se vodík mohl stát plnohodnotnou součástí našeho dopravního systému? Tam to asi v tuto chvíli dává největší smysl...

Využití vodíku v mobilitě je pro nás prioritou. V dopravě nejdříve dostaneme nákladovou paritu. Rozhodně ne všechna nákladní auta přejdou na vodík, ale věříme, že vodík bude hrát významnou roli. Předpokládáme, že se vodík bude používat hlavně v nákladní dopravě, v autobusové a ve vlakové. Samozřejmě velký segment budou i osobní automobily, ale většina spotřeby z našeho pohledu bude ve třech oblastech těžké dopravy. A vodík si musí vydobýt své místo, musí si najít oblast, ve které přináší výhodu, protože ho potřebujeme používat tam, kde znamená konkurenční výhodu.

Spíše se tedy bavíme o horizontu desítek než jednotek let, jak to vidíte?

Rozhodně do roku 2050 tady bude muset být významný podíl vodíkové dopravy. Náběhové křivky, které plánujeme, jsou relativně strmé. Potřebujeme postavit 20 plnicích stanic. Potřebujeme, aby několik dopravních podniků začalo využívat vodík pro autobusy. A potřebujeme dva tři huby pro vodíkové vlaky.

Poslední věc: Co chystá vaše ministerstvo pro rok 2023 právě z hlediska dalšího rozvoje vodíkových technologií?

V příštím roce chceme aktualizovat naši vodíkovou strategii. Diskutovali jsme, jestli jsme ji měli aktualizovat už v letošním roce, a nakonec jsme se rozhodli, že ne, protože ta situace byla tak turbulentní, že ať bychom napsali cokoli, nakonec by to asi bylo špatně. Doufáme, že příští rok už bude trochu stabilnější. Největší změna, kterou uděláme, je, že teď tam máme napsány odhady spotřeby, ale nepsali jsme do toho ještě, jakým způsobem vodík získáme. Teď to chceme doplnit, abychom měli vyváženou výrobu a spotřebu. A to, co nebudeme schopni vyrobit u nás, tak musíme vědět, odkud to dovezeme – měli by tam být plány jak na dovoz, tak na výrobu. A měli bychom k nim alokovat náklady, které dovoz i výroba budou vyžadovat.

Zdroj: https://www.focuson.cz/kvuli-putinovi-se-odsunul-zajimavy-vodikovy-projekt-s-ukrajinou/?utm_source=www.seznam.cz&utm_medium=sekce-z-internetu#dop_ab_variant=0&dop_source_zone_name=hpfeed.sznhp.box

Solární reaktor přeměňuje CO₂ i plastový odpad na užitečné produkty

Plastový odpad a skleníkové plyny jsou dva největší ekologické problémy, kterým dnes svět čelí. Na to se zaměřují vědci z Cambridge, kteří vyvinuli systém, který dokáže přeměnit plastový odpad a skleníkové plyny na udržitelná paliva a další cenné produkty – a to pouze s využitím energie ze Slunce.

Navrhli první reaktor, který si dokáže poradit s oběma znečišťujícími látkami najednou. Zařízení se skládá ze dvou oddělených komor – jedné pro plast a druhé pro oxid uhličitý. K tomu využívá světelný absorbér na bázi perovskitu – slibné alternativy křemíku pro solární články příští generace.

„Obecně přeměna CO₂ vyžaduje velké množství energie, ale v našem systému na něj v podstatě jen posvítíte a on začne přeměňovat škodlivé produkty na něco užitečného,“ řekl Dr. Motiar Rahaman, spoluautor studie. „Před tímto systémem jsme neměli nic, co by dokázalo selektivně a efektivně vyrábět vysoce hodnotné produkty.“

Při testech tým prokázal, že reaktor může účinně pracovat za normálních teplotních a tlakových podmínek a využívat k výrobě energie pouze sluneční světlo. Katalyzátor ze slitiny mědi a palladia dokázal přeměnit plastové PET lahve na kyselinu glykolovou, chemickou látku používanou v kosmetickém průmyslu. Oxid uhličitý byl přeměněn na oxid uhelnatý pomocí sloučeniny kobaltu, syngas (vodík a oxid uhelnatý) pomocí slitiny mědi a india a mravenčan pomocí specifického enzymu.

