



SBORNÍK KONFERENCE

38. ročník konference teorie a praxe výroby a zpracování oceli

25. - 26. dubna 2024 Wellness resort Energetic**** Rožnov pod Radhoštěm, Česká republika



VŠB TECHNICKÁ |||| UNIVERZITA OSTRAVA FAKULTA MATERIÁLOVĚ TECHNOLOGICKÁ

TANGER, spol. s r.o. TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a. s. VŠB – Technická univerzita Ostrava SPONZOŘI A VYSTAVOVATELÉ







TANGER spol. s r.o.

TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a. s.

VŠB-Technická univerzita Ostrava, FMT

SBORNÍK KONFERENCE



38. ročník konference teorie a praxe výroby a zpracování oceli

25. - 26. dubna 2024

Wellness Resort Energetic, Rožnov pod Radhoštěm, Česká republika

© 2024 TANGER spol. s r.o. ISBN 978-80-88365-16-7

OCELÁŘI 2024

Sborník konference, 25. 4. - 26. 4. 2024, Rožnov pod Radhoštěm, Česká republika

Kolektiv autorů

Vydal:	TANGER, spol. s r.o., Keltičkova 62, 710 00 Slezská Ostrava, Česká republika
Vydání:	první, 2024
Tisk:	MORAVAPRESS s.r.o., Cihelní 3356/72, 702 00 Ostrava, Česká republika
Počet stran:	120

OBSAH

OBĚHOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ – PODPŮRNÝ NÁSTROJ PRO ZAJIŠTĚNÍ UDRŽITELNÉHO ROZVOJE
VLČEK Jozef
SMĚRY EVROPSKÉHO HUTNICTVÍ K "ZELENÉ OCELI"
PINDOR Jaroslav
185 LET OD ZALOŽENÍ TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN
CUPEK Jiří, MACKOVÁ JURÁSKOVÁ Petra17
STUDIUM TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ OCELÍ A STRUSEK PŘI ZPRACOVÁNÍ TECHNOLOGIÍ ESR
WALEK Josef, ODEHNALOVÁ Adéla, SNIEGOŇ Michal, CUPEK Jiří, CHUDOBOVÁ Lucie, VRÁNA František, FILA Pavel, BALCAR Martin
DANIELI INTELLIGENT PLANT: AN INNOVATIVE APPROACH TO PLANT AND PROCESS SUPERVISION
OMETTO Marco, PLAZZOGNA Enrico, SOCHOR Milan
FORMATION AND FLOW OF GAS BUBBLES IN LIQUID METAL
SATERNUS Mariola, MERDER Tomasz, PIEPRZYCA Jacek
MOŽNOSTI PYROMETALURGICKÉHO SPRACOVANIA EOP ÚLETU S PRÍDAVKOM CAO
VINDT Tomáš, ORÁČ Dušan, MARUŠKINOVÁ Gréta, BERAXA Pavol41
DANIELI DIGIMELTER® FOR BF TECHNOLOGY TRANSITION - THE VOESTALPINE STAHL DONAWITZ PROJECT
STADLER Werner, SOCHOR Milan
SIMULATION AND PERFORMANCE TEST RESULTS FOR ELECTROMAGNETIC STIRRING TECHNOLOGY ON 450T CONSTEEL [®] FURNACE
TENG Lidong, YANG Hongliang, MEHRABAN Zaeim, DRUZHKO Alexander, PINDUR Tomas51
PŘÍNOS KORELATIVNÍ MIKROSKOPIE PRO CHARAKTERIZACI MIKROSTRUKTURY OCELÍ
MIKMEKOVÁ Šárka, JOZEFOVIČ Patrik, AMBROŽ Ondřej, ČERMÁK Jan, LISZTWANOVÁ Zuzana, CIBULKA Jiří, HUCZALA Tomáš, ZAWADA Ondřej, TUROŇ Rostislav59
EXPERIMENTAL EQUIPMENTS OF NEUTRON PHYSICS LABORATORY FOR TESTING OF METALIC SAMPLES
MIKULA Pavol, STRUNZ Pavel
ZKUŠENOSTI Z POUŽITÍ ALITOVANÝCH ELEKTROD NA PÁNVOVÉ PECI
VRÁNA František, ODEHNALOVÁ Adéla, FILA Pavel, BALCAR Martin

STANOVENÍ AKTUÁLNÍCH MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ NÁDOBY KONVERTORU POMOCÍ METODY S	РТ
KANDER Jan	68
VYUŽITÍ POKROČILÝCH NUMERICKÝCH SIMULACÍ PRO OPTIMALIZACI PLYNULÉHO LITÍ OCELI	
TKADLEČKOVÁ, M., CIBULKA, J., HUCZALA, T., LASOTA, M., CUPEK, J., KOTAS, P., JELÍNEK, D	75
UŽITÍ NUMERICKÝCH VÝPOČTŮ PŘI VÝVOJI HLADINOMĚRŮ	
KUPCZAK Marek	82
BADANIA MODELOWE KSZTAŁTKI GAZOPRZEPUSZCZALNEJ O NOWEJ KONSTRUKCJI	
PIEPRZYCA Jacek, MERDER Tomasz, WENDE Robert, WITEK Jerzy, SATERNUS Mariola	89
NOWE ROZWIĄZANIE KONSTRUKCYJNE KSZTAŁTKI GAZOPRZEPUSZCZALNEJ	
MERDER Tomasz, PIEPRZYCA Jacek, WENDE Robert, WITEK Jerzy, SATERNUS Mariola	95
NOVÁ GENERÁCIA AL₂O₃− SIC – C STAVÍV SO ZVÝŠENOU ODOLNOSŤOU VOČI KORÓZII TROSKOU V POROVNANÍ S KONVENČNÝMI PÁLENÝMI STAVIVAMI PRE SPRACOVANIE ŽELEZA	
CHUDÍKOVÁ D., MIŠANEKOVÁ V., HIRJAK R., KAMENSKÝ R., BABA M., PIROŠKO M., MAŠLEJOVÁ A, DEMČÁKOVÁ M	102
CEMENTÁCIA VÝLUHOV Z LÚHOVANIA EOP ÚLETOV A PRÍPRAVA KONEČNÉHO PRODUKTU	
TAKÁČOVÁ Zita, PIROŠKOVÁ Jana, MIŠKUFOVÁ Andrea	. 110
PRAKTICKÉ DOPADY ENVIRONMENTÁLNÍ SLOŽKY ESG REPORTINGU NA PROVOZ ZPRACOVÁNÍ OCELI	
PYTLOUN Martin	117



OBĚHOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ – PODPŮRNÝ NÁSTROJ PRO ZAJIŠTĚNÍ UDRŽITELNÉHO ROZVOJE

VLČEK Jozef

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

Abstrakt

Česká republika, podobně jako další země Evropské unie, disponují pouze s omezenými surovinovými zdroji. Dostupnost přírodních surovin se stává z geopolitického hlediska obtížnější. Na straně druhé rozvoj společnosti vytváří tlak na růst spotřeby. Nutnost hledat opatření zmírňující potřebu přírodních zdrojů je tak tudíž zřejmá. Představený problém je možno řešit implementací zásad cirkulární ekonomiky. Nezbytnost prodlužovat životní cyklus zdrojů je zároveň aktuálním tématem na evropské úrovni. V krátké budoucnosti budou firmy v této oblasti čelit zesíleným výzvám. Předložený příspěvek se věnuje zásadám cirkulární ekonomiky a přináší stručný přehled plánů, kterými chce stát podpořit implementaci oběhového hospodářství do praktického fungování společnosti.

Klíčová slova: Oběhové hospodářství, cirkulární ekonomika, udržitelný rozvoj.

1. ÚVOD

Vývoj společnosti zřetelně směřuje k postupnému odpoutávání se od konvenčních způsobů výroby, k výrobě s vysokou mírou automatizace a tím samozřejmě digitalizace, která je z tohoto pohledu klíčová. Výrobní procesy splňující kritéria Průmyslu 4.0 se stávají součástí nově budovaných technologií, nebo alespoň součástí nově připravovaných investičních záměrů. Kromě snahy o zvýšení efektivity výroby a snížení podílů lidské práce na její realizaci, jsou výrobní společnosti nucené do svých plánů zároveň komponovat požadavky plynoucí z cílů, které usilují o snížení environmentální zátěže ze své činnosti. Změny a nové výzvy přicházejí v této oblasti jsou velmi rychlé. Zatímco se trendy již uvedené iniciativy tzv. 4. průmyslové revoluce nestihly aplikovat do všech odvětví, a to v podobě, která byla známá na počátku nového milénia, kdy tento fenomén vznikal, tak společnost je postavená před výzvu novou, a tou je umělá inteligence. Její reálné dopady v současné době neumíme zcela predikovat.

Podstata a rozsah modernizačních opatření, ale také běžné rozhodovací procesy v řízení firmy nevychází pouze z pohledu upevnění tržního postavení společnosti, také musí respektovat legislativní požadavky. V Evropské unii je aktivita vydávání předpisů různého charakteru pověstná a je namístě vést diskuzi o reálnosti plnění předkládaných požadavků a o efektivitě, kterou tyto požadavky přináší. Téma je to symbolické právě v dnešních dnech, kdy si připomínáme 20. výročí členství v této organizaci.

Velkým tématem EU je udržitelnost jejího rozvoje. Nejedná se o novinku posledních let, která by měla být nevyhnutelně spojovaná s hlavním dokumentem, který nastoluje rámec pro nové směřování v environmentální oblasti, tj. Zelená dohodou pro Evropu. Pojem udržitelnost se v ekologických učebnicích vyskytuje již od minulého století. Například v roce 1980 byla přijatá Světová strategie ochrany přírody, kde jeden z její cílů směřuje k zajištění trvalého způsobu využívání ekosystémů [1].

Je důležité připomenout, že definice udržitelného rozvoje, i z pohledu dnešních norem, uvádí, že snahou je zlepšení materiální úrovně obyvatelstva, ale samozřejmě neméně důležité je, že musí být zachovaná kapacita ekosystémů i pro příští generace a zároveň je podstatné, že rozvoj musí být dostupný všem skupinám obyvatelstva. Je velmi potřebné hledat rovnováhu mezi ekonomickým pokrokem, ochranou životního prostředí



a sociálním aspektem. Ekonomický pokrok musí stát na pilířích environmentální udržitelnosti a společenské koheze.

Důležitost věnovat systematickou pozornost odpovědnému a trvalému růstu je zřejmá. Možno poukázat na globální nárůst počtu obyvatel a zároveň globální růst životní úrovně, která má od počátku letopočtu zrychlující tendenci, nebo také je možno poukázat na globální růst výroby železa a oceli. Je obtížené pří růstu populace zajistit i růst její životní úrovně, a přitom naplňovat udržitelnost rozvoje, tj. zachovat funkčnost ekosystémů a sociální smír. Je evidentní, že v této oblasti nelze spoléhat na autoregulační schopnost tržního mechanismu, ale je potřebné přijímat akceptovatelný konsenzus. Zde je dobrou zprávu, že evropská společnost vnímá, že její pokrok je možno dosáhnout zvyšováním konkurenceschopnosti, tj. podporou soutěživosti.

Existuje mnoho cest, jak udržitelnost zajišťovat. Jednou ze silných součástí aktivit realizovaných v tomto zájmu je tzv. oběhové hospodářství. Potřebu jeho naplňování je nutno vnímat nejen jako reakci na nátlakový instrument ze strany státu, ale zároveň jako prostředek pro projev společenské odpovědnosti a v neposlední řadě je potřebné v aktivitách oběhového hospodářství hledat ekonomické příležitosti.

Výše uvedené skutečnosti, tj. proces digitalizace a nová environmentální politika staví surovinové zdroje a způsob nakládání s nimi do nového světla a atributy cirkulární ekonomiky se postupně dostávají do fungování firem.

2. OBĚHOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ

Oběhové hospodářství nebo také cirkulární ekonomika představuje hospodářský systém, který zachovává hodnoty výrobků, materiálů a dalších zdrojů po co nejdelší dobu a usiluje o co nejvyšší účinnost využívaní zdrojů v rámci výroby a spotřeby, čímž vytváří tlak na snižování množství vznikajících odpadů. Pokud odpady vznikají, tak oběhové hospodářství usiluje o jejich navrácení do výrobního cyklu a usiluje o snížení jejich negativních dopadů na životní prostředí. Uvádí se, že oběhové hospodářství mění lineární model nakládání s materiály – vyrobit, použít a vyhodit na model kruhově uzavřený – vyrobit, použít, vyřadit a opětovně využít.

Oběhové hospodářství nezasahuje pouze do oblasti nakládání s odpady, ale má přesah na širší okruh činnosti a usiluje o co nejnižší spotřebu přírodních zdrojů. Představuje řízení výroby, spotřeby, užívání nejenom produktů, ale i služeb. Naplňování oběhového hospodářství je realizováno například prodlužováním životního cyklu výrobků, možností recyklace, možností opravy výrobků, podporou jejich opětovného používání nebo pronajímání a sdílení. Adaptace těchto zásad v konečném důsledku snižuje množství odpadů.

Uplatňování principů oběhového hospodářství je specifické v případě nedostatkových surovin. Evropská unie definuje kritické a strategické suroviny neenergetické povahy. Za kritické suroviny považuje ty, které jsou nepostradatelné pro rozvoj společnosti, a kterých dodávky mohou být snadno narušitelné, zejména z důvodu jejich dovozu. Tyto suroviny jsou významné zejména pro rozvoj nových technologií jako je digitalizace, elektromobilita nebo jsou nepostradatelné pro výrobu zařízení pro získávaní energie z obnovitelných zdrojů, výrobu polovodičů, ale také pro zajištění dalších potřeb, kde lze zařadit výrobu hnojiv a v neposlední řadě tyto suroviny jsou důležité pro obranný průmysl a kosmonautiku. Strategické jsou suroviny, které mají předpoklad silného růstu spotřeby a opět se zároveň jedná o suroviny, u nichž se dodávky mohou snadno omezit. Seznam strategických a kritických surovin je obsažen v dokumentu [2]. Pro strategické suroviny platí, že jejich těžba by měla být minimálně z 10 % uskutečňovaná na území EU, zároveň v EU se musí zpracovat minimálně 40 % roční spotřeby daných surovin a dovoz z jedné země nesmí překročit 65 % spotřeby. V případě těchto surovin se politika oběhového hospodářství stává jasně definovanou, kdy formulované požadavky jsou tvořeny především s ohledem na geopolitické hledisko.

Přehled změn, které společnost očekává v souvislosti se zaváděním oběhového hospodářství je zpracovaný v akčním plánu, který byl připravený zvlášť pro řešení tohoto problému [3]. Ten definuje zásady pro udržitelné výrobky (zvýšení jejich životnosti, snížení uhlíkové stopy při jejich výrobě, umožnění repasování a recyklace



použitých výrobků, zákaz likvidace nepoužitých výrobků, které nepodléhají zkáze, omezení jednorázového použití výrobků, podpora užití výrobků formou sdílení, kdy jeden výrobek může využívat více uživatelů, podpora snadné informovanosti o parametrech výrobků formou digitálních prostředků a konečně oceňování výrobků na základě jejich udržitelnosti). Tato pravidla se týkají především výrobků, pro které byl indikován významný dosah na životní prostředí, a to z pohledu jejich náročnosti výroby, nebo jejich množství které je uváděno na trh. Prozatím se jedná o elektroniku, komunikační nástroje, baterie, vozidla, plasty, textilní výrobky a nábytek. Avšak také výrobky komoditního typu jako je ocel, cement a chemikálie. Podobně se budou definovány pravidla pro služby. Samostatně je ošetřena problematika obalů (záměr snižování jejich množství, jejich snadná recyklovatelnost, podíl recyklovaných složek).

Zvláštní kapitolou akčního plánu oběhového hospodářství je posílení pozice spotřebitele. V tomto ohledu se kromě angažovanosti spotřebitele v procesu oběhového hospodářství sleduje i sociální rozměr celého systému. EU deklaruje, že snahy směřující k udržitelnosti svého rozvoje zohledňují i tento aspekt. Jeho významnost byla již diskutovaná v úvodní části tohoto článku. Důležitým prvkem v životnosti výrobků se stává právo na jejich opravu a zajištění dostupnosti náhradních dílů. Bude zaručena informovanost o výrobku ve smyslu jeho vztahu k životnímu prostředí [3].

Oběhové hospodářství vstupuje do životního cyklu výrobku již ve fází jeho výroby. Zde se předpokládá revize dokumentů BAT, tak aby byly preferovány ty technologie, které cirkulární ekonomiku podporují, například uplatněním odpadů ve výrobě [3]. V daném ohledu již více než deset let platí pravidla pro ekodesign výrobků, které se vyznačují vyšším nárokem na spotřebu energie [4]. Má být podporován jednotný systém pro auditní činnost, která prozkoumá míru zapojení výrobních společností do oběhového hospodářství a shoda se systémem bude ověřená certifikací. Samotná EU chce věnovat pozornost měřitelnosti účinnosti zaváděných opatření v oblasti oběhového hospodářství, a to na postup procesu dosažení klimatické rovnováhy, zejména se systém zaměřuje na kontrolu produkce CO₂ [3].

Politika oběhového hospodářství neopomíná potraviny, jako zdroj mnoha odpadů. Zavádí například systém opětovného využívaní vody při pěstování a výrobě potravin. V oblasti odpadů che EU do roku 2030 dosáhnout poloviční produkci nerecyklovatelného komunálního odpadu. Jedním z kroků, jak docílit vyšší míry recyklovatelnosti bude požadavek aplikovat odpadní materiály do nových produktů. Velkým tématem oběhového hospodářství je povýšení odpadu na žádanou surovinu, která nalezne uplatnění na trhu. S tímto souvisí i téma zpřísnění pravidel vývozu odpadu z EU [3]. Preferován je postup, kdy je odpad zpracovaný, nebo lépe využitý co nejblíž místu jeho vzniku.

Pro průmyslové podniky jsou významné záměry směřující k omezení používaní nebezpečných látek. Bude se vyvíjet úsilí ke snížení jejich produkce a k jejich vyřazení ze systémů, kde se tyto látky aplikují. Plánují se zpřísňovat pravidla evidence látek tzv. mimořádné obavy.

Do světel pozornosti se staví stavební průmysl a provoz budov. Stavebnictví je sektorem, který vykazuje nejvyšší produkci odpadů. V této souvislosti se očekává vyřazení stavebních materiálů z trhu, které pro životnímu prostředí přináší nadměrnou zátěž. Je potřebné podporovat znovuvyužití nefunkčních zastavěných ploch, dále zvýšit míru využití demoličního odpadu, zadávání veřejných zakázek v tomto oboru bude klást větší důraz na celý životní cyklus připravované stavby.

Je zřejmé, že v blízké době se bude přijímat řada upřesňujících dokumentů pro pravidla v oblasti oběhového hospodářství. To bude vytvářet tlak na firmy, které budou nuceny plnění těchto nových pravidel prokázat. V nedávné minulosti nebylo výjimkou, že výrobci si sami definovali environmentální normy a své výrobky vydávali za "ekologické", a to bez potřeby objektivně tuto skutečnost ověřovat. Výjimkou nebyly postupy, kdy takto prezentované informace byly záměrně zavádějící. Tento postup se nazývá "greenwashing", nebo také "green sheen". Uvedené praktiky manipulativního charakteru by se již neměly objevovat. Je připraven dokument o povinnosti pravdivého dokladování environmentálních tvrzení (Green Claims Directive). Informování v tomto smyslu se musí zakládat na vědeckých poznatcích, dále se uvádí povinnost informovat



uživatele výrobků o zásadách jeho správného používaní, a to tak, aby jeho využití minimalizovalo poškození životního prostředí [5].

Vytváří se mechanismus pro kontrolu plnění závazků spjatých s cirkulární ekonomikou. Jedná se o ESG proces (Environmental Social Governance), který dohlíží a zároveň pomáhá nastavit a plnit udržitelnost podnikání firmy v oblastech definovaných zkratkou v jeho označení. Od letošního roku platí pro vybrané podniky povinnost předkládat nefinanční reporting, který se závazně vyjadřuje i k otázkám udržitelnosti. Schopnost pozitivní prezentace firmy v těchto ukazatelích bude potřebná například pro získání veřejné podpory, nebo bankovních služeb. Spektrum firem podléhající závazku nefinančního reportingu se bude postupně rozšiřovat směrem od velkých společností k menším [6].

Povinnosti se budou týkat rovněž firem podnikajících ve výrobě železa a oceli a v dalších příbuzných oborech. Dodržovat zásady oběhového hospodářství v sektoru, který se vyznačuje masivním požadavkem na přesun a zpracování hmoty je namístě. Na jedné straně se ocelárenský průmysl může pochlubit vysokou mírou recyklace, na straně druhé je možno poukázat na vysokou energetickou náročnost odvětví. Výroba surového železa je činnost, která spotřebovává nejvíce energie ze všech sledovaných výrobních odvětví. Podle údajů Českého statistického úřadu je pro výrobu přibližně 4 mil. t surového železa potřebné zajistit 70 PJ energie [7]. Vysoká spotřeba energie v dnešním energetickém mixu přímo indikuje vysokou tvorbu CO2. Globální statistiky uvádí produkci přibližně 2 t CO₂ na výrobu jedné tuny oceli. Žel tento parametr má za období posledních 10 let stoupající tendenci. Stejně se nedaří snižovat produkci odpadů v metalurgických procesech. Hodnota materiálové výtěžnosti oceli a návazných využitelných vedlejších produktů je vůči množství produkovaných odpadů, opět za období poslední dekády, bez změny [8]. Obor metalurgie je pro udržitelnost konkurenceschopnosti EU klíčový a bude potřebné, aby dopady klimatické politiky byly pro tento sektor únosné. Prozatímní vývoj plnění zamýšlených cílů jednotlivé země EU rozděluje. Jsou země s tradičně silným environmentálním zaměřením, kterých postoje odráží vůli závazky plnit (příkladně možno uvést Rakousko, Slovinsko, Nizozemsko) a naproti tomu vystupuji státy, které vnáší oprávněné námitky vůči plánovaným aktivitám v této oblasti.

3. ZÁVĚR

S pojmem oběhové hospodářství se bude společnost v blízké budoucnosti potkávat častěji. Plnění závazků, které jsou v této oblasti očekávané přinese řadu komplikací, zvýší se administrativní a finanční zátěž na straně firem. Na straně druhé je pochopitelné, že spotřebu společnosti je vhodné moderovat, a že základní premisy cirkulární ekonomiky mají své reálné opodstatnění. Bude také záležet na znění konkrétních prováděcích předpisů, jestli nově ukládané povinnosti přinesou tížené výsledky. Pokud se podaří zajistit udržitelnost rozvoje evropské společnosti, pak je to dobrou zprávou i pro podnikající subjekty, které budou mít předpoklady pro své budoucí působení. Jistě aktivity spjaté s oběhovým hospodářství jsou novou příležitostí v rozvoji budoucího směrování firem. Úspěšnost procesu bude záležet na schopnosti nalézt zdravou rovnováhu mezi plány a způsobilostmi je realizovat.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl v rámci Institucionální podpory dlouhodobého a koncepčního rozvoje výzkumné organizace v roce 2024, kterou poskytlo Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR.