A co víc, reaktor pracuje velmi efektivně. Reaktor vyvinutý v Cambridge produkoval tyto produkty rychlostí, která je rovněž mnohem vyšší než u běžných fotokatalytických procesů redukce CO₂. Tým uvádí, že jeho výrobní rychlost je až stokrát vyšší než u zařízení využívajících jiné katalyzátory poháněné sluneční energií. Následujícím krokem je další vývoj reaktoru v průběhu příštích pěti let, aby bylo možné vyrábět složitější molekuly.

Zdroj: https://www.volty.cz/2023/01/12/solarni-reaktor-premenuje-co2-i-plastovy-odpad-na-uzitecne-produkty/?utm_source=www.seznam.cz&utm_medium=sekce-z-internetu#dop_ab_variant=0&dop_source_zone_name=hpfeed.sznhp.box

Zpracoval: Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D.

Ze života škol

XXIX. International Scientific Conference IRON AND STEELMAKING „Modern Metallurgy“

Ve dnech 21. – 22. 09. 2022 se v prostorech Kampusu Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava uskutečnil již 29. ročník tradiční mezinárodní vědecké konference **IRON AND STEELMAKING „Modern Metallurgy“**, na jejíž organizaci se pravidelně střídají Katedra metalurgických technologií, Fakulta materiálů-technologické, Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, Politechnika Śląska, Katedra metalurgii i recyklingu a Technická univerzita v Košiciach, Fakulta materiálů, metalurgie a recyklácie, Ústav metalurgie. Hlavním organizátorem a garantem letošního ročníku byla za finanční podpory projektu Dlouhodobá mezisektorová spolupráce pro ITI Katedra metalurgických technologií pod vedením prof. Ing. Markéty Tkadlečkové, Ph.D. Poděkování patří všem členům katedry, kteří i při plnění běžných pracovních úkolů spojených s výukou a řešením výzkumných úkolů úspěšně zvládli i organizaci konference.

Program zahájila úvodním slovem děkanka Fakulty materiálů-technologické, VŠB-TUO prof. Ing. Kamila Janovská, Ph.D., kterou na konferenci doprovodila proděkanka pro studium doc. Ing. Kateřina Skotnicová, Ph.D. V čestném předsednictvu zasedli prof. Ing. Karel Michalek, CSc. z VŠB-TUO, doc. Ing. Iveta Vasková, PhD. z TU Košice a dr. hab. inž. Anna Konstanciak z Akademia im. Jakuba z Paradyża.



Konference se zúčastnilo 66 registrovaných účastníků. Potěšující je, že se akce zúčastnila i řada mladých vědecko-výzkumných pracovníků z univerzit, výzkumných organizací i nová generace technických pracovníků významných průmyslových partnerů a ostatních tradičních partnerů z oboru metalurgie železa a oceli. Konference umožnila odbornou diskuzi mezi zástupci metalurgické akademické obce, průmyslových podniků a výzkumných institucí.

V odborné sekci bylo předneseno celkem 12 příspěvků v češtině, polštině, slovenštině i angličtině. Odborné jednání bylo zaměřeno na otázky z oblasti teorie a technologie výroby a zpracování surového železa a oceli; numerické, fyzikální a termochemické modelování metalurgických procesů; odlévání oceli a slitin, nezelezné a nekovové materiály; ekologické aspekty výroby kovů a energetické přeměny v průmyslu. Konference se uskutečnila v příjemné uvolněné atmosféře, každý přednášející byl za svou statečnost odměněn potleskem. Součástí konference byla také exkurze po laboratořích kateder Fakulty materiálů-technologické, VŠB-TUO.



Rádi bychom touto cestou poděkovali partnerům konference, a to – Liberty Ostrava a.s., TŘINECKÝM ŽELEZÁRNÁM, a.s., společnosti ŽĐAS, a.s., společnosti LANEX a.s., Regionálnímu materiálově technologickému výzkumnému centru VŠB-TU Ostrava, České hutnické společnosti, z.s., Výskumno-inovačnímu a technologickému centru, n.o., Slovensko, restauraci Kovork Business centra VŠB-TUO a také partnerským univerzitám za jejich podporu a pomoc při organizování konference. Poděkování patří také všem účastníkům za jejich aktivní přístup a věcně vedené diskuse, které jen podtrhly význam tohoto již tradičního setkání odborníků z oblasti výroby a zpracování železa a oceli.