LITERATURA

- [1] SLÁDEK, Jozef, aj. Aby prežili rok 2000. Martin: Osveta, 1989. 163 s.
- [2] Nařízení Evropského parlamentu a rady, kterým se stanoví rámec pro zajištění bezpečných a udržitelných dodávek kritických surovin, č. 2023/0079(cod). Brusel: Evropská komise, 16.3.2023.



- [3] Nový akční plán pro oběhové hospodářství, č. 52020DC0098, Brusel: Evropská komise, 11.3.2020.
- [4] Směrnice Evropského parlamentu a rady o stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie, č. 2009/125/ES, 21.10.2009.
- [5] Návrh směrnice Evropského parlamentu a rady dokladování a sdělování environmentálních tvrzení. č. 2023/0085 (COD), 22.3.2023.
- [6] Směrnice Evropského parlamentu a rady o podávání zpráv podniků o udržitelnosti, č. 2022/2464, 14.12.2022.
- [7] Průmysl a energetika, energetická náročnost výroby vybraných výrobků 2018. Český statistický úřad, 2018. Dostupné z WWW: <u>https://www.czso.cz/csu/czso/energeticka-narocnost-vyroby-vybranych-vyrobku-2018</u>.
- [8] World Steel Association AISBL [on line] Search statistics archive. Dostupné z WWW: https://worldsteel.org/.



www.zdas.com



SMĚRY EVROPSKÉHO HUTNICTVÍ K "ZELENÉ OCELI"

PINDOR Jaroslav

OCELOT s.r.o., Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika, jaroslav.pindor@email.cz

Abstrakt

Europen Green Deal nutně vede k dekarbonizaci výroby oceli v budoucnu. V článku jsou shrnuty informace z dostupných zdrojů, které uvádějí, jakými směry se budou ubírat evropské hutě na cestě k transformaci při snižování uhlíkové zátěže při výrobě oceli. Závěr příspěvku shrnuje zjištěné skutečnosti - směry, které budou stěžejní při zelené transformaci.

Klíčová slova: European Green Deal, dekarbonizace výroby oceli, snižování uhlíkové zátěže, směry zelené transformace, elektrická oblouková pec, přímá redukce.

1. ÚVOD

V příspěvku jsou citovány některé evropské hutě, jejichž výroba oceli je založena na rudném pochodu. Jejich uhlíková stopa je velmi výrazná. Jsou uvedeny budoucí přístupy těchto výrobců oceli vedoucí ke snižování uhlíkové zátěže při výrobě oceli.

2. TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, A.S.

V TŘINECKÝCH ŽELEZÁRNÁCH, a.s. /1/ (dále jen TŽ) je výroba oceli založena na rudné cestě. TŽ připravují řadu opatření ke snížení uhlíkové stopy. TŽ zahájily projekt transformace, který povede k ekologicky šetrnému procesu výroby oceli. Jeho cílem je další snížení emisí skleníkových plynů vypouštěných do ovzduší. TŽ chtějí dosáhnout v roce 2031 snížení roční produkce CO2 na 0,9 na tunu vyrobené oceli (2,1 v roce 1990). Konkrétní opatření jsou uvedena níže.

2.1. Elektrická oblouková pec

Klíčovou součástí transformačního procesu je výstavba moderní elektrické obloukové pece, která bude sloužit k produkci oceli především ze šrotu. V nejbližší době se zpracuje studie pro výstavbu EOP a TŽ budou usilovat o zajištění potřebné infrastruktury, zejména připojení k elektrické síti a zajištění dodávek šrotu. Předpokládaná kapacita výroby je 2,6 mil. tun oceli při souběhu technologie jedné vysoké pece a jedné EOP. Tato technologie by měla být uvedena do provozu kolem roku 2031. Náklady budou v řádech miliard až desítek miliard korun.

2.2. Briketační linka

Připravuje se také výstavba nové bezemisní železorudné briketační linky, která nahradí ocelárenský aglomerát a část produkce vysokopecního aglomerátu. Podstatou technologie je proces výroby vysokopecní vsázky studenou cestou. Díky instalaci dojde ke snížení emisí CO2 až o 70 000 tun ročně.

2.3. Paroplynový kotel

Druhá strategická investice projektu se týká přechodu od energetického uhlí k ekologickým zdrojům energií v dceřiné společnosti Energetika Třinec, která se zabývá výrobou a distribucí energetických médií. Pro snížení emisí CO2 i ostatních emisí do ovzduší firma navrhla náhradu uhelného fluidního kotle K11 novou technologií na spalování zemního plynu. Jedná se o paroplynový cyklus (PPC1) o výkonu 62 MWe, jehož umístění plánuje v prostoru odstaveného kotle K14. Nový zdroj je složen z kompaktní plynové turbíny, která je určena pro



spalování zemního plynu s možností spoluspalování vodíku. Za turbínou je pak umístěn bubnový spalinový kotel s využitím páry pro další výrobu elektřiny a tepla. Předpokládaný termín uvedení do provozu je v roce 2027. Náklady jsou vyčísleny na více než dvě miliardy korun.

2.4. Fotovoltaika

Zdroje energií TŽ doplňuje už od roku 2023 fotovoltaická elektrárna, kterou firma instalovala na střeše výrobní haly v areálu Třineckých železáren. Její instalovaný výkon je 350 kWp. Sluneční energii zachycuje 760 panelů. Investice přesáhla 12 milionů korun, takřka 3 miliony pokryla dotace z Modernizačního fondu.

3. U.S. STEEL KOŠICE, SPOL.S R.O.

Výroba oceli v U.S. Steel Košice, spol. s r.o. /2/ (dále jen USS) je založená na rudné cestě. Na oficiálních webových stránkách nebyla nalezena konkrétní opatření ke snížení uhlíkové stopy. Byly nalezeny pouze obecné formulace.

3.1. Životní prostředí

Technologický proces hutní výroby zasahuje do všech složek životního prostředí, což vyžaduje jeho důsledný monitoring, maximální využívání zabudovaných ochranných technologií, technologickou disciplínu ve všech výrobních procesech a využívání nových poznatků pro trvalé snižování zátěže životního prostředí.

3.2. Investiční program

USS se pustila do ambiciozního investičního programu zlepšování svých technologií, které ovlivňují životní prostředí, výkonnost a kvalitu procesů.

3.3. Modernizace výrobních zařízení a environmentálních systémů

V průběhu let USS proinvestovala stovky milionů USD na modernizaci stávajících výrobních zařízení a environmentálních systémů, jakož i na budování nových zařízení. Investiční program podstatně zvýšil schopnost U. S. Steel Košice poskytovat svým zákazníkům vysokou kvalitu, výrobky a služby s přidanou hodnotou a plnit požadavky a normy v oblasti životního prostředí.

4. ARCELOR MITTAL POLAND S.A.

Ve společnosti Arcelor Mittal Poland S.A. /3/ (dále jen AMP) je výroba oceli založena na rudné cestě. Konkrétní opatření jsou uvedena níže.

4.1. Dekarbonizační strategie

Jako přední světový výrobce oceli jsme odhodláni vést naše úsilí v oblasti dekarbonizace. Skupina ArcelorMittal si dala za cíl dosáhnout do roku 2050 klimatické neutrality a do roku 2030 snížit emise o 35 % v porovnání s rokem 2018 v evropských závodech. Naše ambiciózní cíle, jejichž dosažení bude mít pozitivní dopad na stav přírodního prostředí, se odrážejí v inovativních technologiích a projektech navržených v ArcelorMittal. V evropských závodech skupiny v současnosti probíhají práce na implementaci dvou bezemisních technologií výroby oceli: Smart Carbon a DRI-EAF (Direct Reduced Iron-Electric Arc Furnance – přímá redukce železa pomocí elektrické obloukové pece). První je technologie, která předpokládá využití zpětně získaného uhlí jako náhrady za fosilní, a to díky metodě zachycování a ukládání CO2 pro opětovné použití. Přímá redukce železa je inovativní technologie využívající v první fázi zemní plyn, který má být nakonec nahrazen vodíkem jako hlavním reduktorem. To nás spolu s využitím elektrické pece poháněné čistou elektřinou přiblíží k našemu cíli.



Je však třeba poznamenat, že inovativní řešení v oblasti výroby oceli také vyžadují obrovské kapitálové výdaje, široký přístup k čisté energii a vhodný právní rámec, který je v průběhu transformačního procesu nezbytný k zajištění konkurenceschopnosti těch, kdo čelí klimatickým hrozbám. Jako přední ocelářská společnost dokonale známe možnosti našich produktů, které lze nejen vyrábět udržitelnějším způsobem, ale také se nepřímo podílet na procesu dekarbonizace, např. jako "páteř" infrastruktury pro získávání obnovitelných zdrojů energie, nemluvě o vynikajících vlastnostech oceli při recyklaci. Právě z oceli je mj. větrné farmy nebo části solárních panelů, které přispívají ke snižování globálních emisí CO2.

4.2. Responsible Steel

ArcelorMittal Poland byla jednou z mála společností, které získaly certifikát ResponsibleSteeITM. Po úspěšném auditu provedeném certifikačním orgánem DNV Poland (auditor akreditovaný organizací ResponsibleSteeITM) společnost obdržela certifikát potvrzující, že splňuje všechna kritéria obsažená ve standardu ResponsibleSteeITM.

ResponsibleSteel je nová dobrovolná iniciativa, která definovala standard pro odpovědné získávání a výrobu oceli. Audity jsou navrženy tak, aby ověřily, že činnost ocelárny splňuje soubor přesně definovaných požadavků, které auditoři ověřují nejen na základě obdržených dokumentů, ale také prostřednictvím řady rozhovorů s interními a externími zainteresovanými stranami.

5. VOEST ALPINE AG

5.1. Cesta k zelené budoucnosti

Výroba oceli ve společnost Voest Alpine AG /4/ (dále jen VA) je založená na rudné cestě. VA zvyšuje tempo snižování emisí. Greentec steel od Voestalpine je největší rakouský program ochrany klimatu. Od roku 2027 tento program sníží roční emise CO 2 Rakouska o téměř 5 %. Rok 2024 znamená začátek částečného přechodu od vysoké pece k trase elektrické obloukové pece (EAF) – jakmile se vyjasní nevyřešené problémy s financováním v Rakousku.

Dekarbonizace výroby oceli je důležitou součástí ochrany klimatu. Z tohoto důvodu dozorčí rada voestalpine v dubnu 2023 schválila dalších 1,5 miliardy EUR na přeměnu ve svých rakouských ocelářských závodech. To umožňuje zahájení výstavby v Donawitz a Linci v roce 2024. Uvedením EAF do provozu během hybridní fáze oceli Greentec by se počínaje rokem 2027 zabránilo vzniku přibližně 3 až 4 milionům tun emisí CO ₂ ročně. Snížení ročních emisí Rakouska o téměř 5 % znamená, že greentec ocel největší program ochrany klimatu v zemi.