Za svůj dlouhodobý přínos v oblasti modelování metalurgických procesů obdržel čestné uznání prof. Ing. Karel Michalek, CSc. Za rozvoj spolupráce mezi TŽ, a.s. a VŠB-TU Ostrava byla čestná uznání předána panu Ing. Jiří Cupkovi, Ph.D., Ing. Jiřímu Cibulkovi, Ph.D., Ing. Tomáši Huczalovi, Ph.D. a Ing. Davidu Bockovi, Ph.D. Za rozvoj spolupráce mezi Liberty Ostrava a.s. a FMT byl čestným uznáním oceněn Dr. Ing. Ladislav Válek. Čestná uznání za dlouhodobý rozvoj spolupráce mezi ŽĐAS a.s. a FMT byli oceněni Ing. Martin Balcar, Ph.D. a Ing. Pavel Fila, Ph.D. Mezinárodní konference IRON AND STEELMAKING 2022 i ve svém 29. ročníku splnila po všech stránkách představy účastníků i záměry pořadatelů. Přejeme dalším pořadatelům mnoho sil při přípravě a realizaci bezpočtu dalších úspěšných ročníků této významné mezinárodní konference.

*prof. Ing. Markéta Tkadlečková, Ph.D.
Katedra metalurgických technologií, FMT, VŠB-TUO*



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Aktuality v hutnictví

Hut' spouští do sítě první dvě fotovoltaické elektrárny

trz.cz, tisková zpráva 23. 11. 2022

Třinecké železářny spolu s dceřinou společností Energetika Třinec budou od prosince 2022 vyrábět elektrickou energii ze slunce ve dvou fotovoltaických elektrárnách.

První pokryla plochu odpovídající zhruba polovině fotbalového hřiště na hale v areálu hutě. Druhá jde do chodu v těchto dnech na hale odloučeného provozu Tažírna oceli ve Starém Městě na Uherskohradištsku.

Třinecká elektrárna s instalovaným výkonem 350 kWp, což za ideálních podmínek odpovídá roční výrobě přesahující 330 000 kWh, bude sluneční energii zachycovat na 760 panelů umístěných na střeše rozměru 3333 m². Investice firmu vyšla na 12 milionů korun, bezmála 3 miliony pokryje dotace ministerstva financí.

„Zelená energie z našich solárních panelů by v Třinci měla pokrýt více než polovinu spotřeby elektřiny pro výrobu horké vody pro vytápění,“ upřesňuje ředitel Energetiky Třinec. Energetika Třinec zajišťuje vytápění pro zhruba 9 000 domácností, pro školy, nemocnice a další zařízení. Jde o teplo vyráběné z kombinované výroby elektřiny a tepla, kde část paliva pochází z výroby oceli.

Obdobně bude sloužit energie vyrobená ze slunce v areálu odloučeného provozu ve Starém Městě. Hala by měla v ideálním případě energii ze slunečního záření v předpokládaném objemu 230 000 kWh ročně využít pro napájení pomocných zařízení. Přebytky vyrobené elektrické energie je možno posílat do sítě.

V Tažírně oceli fotovoltaické panely pokryly 2500m² plochy střechy nové výrobní haly, kde jsou umístěny nové návazné technologie loupání a broušení. Výše investice nepřesáhla šest milionů korun, dotace pokryla náklady ve výši dvou milionů.

Není to jediný zdroj zelené energie, kterou hut' pro snížení uhlíkové stopy využívá. Už od roku 2020 nakupuje energii z větrných, vodních či solárních elektráren pro osvětlení i provoz klimatizací veškerých administrativních budov v Třineckých železárnách. Stejně tak je na zelenou energii celoročně provozována chemická úprava vody. Na kompenzaci emisí CO₂ obě

firmy pracují i v dalších oblastech, část z nich cílí na oblast energetiky. Při výrobě elektřiny například firma Energetika Třinec nahradila část paliva biomasou.

V TŘINECKÝCH ŽELEZÁRNÁCH zprovoznili automatickou linku pro úpravu ocelových tyčí

trz.cz, tisková zpráva 05. 12. 2022

S přesností na setiny milimetru a bez povrchových vad vyjíždí z nové loupací linky Třineckých železáren ocelové tyče průměru 30 až 80 milimetrů. Firma ji do zkušebního provozu uvedla v pondělí 5. prosince 2022. Jde o moderní plně automatickou linku, jejíž stavbu hut' zahájila v loňském roce. Investice přesáhla 700 milionů korun.

Ocelové tyče prochází automatizovanou kontrolou jakosti materiálu pomocí online rentgenového fluorescenčního spektrometru. Automatizovaný je také celý výstupní úsek, v němž dochází k vázání ocelových tyčí do svazků, konzervaci a balení. Její součástí je ekologické zpracování odpadních ocelových třísek, které je na místě drtí a následně briketuje pro další využití.