5.2. Hybridní technologie je prvním krokem

Konkrétně postupně přecházíme z uhelné vysokopecní cesty na elektroocelářskou na zelenou elektřinu. Kromě šrotu jsou hlavními vstupními surovinami tekuté surové železo a horké briketované železo (HBI) vyráběné v zařízení přímé redukce. Tato přímá redukce je klíčovou překlenovací technologií pro dekarbonizaci výroby oceli. K přeměně železné rudy na železo se bude využívat zemní plyn místo uhlí a koksu, což snižuje emise CO₂. Tato hybridní technologie by mohla výrazně snížit emise CO₂ z výroby oceli<u>v</u> Linci a Donawitz přibližně o 30 %. Od roku 2030 plánuje voestalpine nahradit další vysokou pec v každém z míst v Linci a Donawitz.

5.3. Technologický přechod v nedohlednu

Dlouhodobě plánujeme do roku 2050 postupně zvyšovat využívání zelené elektřiny k dosažení uhlíkově neutrální výroby oceli. Již řadu let zkoumáme potřebné technologie, např. na pilotním zařízení na výrobu



zeleného vodíku v Linci. Zde probíhá výzkum výroby zeleného vodíku v průmyslovém měřítku a jeho možné aplikace v různých fázích výroby oceli.

Naši vědci v Donawitz zároveň zkoumají technologii pro přímou výrobu oceli ze železné rudy v rámci projektu "SuSteel" (Udržitelná ocel) a v dalším procesu redukce jemné rudy na vodíkové bázi (Hyfor). Jedno je ale jisté již dnes: základním předpokladem pro přechod na výrobu oceli na bázi vodíku je dostupnost dostatečného množství zelené elektřiny za komerčně reálné ceny.

5.4. Greentec steel – značka

Značka greentec steel kampaň byla navržena jako deštník, pod kterým bude komunikována tato komplexní dekarbonizační strategie pro splnění klimatických cílů EU. Spojuje všechny aktivity a inovace voestalpine vedoucí k výrobě uhlíkově neutrální oceli do roku 2050. Greentec steel je ambiciózní plán skupiny pro výrobu zelené oceli: v prvním kroku tohoto postupného přístupu bude v každém z míst v Linci a Donawitz postavena jedna elektrická oblouková pec (EAF) poháněná zelenou elektřinou. Počínaje rokem 2027 umožní dvě elektrické obloukové pece společnosti voestalpine vyrábět přibližně 2,5 milionu tun oceli se sníženým obsahem CO 2 ročně: 1,6 milionu tun v Linci a 0,85 milionu tun v Donawitz. Od roku 2030 plánuje voestalpine nahradit další vysokou pec v každém z míst v Linci a Donawitz. Abychom dosáhli cíle uhlíkové neutrality do roku 2050, aktivně zkoumáme několik nových procesů a investujeme do pilotních projektů, které demonstrují nové způsoby výroby oceli. Dalším, zvláště důležitým předpokladem pro dekarbonizaci výroby oceli je dostupnost dostatečného množství obnovitelné energie za komerčně reálné ceny. To je jediný způsob, jak mohou být technologie zítřka aplikovány skutečně konkurenceschopným způsobem.

6. LIBERTY OSTRAVA A.S.

Výroba oceli ve společnost Liberty Ostrava a.s. /5/ (dále jen LO) je realizována rudnou cestou. LO podepsala 8. července 2022 smlouvu se společností Danieli na výstavbu dvou hybridních elektrických obloukových pecí ve své ocelárně. Nejvyšší investice do ostravské huti za několik posledních desetiletí v celkové výši 8,6 miliardy korun umožní snížit do roku 2027 emise oxidu uhličitého o více než 80 procent. Majitel hutě Sanjeev Gupta také stvrdil partnerství LO a společnosti ČEZ ESCO při přechodu hutě na obnovitelné zdroje, které jsou potřebné pro výrobu zelené oceli. Nejvyšší investice za několik posledních desetiletí je zásadním krokem k tomu, aby LO dosáhla do roku 2030 uhlíkové neutrality.

Nové pece, první svého druhu v Evropě, budou mít roční výrobní kapacitu 3,5 milionu tun oceli. Huti pomohou snížit do roku 2027 celkové emise CO2 o více než 80 procent. Pece s objemem tavby 200 tun budou vybaveny inovativní a patentovanou technologií Danieli, elektronickým systémem Q-ONE pro řízení elektrického napájení pece, které snižuje nepříznivý dopad na stabilitu elektrické sítě pro efektivnější a stabilnější dodávku energie do pecí. To umožní větší flexibilitu vsázky, kdy se bude v první fázi využívat větší množství surového železa a přímo redukovaného železa (DRI / HBI) k až 100% využití šrotu ve druhé fázi projektu. Tím podnik sníží svou závislost na dovážených surovinách, především uhlí a železné rudě, a dosáhne větší míry flexibility. Nové pece by měly být uvedeny do provozu v roce 2025. Po dokončení linky zvláště vysokého napětí 400 kV do huti, která by měla být hotova v roce 2027, budou schopny ve vsázce využívat 100 % kovového šrotu.

Firmy ČEZ ESCO a LO se dohodly na Deklaraci o spolupráci při dekarbonizaci huti LO. Partneři budou identifikovat a rozvíjet obnovitelné zdroje energie a vodíkové technologie potřebné k tomu, aby se ostravská huť stala výrobcem zelené oceli. Transformační program ostravské huti GREENSTEEL, který je založený na obnovitelných zdrojích energie a spojuje zdroje a zelenou vizi předních českých energetických a ocelárenských společností, se stane významným krokem v dekarbonizaci českého ocelářství.



7. SALZGITTER AG

Druhý největší německý výrobce oceli Salzgitter AG /6/ (dále jen SA) získal téměř 1 miliardu eur vládních finančních prostředků na svůj projekt výroby oceli na bázi vodíku. Je to uvedeno ve zprávě na webu společnosti.

V rámci svého projektu SALCOS si společnost klade za cíl nainstalovat elektrolyzér o výkonu 100 MW, jednotku přímé redukce a elektrickou obloukovou pec, aby dále nahradila část tradiční vysokopecní trasy. Projekt loni v říjnu schválila Evropská komise. Dokončení první fáze projektu je plánováno na konec roku 2025.

První fáze zahrnuje asi 700 milionů eur federálního financování a 300 milionů eur od spolkové země Dolní Sasko. Vlastní, již schválený příspěvek společnosti SA je více než 1 miliarda EUR.

Podle Roberta Habka, německého ministra hospodářství a ochrany klimatu, společnost tímto ambiciózním projektem dokazuje, že pomocí moderních technologií je možné dekarbonizovat ocelářský sektor, který je v současnosti největším průmyslovým zdrojem uhlíkových emisí.

"Tento program zároveň zajistí dlouhodobou budoucnost Německa jako centra výroby oceli a zajistí velký počet pracovních míst. SA nyní může přejít do implementační fáze a realizovat tento majákový projekt Toto je rozhodující krok v transformaci na zelenou ocel," poznamenal".

Cílem SALCOS je plně přejít na nízkou produkci oceli v SA do roku 2033 ve třech etapách. První etapa projektu, která zajistí výrobu 1,9 milionu tun oceli ročně, má být dokončena do konce roku 2025, což pomůže snížit emise uhlíku o více než 2,5 milionu tun ročně.

V rámci kompletní transformace budou vybudovány dvě jednotky přímé redukce a tři elektrické obloukové pece, které postupně nahradí tři vysoké pece a konvertory. Výrobní proces založený na využití koksovatelného uhlí tak bude převeden na vodík. Očekává se snížení asi 95 % ročních emisí uhlíku – přibližně 8 milionů tun ročně.

Projekt SA je součástí snahy německého energeticky náročného průmyslu o přechod k ekologičtější výrobě, protože země se chce do roku 2045 stát uhlíkově neutrální. Ocelářský sektor představuje 30 % průmyslových emisí skleníkových plynů v Německu.

8. ŽELEZIARNE PODBREZOVÁ A.S.

V materiálu Ročná správa ŽELEZIARNE PODBREZOVÁ A.S. /7/ je uvedena informace o splnění podmínek tzv. EÚ taxonómie, která uvádí, že výroba oceli v elektrických obloukových pecích splňuje podmínky z hlediska dodržení podmínek na ochranu klimatu při výrobě oceli. Uvádíme plnou citaci.

EÚ taxonómia definuje šesť základných environmentálnych cieľov, z ktorých aspoň k jednému musí ekonomická činnosť prispievať a ostatné nesmie výrazne narúšať, aby bola definovaná ako environmentálne udržateľná. V nadväzujúcom delegovanom nariadení Komisie (EÚ) 2021/2139 z júna 2021 boli stanovené technické hodnotiace kritérií pre jednotlivé hospodárske činnosti v rámci EÚ taxonómie. Tento delegovaný akt presne definuje zoznam udržateľných činností na základe technických skríningových kritérií.

Železiarne Podbrezová a.s. uvádzajú informácie o súlade s EÚ Taxonómiou na individuálnej báze t.j. za seba, ako materskú firmu. Svojou činnosťou, v rámci NACE kódu 24.20 – Výroba rúr, rúrok, dutých profilov a súvisiaceho príslušenstva a ocele, Železiarne Podbrezová a.s. spadajú do EÚ taxonómie a podľa prílohy č. 1 delegovaného nariadenia Komisie (EÚ) 2021/2139, časť 3.9, je táto hospodárska činnosť zaradená ako prechodná. Prechodnú hospodársku činnosť definuje EÚ taxonómia ako významne prispievajúcu k zmierňovaniu zmeny klímy, ak má emisie skleníkových plynov podstatne nižšie ako priemer daného odvetvia, nebráni vývoju a zavádzaniu nízko-uhlíkových alternatív a nevedie k zakonzervovaniu aktív, ktoré sú vzhľadom na ich hospodársku životnosť v rozpore s cieľmi klimatickej neutrálnosti. Železiarne Podbrezová spĺňajú technické hodnotiace kritérium pre cieľ: Zmiernenie zmeny klímy – výroba uhlíkovej ocele v elektrických oblúkových peciach, definované v časti 3.9 b), podľa ktorého vstupný objem oceľového šrotu v pomere k vyrobenému výrobku nie je nižší ako 90 %. Spoločnosť zároveň významne nenarúšajú žiadny z ďalších environmentálnych cieľov EÚ taxonómie.



9. POMOC S DEKARBONIZACÍ. VLÁDA SCHVÁLILA MEMORANDUM

Podpořit úsilí Třineckých železáren /8/ při přechodu na udržitelný způsob výroby, který přispěje ke zvýšení její konkurenceschopnosti. To je cílem memoranda o porozumění s vládou a Moravskoslezským krajem.

"Uvědomujeme si, že proces dekarbonizace a navazující ekonomická transformace klade před český těžký průmysl velké výzvy. Proto jsem rád, že vláda schválila memorandum s Třineckými železárnami, jedním z nejvýznamnějších podniků v Moravskoslezském kraji, které znamená jasnou podporu vlády přechodu na více udržitelný způsob výroby," říká ministr průmyslu a obchodu Jozef Síkela a dodává: "Jedině díky spolupráci můžeme vytvořit nové investiční a rozvojové projekty. Tyto projekty se zaměří na modernizaci výroby, která sníží energetickou náročnost, pomůže kraji se zaměstnaností, posílí naši konkurenceschopnost a lépe ochrání životní prostředí."

Pro dekarbonizaci Třineckých železáren je klíčový transformační program GreenWerk, jehož cílem je do roku 2030 snížit emise oxidu uhličitého v Třineckých železárnách o 55 procent. Program se zaměřuje na využití zelené energie ve výrobních procesech a provozu a obsahuje zhruba 20 projektů za více než 40 miliard korun. Jde například o vybudování nové nízkoemisní pece na výrobu oceli, novou přípojku velmi vysokého napětí, automatizaci výrobních procesů, modernizaci výroby nebo zvýšení podílu obnovitelných zdrojů ve výrobě a využití dešťové vody. Tato opatření sníží emise oxidu uhličitého, optimalizují spotřebu energií a vytvoří minimálně 100 nových míst pro vysoce kvalifikované zaměstnance.

10. ZÁVĚR

Z uvedeného přehledu výrobců oceli pracujících rudnou cestou je zřejmé, že se všechny vydaly cestou převedení výroby oceli na elektrické obloukové pece. Tento přechod bude postupný a velmi náročný a bude vyžadovat mnoho změn, finančních prostředků a opatření. Aspekty charakterizující tento proces:

- postupný přechod od zpracování tekutého surového železa na výrobu oceli v elektrických obloukových pecích,
- zvýšené využití šrotu, který musí být tříděný a vsázky schopný větší nasazení drtičů šrotu,
- zvýšené využití přímo redukovatelné vsázky jako je DRI nebo HBI. Společnost MIDREX /9/ předpokládá zvýšení výroby tohoto materiálu při zvýšeném využití zemního plynu a vodíku,
- vyšší výroba a využití "zeleného vodíku" při výrobě oceli a elektrické energie,
- zachycování CO2 a jeho zpětné využití,
- zvýšená potřeba elektrické energie včetně výstavby nových přívodních tras,
- zavádění dalších zdrojů elektrické energie z obnovitelných zdrojů,
- technologické změny výrovy oceli vyvolané přechodem od výroby ze surového železa k výrobě z elektrických obloukových pecí. Např. zvýšení obsahu vodíku v oceli.

Je možno konstatovat, že z přímého ohrožení evropského hutnictví se stala velká příležitost, která přinese nové směry ve výrobě oceli včetně nových technologických postupů.

LITERATURA

- [1] <u>https://trz.cz/steel-for-green/</u>
- [2] file:///C:/Users/Jarda/Downloads/Q E En Politika 2020 sk.pdf
- [3] <u>https://poland.arcelormittal.com/</u>
- [4] https://www.voestalpine.com/blog/en/sustainability/greentec-steel/our-path-to-a-green-future/
- [5] <u>https://libertysteelgroup.com/cz/news/liberty-zahajuje-historickou-investici-do-transformace-ostravske-huti-ve-vyrobce-zelene-oceli/</u>
- [6] <u>https://gmk.center/en/news/salzgitter-received-e1-billion-in-funding-to-decarbonize-steel-production/</u>



- [7] https://www.zelpo.sk/zelpo/homezp.nsf/229F285D25A6952CC1258A380042D465/\$File/rocna-sprava-2022.pdf
- [8] https://www.ocelarskaunie.cz/pomoc-s-dekarbonizaci-vlada-schvalila-memorandum/
- [9] <u>https://www.midrex.com/tech-article/outlook-for-dri-production-and-us</u>



www.hobra.cz



185 LET OD ZALOŽENÍ TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN

CUPEK Jiří, MACKOVÁ JURÁSKOVÁ Petra

TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, 739 61 Třinec – Staré Město, Česká republika, jiri.cupek@trz.cz, petra.mackova@trz.cz

Abstrakt

Bohatá tradice průmyslové hutní výroby v Třinci sahá až do první poloviny 19. století. První vysoká pec byla zažehnuta 1. dubna 1839. Třinecké železárny si od té doby vybudovaly stabilní pozici na trhu s ocelářskými a dalšími hutními produkty s exportem do mnoha zemí celého světa. Tento příspěvek popisuje historii dlouhou 185 let.

Klíčová slova: Historie, výroba oceli

1. TĚŠÍNSKÉ STATKY BYLY ZÁKLADEM PRŮMYSLOVÉ VÝROBY ŽELEZA NA TŘINECKU

Archeologické vykopávky na těšínském hradisku svědčí o tom, že se na území Těšínska vyrábělo a zpracovávalo železo již na přelomu 8. a 9. století. Ovšem informace o prvním hutním závodě v regionu pocházejí z doby mnohem pozdější: až ze druhé poloviny 17. století. V místech dnešních Starých Hamrů existovala v letech 1638 až 1723 huť s vysokou pecí a zkujňovací výhní. Po jejím zrušení byly založeny železárny v Bašce (1723–1904), které se staly základem železářství tzv. Těšínské komory.



Obr. 1 Nejstarší obraz Třince z roku 1842

Původní vévodství Těšínské bylo až do 17. století majetkem polského roku Piastovců, později přešlo do majetku Habsburků a bylo spravováno organizačně správní jednotkou tzv. Těšínskou komorou se sídlem v Těšíně.

Marie Terezie darovala toto území věnem v roce 1776 vévodovi Albertu Saskému u příležitosti sňatku s její dcerou Marií Kristinou. V osobě vévody Alberta a jeho nástupce arcivévody Karla nalezlo Těšínské vévodství energického a prozíravého majitele, který nejenže rozšířil svůj majetek, ale položil i základ k průmyslové výrobě železa. Arcivévoda Karel zřejmě na svých těšínských statcích nikdy nebyl, ale za jeho držení založila Těšínská komora železárny v Třinci. Úředníky Těšínské komory vedly k zahájení výstavby železáren v Třinci



několik skutečností: četná naleziště železné rudy, výskyt vápence, stavebního kamene, hlíny vhodné pro pálení cihel a obrovské množství zásob dřeva v Beskydech. A také fakt, že kraj byl poměrně hustě zalidněný. Řeka Olza měla vyhovující průtok pro pohon vodních kol a splavnost pro dopravu dřeva až z údolí Lomné. Železárny byly budovány v Třinci v letech 1836–1839 a Těšínská komora vlastnila celkem šest železářských podniků na různých místech karpatského podhůří a celé rozsáhlé slezsko-haličské doméně.

2. PRŮLOMOVÝ ROK 1839

Prvním výrobním zařízením Třineckých železáren byla dřevouhelná pec, která byla slavnostně zafoukána 1. dubna 1839. Náklady na její stavbu dosáhly 271 059 tisíc zlatých vídeňské měny. První dřevouhelná pec byla

10 metrů vysoká, čtyřhranného tvaru, vybudovaná z cihel. V provozu byla od jara do podzimu, v zimě se prováděly opravy. Týdenní produkce činila 125 q až 175 q surového železa, které se v prvních letech prodávalo

k dalšímu zpracování. Zafoukáním vysoké pece v Třinci roku 1839 bylo uvedeno do provozu i 25 milířů na výrobu dřevěného uhlí, které stály v bezprostřední blízkosti pece. Dřevěné uhlí se později používalo také ve slévárně a smaltovně. První vysoká pec v Třinci týdně spotřebovala 440 centů dřevěného uhlí k výrobě asi 28 vídeňských centů železa. Na zuhelnatění milíře o objemu 16 sáhů (132 m³) bylo zapotřebí 8 až 9 dní. Výtěžnost dřevěného uhlí z kvalitního dřeva činila 65 až 68 %. Do jednoho milíře se ukládalo 70 sáhů (přibližně 280 m³) polenového dříví, tzv. "šajtoviny". Během dalších let hromady milířů ustupovaly modernějšímu zařízení.

Obr. 2 Ludwig Hohenegger

Obr. 3 Pohled od jihu na dřevouhelnou vysokou pec. Snímek z roku 1864

Prvním vrchním ředitelem byl jmenován Ludwig Hohenegger (1807 – 1864). Ve funkci zůstal až do své

smrti. Během svého působení se mu podařilo zvýšit zisk společnosti více než desetinásobně. V roce 1846 založil malou školu, ve které vyučoval geologii. Velkou zásluhu má také na realizaci košicko-bohumínské dráhy, pro kterou zpracoval první projekty.

3. ZAČÁTKY OCELÁŘSTVÍ V TŘINCI 1877 – 1909

Přestěhováním dvou Bessemerových konvertorů z Karlovy hutě do Třince a sfoukáním první tavby plávkové oceli 29. 10. 1877 se začala éra třineckého ocelářství. Rozvoj ocelářské technologie v hutích Těšínské komory se vyvíjel v té době dvěma směry. Jednalo se o výrobu jednak svářkové oceli (pudlovny), jednak plávkové oceli (Bessemerovy konvertory).

V ocelářské výrobě docházelo postupně k podstatným technologickým změnám. K Bessemerovu procesu přibyl proces Thomasův. Postupem času se však začaly tavby na konvertorech neúměrně prodlužovat. Bylo to z důvodu stále se zvyšujícího obsahu manganu v surovém železe, a to až do 4 % v důsledku zpětného používání thomasované strusky. Aby se jeho obsah snížil, muselo se pevné surové železo přetavovat v plamencové peci a teprve potom bylo sfoukáno v Thomasových konvertorech. V tom čase v ocelárně stály tři 7,5 tunové konvertory, dva pracovaly Bessemerovým a jeden Thomasovým pochodem. Výroba Thomasovy oceli však byla nákladná, a proto ji po dvou letech nahradil kombinovaný pochod Bessemer–Thomas. Ani tato technologie se však neosvědčila a po výstavbě Martinových pecí se přešlo postupně na duplexní pochod Bessemer–Martin. První martinská pec byla uvedena do provozu v roce 1887 a měla kyselou vyzdívku z dinasových kamenů a na jednu tavbu produkovala 6 tun oceli. Další pece na 12 tun, postavené v Bessemerově ocelárně, měly již zásaditou vyzdívku a jejich počet se na konci století zvýšil na pět.





Obr. 4 Výroba a skladba oceli v Třineckých železárnách v období 1878 – 1908

4. MODERNIZACE ZA DOB BÁŇSKÉ A HUTNÍ SPOLEČNOSTI DOSTALA HUŤ MEZI ŠPIČKU

Zastaralé metody řízení výroby, ostrá konkurence a nedostatek kapitálu donutilo vlastníka Těšínské komory arcivévodu Bedřicha Habsburského prodat Báňské a hutní závody pozemkovému úvěrnímu ústavu ve Vídni. Pod jeho vedením byla 1. ledna 1906 roku založena Rakouská báňská a hutní společnost. Nové vedení začalo železárny modernizovat. Zprovoznilo velkou elektrickou centrálu, díky níž mohlo zřídit mimo jiné první elektrifikované válcovny na světě. Postavení elektrického systému Illgner-Ward-Leonard k pohonu vratné válcovací tratě v Třinci patřilo tehdy mezi významné počiny v hutnictví železa vůbec. Jeho uvedení do provozu dne 28. července 1906 věnovala velkou pozornost celá světová odborná veřejnost. V období od roku 1906 do 1930 byly Třinecké železárny největším a nejlepším závodem rakouské Báňské a hutní společnosti a zároveň nejlépe organizovanými železárnami v Československu. Patřily k nejmoderněji vybaveným hutním závodům ve střední Evropě.

V roce 1908 byla definitivně zastavena výroba oceli v pudlovacích pecích a od toho roku je ocel v Třinci vyráběna po dlouhá léta jen v martinských pecích. Vznik ocelárny I na místě původní Bessemerovy ocelárny sahá do roku 1907. Postupně v ní začalo tavit ocel šest martinských pecí vytápěných generátorovým a později směsným plynem. Ocel se do roku 1924 vyráběla pouze v ocelárně I. Jejími výrobními agregáty bylo šest martinských pecí, každá o obsahu 35 tun, jedna sklopná pec o obsahu 110 tun a mísič na 300 tun surového železa. Po rekonstrukcích se kapacita každé z martinských pecí ocelárny I zvýšila na 40 tun.