Nová loupací linka má kapacitu 90 kilotun ročně. Její zprovoznění zvýšilo celkovou kapacitu loupáných tyčí v Třinci na 150 kilotun za rok, což upevní postavení firmy na trhu. Zákazníci mají u loupáných tyčí jistotu, že splní přísné rozměrové tolerance na setiny milimetru a jsou zbaveny veškerých povrchových vad. Produkty směřují zejména do automobilového průmyslu, vyrábí se z nich ložiska, hřídele, ale i závitové tyče do větrných elektráren. Uplatnění nachází rovněž ve šroubárenství a v kovárnách.

Na lince v celé hale velikosti 6600 m² pracuje 20 provozních zaměstnanců včetně expedice, údržby a IT. Ti jsou během jedné směny schopni vyrobit až 90 tun materiálu.

Jde již o druhou technologii v Třineckých železárnách, která zvyšuje přidanou hodnotu produkce ocelových tyčí kruhového průměru. První zahájila provoz v roce 2014. Tyčová a profilová ocel je druhým nejprodávanějším produktem největší české hutní firmy. Z celkového objemu výroby loňského roku 2400 kilotun představovala tyčová a profilová ocel bezmála 540 kilotun.

TECHNICKÉ PLYNY A APLIKACE PRO METALURGICKÉ PROCESY

- ✓ hořáková technika
- ✓ regulační a ovládací systémy
- ✓ technické plyny a hardware
- ✓ zvýšení produktivity
- ✓ zlepšení kvality výrobků
- ✓ snížení spotřeby paliva a emisí



WWW.MESSER.CZ

MESSER 
Gases for Life

Společnost BRAINTRAST, s.r.o. byla založena v roce 2000. Nabízíme provádění služeb v oblasti průmyslové automatizace. Obsahem těchto služeb je návrh a realizace projektů MaR a ASŘ, odborné poradenství, dodávky komponent průmyslové automatizace, průmyslové IT včetně periférií, zhotovení aplikačního software pro PLC a vizualizaci technologických procesů. Dále provádíme realizaci kamerových a ESZ systémů, realizaci technologických, počítačových a bezdrátových sítí. Provádíme rovněž služby v oblasti výpočetní techniky, tj. dodávky a servis IT, periférií a digitální techniky, poskytování systémové podpory, tvorbu a servis webových stránek. Na dodané produkty a služby poskytujeme záruční i pozáruční servis.

Jedním z hlavních cílů společnosti je neustálé zvyšování kvality poskytovaných služeb zákazníkům. Pro podporu tohoto cíle bylo zavedení systému řízení jakosti dle norem řady ISO 9001, který firma získala v roce 2001.

Nabízíme služby, které jsou navrženy na míru aktuálním potřebám zákazníků, na vysoké technické úrovni a s vysokým zákaznickým servisem.

DODÁVKY

Odborné poradenství v oblasti průmyslové automatizace,
návrh a pracování projektové dokumentace projektů ELEKTRO, MaR a ASŘ,
realizace projektů, dodávka komponent, výroba a montáž rozvaděčů elektro a ASŘ,
realizace technologických, počítačových a bezdrátových sítí,
realizace kamerových a ESZ systémů.

SOFTWARE

Návrh a realizace řízení technologických procesů,
tvorba aplikačního SW pro PLC a HMI aplikace, včetně odladění a uvedení do provozu.

VÝPOČETNÍ TECHNIKA

Dodávky a servis IT včetně periférií a digitální techniky,
poskytování systémové podpory, tvorba a servis webových stránek.

SERVIS A SLUŽBY

Údržba a opravy MaR a ASŘ včetně pohotovostní služby,
provádění výchozích a pravidelných elektrorevizí dle ČSN,
provádění kalibrací měřicích okruhů,
oprava regulátorů Brown Boveri a ČKD pro EOC (elektrické obloukové pece),
výroba a repase šoupátek pro EOC (elektrické obloukové pece).

BRAINTRAST, s.r.o., Frýdecká 488, 739 61 Třinec

Provozovna: Průmyslová 1006 (areál Třineckých železáren, a.s.), 739 61 Třinec

Kontakt: tel.: +420 558 535 191, +420 602 785 114, e-mail: info@braintrast.cz

<http://braintrast.cz/>