V návaznosti na zvyšování produkce plochých výrobků a kvalitních vysoce uhlíkatých ocelových drátů v ostatních závodech Báňské a hutní společnosti bylo však nutné produkci oceli v Třinci zvýšit. Proto byla v roce 1925 uvedena do provozu ocelárna II. V ní byly umístěny dvě martinské pece o obsahu 35 tun, převezené do Třince z Železáren Bohumín a čtyři nově postavené martinské pece. Díky nízkému obsahu fosforu a síry v kvalitních ocelárny II se jakostí tyto druhy vyrovnaly oceli z elektrických pecí. Ocelárna II vyráběla



hlavně oceli pro železniční osy, hlubokotažné plechy, pružiny, ocelová lana, kolejnice, nářadí apod. Produkce oceli prudce rostla.

5. HOSPODÁŘSKÁ KRIZE

Důsledky hospodářské krize se v třinecké huti začaly projevovat od roku 1930. Klesala poptávka, a tím také výroba. Zároveň rostla nezaměstnanost. V letech 1931 až 1935 stály nečinně vysoké pece II a IV, v ocelárně II vyhasly pece v květnu 1933 a netavilo se v nich do konce roku 1935. I ostatní menší provozy v tomto období buďto nepracovaly vůbec, nebo jen omezeně. Hluboká recese trvala v Třineckých železárnách ještě v letech 1934 až 1935 a teprve v následujícím roce nastala nová hospodářská konjunktura. V roce 1937 dosáhla produkce hlavních třineckých výrobků původního maximálního objemu.

6. POVÁLEČNÝ RŮST

Do srpna 1945 byl obnoven provoz ve všech hlavních výrobních odděleních Třineckých železáren. I přes značné válečné škody byla již v roce 1947 překročena předválečná úroveň výroby.

Ve druhé polovině 40. let se významně změnil sortiment oceli. Podařilo se zavést výrobu dynamové oceli v martinských pecích a trafooceli v elektrických obloukových pecích. Do té doby se tyto druhy vyráběly jen v kladenských ocelárnách.

V roce 1948 byla zprovozněna vysoká pec č. 5, jejíž výstavba začala v roce 1943. Pro nístěj pece se poprvé použily uhlíkové výdusky a co do kvality vyráběného surového železa patřila mezi nejlepší pece v ČSR.

7. NOVÁ KOKSOVNA, VÁLCOVNA DRÁTU, KKO A KONTILITÍ

Nová koksovna, válcovna drátu, KKO a kontilití V letech 1960 až 1985 byly TŽ zařazeny generálním ředitelstvím Hutnictví železa v ČSSR do první desítky podniků, které exportují výrobky s nejvyšší kvalitou. K nejvýznamnějším investičním akcím Třineckých železáren v 60. letech 20. století bezesporu patří výstavba nové koksovny. První etapa zahrnovala výstavbu uhelné služby, baterií číslo XI, XII, XIII a výstavbu celé chemické části koksovny. Podstatnou změnou oproti stávajícím bateriím byl přechod na pěchovaný způsob. Objem produkce, a tím i odbytu Třineckých železáren v průběhu 60. let stoupal.

Období sedmdesátých let je významné dvěma hlavními stavbami ve válcovnách: výstavba kontidrátové tratě (válcovna D) a rekonstrukce spojité sochorové tratě. Zavádění automatizovaných řídicích systémů probíhalo paralelně s novými technologiemi. První drát zahřál trať 1. března 1973. Nová válcovna, zprovozněná v roce 1973, byla ve své době nejmodernější válcovnou československých hutí. Zahájení výroby na kontidrátové trati znamenalo zásadní obrat v technologii výroby.

V roce 1976 byla schválena výstavba kyslíkové konvertorové ocelárny v Třinci a dne 21. Prosince 1983 začal její zkušební provoz vypuštěním tavby z konvertoru číslo II. Konvertor číslo 1 vyrobil první ocel v červnu 1984. Polistopadové události roku 1989 se odrazily nejen na celostátním hospodaření. Odrazily se i na vývoji Třineckých železáren.

Jako den D označili redaktoři Třineckého hutníku v roce 1989 přesně 83. minutu před půlnocí v pátek 6. října, kdy se na čtyřech licích proudech uskutečnily první teplé zkoušky nově postaveného zařízení plynulého odlévání oceli 1.

31. března 1991 vznikla akciová společnost Třinecké železárny, která měla od 1. dubna divizní uspořádání. V roce 1995 rozhodla česká vláda o privatizaci zbývajících 50,92 procent majetku, které prostřednictvím Fondu národního majetku stále vlastnil stát. Na jeho prodej vyhlásila výběrové řízení. Svým privatizačním projektem se v něm z rozhodnutí vlády ze dne 25. října 1995 stala vítězem Moravia Steel, a.s. Třinecké železárny se tak po 50 letech staly firmou bez kapitálové účasti státu.



8. NA EKOLOGII PRACOVALI UŽ V 60. LETECH

Ekologizace provozů probíhala postupně už částečně v 60. letech. Likvidací starých výrobních zařízení a jejich nahrazením modernějšími agregáty došlo k podstatnému snížení ekologické zátěže. Právě v průběhu šedesátých let je zvláště výrazný vývoj spadu prachových částic.



Obr. 5 Vývoj emisí

Pozornost se ekologii věnovala také v 80. letech, kdy se investovalo do oprášení a ekologizaci provozů. Největší ekologické investice s významným pozitivním dopadem na životní prostředí proběhly v současnosti, kdy byly instalovány nejmodernější technologie s výkonným odsávacím zařízením a tkaninovými filtry na všech velkých výrobních zařízeních. Díky nim poklesl objem tuhých emisí stonásobně oproti roku 1980.

9. HUŤ ZA 185 LET VYROBILA PŘES 192 MILIONŮ TUN OCELI

Třinecké železárny jsou v posledních patnácti letech největším výrobcem surové oceli v České republice. Firemní strategie společnosti je orientována na zvyšování podílu dlouhých válcovaných výrobků s vyšší přidanou hodnotou a její uplatnění v budovaných výrobkových řetězcích.

Roční výroba Třineckých železáren se pohybuje zhruba na 2,5 milionů tun oceli a mezi jejich hlavní produkty patří především dlouhé válcované výrobky – válcovaný drát, tvarová ocel, speciální tyčová ocel, tažená ocel, kolejnice, široká ocel, bezešvé trubky a hutní polotovary. Třinecké železárny jsou vybaveny moderním technologickým vybavením, vysokou odborností a znalostí zaměstnanců v celém výrobně-technologickém toku.

Kvalitativně se řadí mezi přední evropské výrobce dlouhých výrobků, hlavně v oblasti výroby SBQ oceli, válcovaného drátu a tažené oceli. Vysoká kvalita vyrobených produktů a spolehlivost dodávek nachází trvalé uplatnění na evropském trhu, zejména v oblasti automobilového průmyslu, strojírenství, železničního průmyslu a stavebnictví.

Za celé své působení v historii vyrobily Třinecké železárny 192 milionů tun oceli a z ní válcovaných výrobků, které dlouhodobě nacházejí své uplatnění nejen na domácím trhu, ale i po celém světě. Každoročně putují k zákazníkům z více než 60 zemí světa produkty, označené ochrannou známkou Třineckých železáren – třemi kladívky v kruhu.





Obr. 6 Vývoj výroby oceli v Třineckých železárnách

Kdyby celé vyrobené množství oceli bylo vyválcováno do drátu průměru 5,5 mm, pak by délka drátu byla větší než jedna miliarda kilometrů. Tato délka odpovídá 7 vzdálenostem Země od Slunce nebo by vystačila na celou oběžnou dráhu Země kolem Slunce.

ZÁVĚR

Celé období 185 let existence Třineckých železáren potvrdilo um a odbornost všech zaměstnanců ve všech výrobních provozech všech ostatních odborných útvarech, které plánují, připravují vsázku, zajišťují odsun materiálů a provádějí opravy agregátů. Na základě vysoké profesní odbornosti se zvládly a vyřešily mnohé provozní problémy. Zároveň jsme s tímto potenciálem prokázali schopnosti držet krok s konkurencí, a to i v celosvětovém měřítku, kde trendem je výroba oceli s vysokými požadavky na složení a kvalitu oceli, které jsou někdy až na hranici vyrobitelnosti.

LITERATURA

[1] Interní dokumentace a archív TŽ, a.s.



STUDIUM TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ OCELÍ A STRUSEK PŘI ZPRACOVÁNÍ TECHNOLOGIÍ ESR

¹WALEK Josef, ²ODEHNALOVÁ Adéla, ¹SNIEGOŇ Michal, ¹CUPEK Jiří, ¹CHUDOBOVÁ Lucie, ²VRÁNA František, ²FILA Pavel, ²BALCAR Martin

¹Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, Katedra metalurgických technologií, 17. listopadu 15/2172, Ostrava-Poruba, ČR, josef.walek@vsb.cz.

²ŽĎAS, a.s., Strojírenská 6, Žďár nad Sázavou, ČR, <u>adela.odehnalova@zdas.cz</u>

Abstrakt

Článek se zaměřuje na porovnání termofyzikálních vlastností přetavované oceli a dostupných struskových systémů při zpracování technologií ESR (Electro Slag Remelting). Práce jsou realizovány v rámci řešení projektu TA ČR pod názvem *Optimalizace technologických parametrů elektrostruskového přetavování ocelí pro speciální použití* v součinnosti VŠB-TUO a ŽĎAS, a.s. Struskové systémy v procesu ESR plní řadu důležitých metalurgických i procesních funkcí. Mezi hlavní složky ESR strusek patří dle způsobu zpracování CaF₂, Al₂O₃ a CaO. Studium je zaměřeno na stanovení termofyzikálních vlastností přetavovaných ocelí a strusek s využitím softwaru FactSage 8.2. Zkoumanými vlastnostmi byly teplota tání rafinačních strusek a viskozita tavenin strusek při definovaném rozpětí chemického složení. Experimentální určování vlastností ocelí a strusek při procesu ESR je technicky i finančně náročné, a proto je vhodné využít různých termodynamických a simulačních softwarů, které mají uplatnění při simulaci metalurgických procesů v oblastech sekundární a terciární metalurgie.

1. TECHNOLOGIE ELEKTROSTRUSKOVÉHO PŘETAVOVÁNÍ OCELÍ

V srpnu roku 2022 bylo na Ocelárně Divize metalurgie společnosti ŽĎAS, a.s. uvedeno do provozu zařízení pro elektrostruskové přetavování (dále jen ESR – Electro Slag Remelting). Výrobcem a dodavatelem je společnost CONSARC ze skupiny Inductotherm (USA). Elektrostruskové přetavování je zavedený proces tzv. terciární metalurgie, určený pro výrobu mnoha druhů ocelí s velmi vysokými požadavky na užitné vlastnosti a provozní spolehlivost [1, 2].

Princip technologie ESR spočívá v přetavování tvářené nebo lité kovové elektrody (ocelový ingot), která se postupně odtavuje ve vodou chlazeném krystalizátoru působením roztavené přehřáté strusky. Hlavním cílem ESR procesu je dosažení vyšší čistoty a chemické homogenity přetavovaného kovového polotovaru. Průběh přetavování technologií ESR a kvalitu výsledného ingotu významně ovlivňují parametry použité strusky. Ve strusce probíhá při procesu ESR řada chemických a elektrochemických reakcí. Na strusky pro ESR technologii jsou proto kladeny vysoké požadavky nejen z pohledu chemického složení, ale také z hlediska jejich fyzikálních a fyzikálně-chemických vlastností [3, 4, 5].

Z pohledu funkce strusek pro ESR jsou pro komerčně dostupné typy strusek definovány a kontrolovány konkrétní vlastnosti. Nejdůležitějším požadavkem na strusky pro ESR je teplota tání, která musí být výrazně nižší, než je teplota tání přetavovaného kovu. Pracovní teplota strusek, což je teplota, při které probíhá proces ESR, musí být naopak vyšší než teplota tání kovu, a to přibližně o 200 až 300 °C. Strusky by měly být chemicky homogenní a neměly by obsahovat nebo následně vytvářet sloučeniny s vysokou teplotou tání, aby při tavení strusky probíhalo snadné rozpouštění všech složek obsažených ve strusce a došlo k rychlému vzniku potřebné taveniny. Strusky s nevyhovujícími parametry z pohledu teploty tání a následné tvorby taveniny by měly negativní vliv na průběh procesu tavení kovové elektrody, povrchovou kvalitu vyráběného ingotu a chemickou čistotu přetaveného kovu [6, 7, 8].



Rozměry a hmotnost přetavených ingotů jsou definovány tvarem a velikostí krystalizátorů a použitých elektrod pro přetavení. Elektrody pro přetavení je možné připravit buď kováním (nákladnější varianta) nebo standardním odléváním oceli do kokil vhodných rozměrů pro danou velikost krystalizátoru. Krystalizátory pro výrobu standardních kovářských ESR ingotů jsou kruhového průřezu s konicitou typu "A" [9, 10, 11].

Schéma zařízení ESR je znázorněno na Obr. 1. Obr. 2 uvádí foto zařízení instalovaného ve ŽĎAS, a.s.



Obr. 1 Schéma zařízení ESR



Obr. 2 Zařízení ESR (CONSARC) ve ŽĎAS, a.s.

2. EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ ESR PROCESU

Experimentální práce byly zaměřeny na určení vlastností strusek a oceli při procesu ESR s využitím softwaru FactSage 8.2. Pro výpočty struskových systémů byly definovány strusky s různými poměry základních složek v kvaternárním systému CaF₂-Al₂O₃-CaO-MgO.

Studium bylo věnováno struskám v různých poměrech základních složek. Hlavními složkami tradičních, komerčně dostupných strusek ESR, jsou obvykle fluorid vápenatý (CaF₂), oxid hlinitý (Al₂O₃), oxid vápenatý (CaO) a oxid hořečnatý (MgO). Ostatní složky, přidávané buď záměrně, nebo jako nežádoucí doprovodné sloučeniny a prvky, nebyly v rámci experimentálních výpočtů zohledňovány. Příklady chemického složení strusek z komerční nabídky firmy WACKER Chemie A. G. Německo (ESR 2052, ESR 3002 ELH) a firmy ISOMAG GmbH, Rakousko (AKF 235) jsou uvedeny v **Tab. 1**.

	ESR 2052													
CaF₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	TiO₂	FeO	H ₂ O	С	Р	S	Pb	Bi		
97	1,5	2	0	0,5	0	0,2	0,005	0,03	0,005	0,03	0,0002	0,0002		
ESR 3002 ELH														
CaF₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	TiO₂	FeO	H ₂ O	С	Р	S	Pb	Bi		
0	46	47	5	0,8	0,2	0,3	0,005	0,03	0,005	0,05	0	0		
						AKF 23	5							
CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	TiO₂	Fe ₂ O ₃	H ₂ O	С	Р	S	Pb	Bi		
48,5	19,5	26,5	3	1	0,3	0,5	0,05	0,1	0,05	0,05	0,005	0		

Tab. 1 Příklad chemického složení komerčních ESR strusek (hm. %)



2.1. Stanovení intervalu tání ESR strusek

S použitím modulu Equilib softwaru FactSage 8.2 byly vypočteny teploty solidu a likvidu strusek vytvořených jako směsi strusek ESR 2052 a ESR 3002 ELH v poměrech 2:3, 1:1 a 3:2. Směs strusek ESR 2052 a ESR 3002 ELH v poměru 2:3 tvoří komplex s obsahem 40 hm. % CaF₂, 30 hm. % Al₂O₃, 30 hm. % CaO, v poměru 1:1 komplex s obsahem 50 hm. % CaF₂, 25 hm. % Al₂O₃, 25 hm. % CaO a směs v poměru 3:2 pak komplex s obsahem 60 hm. % CaF₂, 20 hm. % Al₂O₃, 20 hm. % CaO. Vypočtené hodnoty těchto strusek byly následně porovnány s hodnotami strusky AKF 235 dle **Tab. 1**, která je aktuálně využívána v provozních podmínkách ŽĎAS, a.s. Výpočty intervalů tání strusek byly provedeny v rozmezí teplot od 1000 °C do 1450 °C v kroku 100 °C. Na **Obr. 3** jsou graficky znázorněny intervaly tání pro porovnávané ESR strusky.



Obr. 3 Rozmezí teplot tání ESR strusek

Jak je patrné z **Obr. 3**, tání strusek probíhá v určitých intervalech teplot s příslušným rostoucím podílem tekuté fáze. Z pohledu procesu ESR je významným parametrem teplota likvidu strusky a jako další podstatný parametr je interval teplot mezi solidem a likvidem. Intervaly teplot tání jsou výrazně ovlivněny chemickým složením strusky. Teploty solidu strusek byly vypočteny v intervalu 1210 až 1030 °C. Teploty likvidu se pohybovaly v rozpětí 1261 až 1419 °C. Rozpětí mezi teplotou solidu a likvidu jednotlivých strusek se pohybovalo od 124 do 299 °C. Na základě provedených výpočtů je možné konstatovat, že intervaly teplot mezi likvidem a solidem jsou pro sledované směsi významně rozdílné, což bude výrazně ovlivňovat kvalitu ingotu zejména v počáteční fázi tavení procesu ESR.

2.2. Stanovení solidu a likvidu ESR strusek pomocí kvaternárních diagramů

Pro grafické vyjádření změn teplot solidu a likvidu strusek v závislosti na chemickém složení je možné využít kvaternární diagramy. Kvaternární diagram umožňuje vyhodnocovat čtyř komponentní systémy. V případě ESR strusek se jedná o třísložkový systém hlavních oxidů CaF₂-Al₂O₃-CaO se zahrnutím vlivu dalšího oxidu s konstantním obsahem, v konkrétním případě oxidu hořečnatého (MgO). V modulu Phase Diagram byly



provedeny výpočty pro vykreslení kvaternárních diagramů struskového systému CaF₂-Al₂O₃-CaO-MgO ve zvoleném rozmezí teplot 1200 až 1800 °C.

Kvaternární diagramy struskového systému CaF2-Al2O3-CaO s konstantními obsahy MgO pro teploty 1200 až 1800 °C jsou zobrazeny na Obr. 4 až 7. Barvy křivek v diagramech vykreslují průběh izoterm pro odpovídající teplotní rozmezí zvolené stupnice. Horní teplota intervalu stupnice na úrovni 1800 °C byla zvolena s ohledem na pracovní teploty ESR strusek v reálných podmínkách, které se pohybují v rozmezí 1750 až 1800 °C. Pro technickou praxi jsou požadavky na strusky ESR spojovány především s teplotou likvidu přetavovaného materiálu. Teplota tání strusky ESR je obvykle požadována nižší cca o 100 °C pod teplotou likvidu oceli. Další zkoumání strusek proto bylo zaměřeno na rozpětí teplot 1100 až 1450°C.



Obr. 4 Kvaternární diagram CaF₂-CaO-Al₂O₃ s 3 hm. % MgO



Obr. 5 Kvaternární diagram CaF₂-CaO-Al₂O₃ s 2,5 hm. % MgO

T"C

1800 1700

1600

1500 1400

1300

1200

AI,O,



Obr. 6 Kvaternární diagram CaF₂-CaO-Al₂O₃ s 2 hm. % MgO

0.9

CaO



Z uvedených obr. 4 až 7 je zřejmé, že rostoucí koncentrace MgO v daném struskovém systému má značný vliv na posun a rozsah oblastí teplot tání pod 1400 °C a při vyšších teplotách tání není vliv MgO již významný.



Jelikož nad teploty 1450 °C jsou veškeré provozně využívané strusky plně tekuté, byly další výpočty pro vykreslení kvaternárních diagramů a studium posuvu křivek solidu a likvidu při zahrnutí vlivu MgO zaměřeny na teplotní rozsah 1100 až 1450 °C v kroku 50 °C.

Obr. 8 až **10** uvádí kvaternární diagramy struskového systému CaF₂-Al₂O₃-CaO s měnicími se obsahy MgO. Kvaternární diagramy znázorňují i teplotu tání zkoumaných strusek a koncentrace jednotlivých složek strusky zmiňuje legenda.





Obr. 8 Kvaternární diagram CaF₂-CaO-Al₂O₃ pro poměr strusek WACKER 2:3 a strusku AKF 235

Obr. 9 Kvaternární diagram CaF₂-CaO-Al₂O₃ pro poměr strusek WACKER 1:1



Obr. 10 Kvaternární diagram CaF2-CaO-Al2O3 pro poměr strusek WACKER 3:2

Z detailního studia kvaternárních diagramů struskového systému CaF₂-Al₂O₃-CaO s měnicími se obsahy MgO, uvedených na **obr. 8** až **10** vyplývá, že s klesajícím obsahem MgO se otvírá a rozšiřuje izotermická oblast pro rozsah teplot 1200 °C až 1250 °C. Změna koncentrace MgO ovlivňuje průběh izotermických hranic oblastí zejména v horní části kvaternárního diagramu, kde se nachází vyšší podíly složky CaF₂ s nejnižší teplotou tání ze tří zastoupených hlavních složek struskového systému. Nad teplotami 1400 °C má změna koncentrace MgO minimální vliv na posun izotermické hranice oblasti teplot tání.



Na **obr. 8** vykreslené body zobrazují chemické složení směsí dvou strusek WACKER v poměru 2:3 a strusku AKF 235 se stejným obsahem MgO 3 hm. %. Na **obr. 9** vykreslený bod zobrazuje chemické složení směsí dvou strusek WACKER v poměru 1:1 s obsahem MgO 2,5 hm. % a na **obr. 10** je zobrazeno chemické složení směsí dvou strusek WACKER v poměru 3:2 s obsahem MgO 2 hm. %.

V kvaternárních struskových systémech CaF₂-Al₂O₃-CaO s měnicími se obsahy MgO se všechny studované směsi strusek nacházejí v oblastech, které jsou svým chemickým složením vhodné pro použití v podmínkách ESR procesu. Významné změny chemického složení studovaných směsí strusek s dopadem na zvýšení teploty likvidu nad 1450 °C by měly negativní vliv na průběh ESR procesu.

2.3. Výpočet viskozity ESR strusek

Pro výpočet hodnot viskozity strusek byl využit modul Viscosity softwaru FactSage 8.2. Viskozita byla počítána v závislosti na teplotě pro hodnoty veškerých zastoupených složek ve struskách ESR dle **Tab. 1**. Pro proces ESR jsou klíčové pracovní teploty strusek v rozmezí 1750 až 1800 °C, proto byl výpočet viskozit zaměřen na uvedené rozpětí teplot. Vypočtené hodnoty dynamické viskozity ESR strusek uvádí **Tab. 2**.

Struska	ESR 2052 a ESR 3002 ELH											AKF 235																
Poměr	(3	2 hm. '	:3 % Mg	gO)	1:1 (2,5 hm. % MgO)				(2	gO)	1 (3 hm. % MgO)																	
Podíl složek (hm. %)	CaF₂	Са	0	Al ₂ O ₃	CaF ₂	F ₂ CaO		Al ₂ O ₃	CaF₂	Ca	O Al ₂ O ₃		CaF ₂ Ca		0	Al ₂ O ₃												
	40	3(0	30	50	2	5	25	60	20)	20	50	20	כ	30												
Teplota (°C)	1750)	1	800	1750)	1800		1800		1800		1800		1800		1800		1800		1800		1750 1800		1750			1800
Viskozita (Pa·s)	0,01	7	0,	,015	0,014	4		0,012	0,01	1	0,009		0,013	3	(0,011												

Tab. 2 Vypočtená dynamická viskozita ESR strusek

Z **Tab. 2** jsou v závislosti na teplotě patrné rozdílné hodnoty vypočtené dynamické viskozity. Dále je zřejmá závislost změny dynamické viskozity na chemickém složení ESR strusek. Z uvedených hodnot vyplývá, že při růstu teploty dochází k poklesu dynamické viskozity a obdobný vliv na změnu dynamické viskozity lze pozorovat s rostoucím obsahem fluoridu vápenatého ve strusce.

2.4. Stanovení teploty tání oceli

Protože proces ESR je velmi komplexní a závisí jak na termofyzikálních vlastnostech strusky, tak i na vlastnostech přetavovaných ocelí, byly výpočty v softwaru FactSage 8.2 zaměřeny i na stanovení teplot tání středně legované konstrukční CrNiMoV oceli, která je v reálných podmínkách Ocelárny ŽĎAS, a.s. přetavována technologií ESR. Chemické složení oceli s uvedením středních koncentrací základních legujících a doprovodných prvků je uvedeno v **Tab. 3**.

Tab. 3 Chemické složení konstrukční CrNiMoV oceli (hm. %)

С	Mn	Si	Р	S	Cr	Ni	Cu	Мо	v
0,37	0,40	0,27	0,007	0,004	1,37	3,30	0,14	0,40	0,14

Posouzení vzájemného vztahu strusky a oceli s využitím modulu Equilib bylo provedeno z pohledu teplot solidu, likvidu a intervalu tání jednotlivých složek zastoupených při procesu ESR. Výsledky uvádí **Obr. 11**.





Obr. 11 Teploty solidu a likvidu konstrukční CrNiMoV oceli

Z **Obr. 11** je zřejmé, že teplota likvidu oceli 1486 °C je výrazně vyšší než teploty dosažení 100 % tekuté fáze u studovaných ESR strusek. Rozdíly mezi teplotou likvidu oceli a teplotami likvidu strusek jsou definovány rozpětím rozdílu teplot likvidu oceli (1486 °C) a strusky s nejvyšší teplotou likvidu (1419 °C), což je 67 °C a rozdílu teplot likvidu oceli a strusky s nejnižší teplotou likvidu (1261 °C), který je na úrovni 225 °C.

Lze předpokládat, že vysoké teploty tání ESR strusek, které dosahují téměř teploty solidu přetavované oceli, a tedy malé rozdíly mezi teplotou likvidu oceli a teplotami likvidu strusek, mohou zapříčinit zhoršenou povrchovou i vnitřní kvalitu výsledného ingotu ESR. V technické praxi však bude výslednou kvalitu ingotu ovlivňovat řada dalších procesních parametrů, např. rychlost tavení a následného ohřevu strusky v počáteční fázi procesu ESR.

3. ZÁVĚR

V rámci projektu **Optimalizace technologických parametrů elektrostruskového přetavování ocelí pro speciální použití** byly zkoumány termofyzikální vlastnosti přetavovaných ocelí a strusek. Byly stanoveny teploty tání ocelí a strusek. S využitím softwaru FactSage 8.2 byly definovány ternární a kvaternární diagramy pro vybrané struskové systémy. Z kvaternárních diagramů byl patrný vliv chemického složení na teploty tání strusek a do výpočtu byl zahrnut vliv koncentrace MgO.

Dále byly vypočteny dynamické viskozity tavenin strusek pro různá chemická složení. Hodnoty vypočtené dynamické viskozity strusek byly vzájemně porovnány a byla konstatována významná závislost hodnot na teplotě.

Rozsah teoretických prací umožňuje základní představu o podmínkách průběhu procesu ESR. Termofyzikální vlastnosti ESR strusek bude dále nezbytné zkoumat i se zohledněním dalších sloučenin, např. TiO₂, SiO₂, které jsou nedílnou součástí průmyslově vyráběných strusek.



Závěry teoretických prací umožňují hledání souvislostí mezi parametry použitých materiálů a technologických procesů při zpracování na zařízení ESR a reálnými výsledky kvality vyráběných ocelí.

PODĚKOVÁNÍ

Článek vznikl za podpory projektu TQ03000386 Optimalizace technologických parametrů elektrostruskového přetavování ocelí pro speciální použití spolufinancovaného se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu SIGMA.

Článek vznikl za podpory projektu SP2024/089 Specifického výzkumu VŠB-TUO.

LITERATURA

- [1] ODEHNALOVÁ, A., FILA, P. a BALCAR, M. Hodnocení vlastností konstrukční oceli vyrobené technologií ESR. Prezentace. 59. SLÉVARENSKÉ DNY, Hotel Avanti, Brno, 7 - 8. 11. 2023
- [2] ODEHNALOVÁ, A. *Analýza procesu ESR oceli a stanovení vlastností tavných strusek.* Diplomová práce. Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, 2023
- [3] KEPKA, Miloslav. Rafinace oceli. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [4] ARH, Boštjan, Jaka BURJA a Bojan PODGORNIK. ELECTROSLAG REMELTING: A PROCESS OVERVIEW [online]. 2016 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: doi:10.17222/mit.2016.108
- [5] BING-JIE, W., YU, W., MENG-JUN, W., LEI, ZHAO., XIAO-FANG, S. Effect of electrical parameters and slag system on macrostructure of electroslag ingot [online]. Berlin: springer. 2024. vol. 21, no. 1, pp. 44 – 55. Available from (DOI): <<u>https://doi.org/10.1007/s41230-024-3064-3</u>>.
- [6] RADWITZ, S., SCHOLZ, H., FRIEDRICH, B., FRANZ, H. Process and Refining Characteristics of ESR using MgO containing Slag Systems [online]. 2015. Conference: International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting. Leoben/Germany. Available from (DOI): <<u>10.13140/RG.2.1.1506.8566</u>>.
- [7] PETRMAN, Ivo a Ivan KAŠÍK. Teorie a praxe elektrostruskového přetavování ocelí a slitin. Praha: SNTL -Nakladatelství technické literatury, 1966.
- [8] HOYLE, G. ELECTROSLAG PROCESSES: Principles and Practice. British Iron and Steel Research Association, 1983. ISBN 0-85334-164-8
- [9] SHEN-CHAO, D., HAN-JIE, GUO. The Methodology Development for Improving Energy Utilization and Reducing Fluoride Pollution of the Electroslag Remelting Process [online]. 2020. vol. 91, no. 7, pp. 1-22. Available from (DOI): < <u>https://doi.org/10.1002/srin.201900634</u>>. ISSN 1611-3683
- [10] SCHNEIDER, R., WIESINGER., GELDER, S., REITER, G. Effect of the Slag Composition on the Process Behavior, Energy Consumption, and Nonmetallic Inclusions during Electroslag Remelting [online]. NY: Wiley-VCH. 2023. vol. 94, no. 4, pp. 1-7. Available from (DOI): <<u>https://doi.org/10.1002/srin.202200483</u>>. ISSN 1611-3683
- [11] SHOU-HUI, L., JING, L., JIE, Z., CHEN-BIN, S. Effect of nitrogen on microstructure and microsegregation of martensitic stainless steel 4Cr13 produced by electroslag remelting [online]. Berlin: Springer. 2022. vol. 30, pp. 1854–1861. (DOI): <<u>https://doi.org/10.1007/s42243-022-00851-y</u>>.

DANIELI INTELLIGENT PLANT: AN INNOVATIVE APPROACH TO PLANT AND PROCESS SUPERVISION

SOCHOR Milan, ¹OMETTO Marco, ²PLAZZOGNA Enrico

¹Executive Vice President DIGI&MET and DA Research Center ²Executive Vice President, Danieli Automation

When conceiving QWR 4.0, Danieli and ABS thought it would have been the perfect moment to deploy the patent-pending "Danieli Intelligent Plant" (DIP) plant supervision concept, to:

- Support plant operator to focus, based on specific scenarios, on the correct data subset from the huge amount of structured and unstructured (e.g., video flows) data received;
- Allow operators to actively contribute to plant evolution and increase company knowhow, by recording noteworthy events during steel production;
- Have a single shared platform, where both human-driven and automatically recorded data, events and points of interest are available for further analysis, empowering analysis and improving process.

Danieli Automation Intelligent Plant adopts a human-centric approach, actively contributing to the growth of the operator managing the plant, while surrounding technologies are designed to lead them to easier target identification. The system was designed to place the operator in control, with the most sophisticated solutions operating autonomously while being ready to support them when needed.

DIP: main concepts, architecture and features

The patent-pending DIP was developed and implemented according to a holistic human, machine and system integration. to flexibly direct manufacturing processes. Managing a complex plant such as QWR 4.0—from the billets entering the furnace to the finished coils in the yard—is possible from a single pulpit and with just one operator, supported by a co-operator.

The DIP has two rooms: the control room where the operator and co-operator can actively manage the different process phases, and the decision-making room (or DIP room in ABS), where the plant manager defines, in accord with process engineers, maintenance, operations and quality, the strategy to adopt based on past and present data and event information.

The control room was designed for operators to see every part of the plant they are supervising and includes an ergonomic control desk with an Operator Assistant (OA) action device and large monitors. The monitors can show all information needed for plant supervision, such as TVCC camera flow, HMI screens, PCS screens and high-frequency data.

The control desk houses the devices for voice communication and the OA device, as well as wired emergency pushbuttons; the OA device is based on a tactile membrane where operators can issue





commands, receive useful information, set the monitor scenarios, and report a manual point of interest (POI).

The decision-making room, on the other hand, is equipped with an interactive giant monitor and a collaborative table. The interactive monitor is used by the plant manager's team to overview past and present plant events. Parts of the DIP are also the mobile wireless local control devices distributed across the shop floor, to support operators' actions requiring physical presence close to both devices and processes locations. Moreover, the shop floor operators can contribute to the DIP with either pictures or audio messages. Technologically speaking, DIP is a digitally driven cyber-physical System of Systems (SoS), characterized by an extensive IIoT applications architecture—the DIP backbone—Big Data, analytics, artificial intelligence and machine learning.

The IIoT-based architecture makes it possible to integrate wireless and wired equipment and applications into a flexible, scalable and evolutive system. Furthermore, legacy-based local hierarchy can be integrated, preserving and valorizing past investments. At the same time, digital advancements and innovative equipment can be integrated with up-to-date cybersecurity systems.

The DIP core: the intelligent Q3 Pulpit

Q3 Pulpit is designed according to ergonomic sciences, and principles of cognitive engineering were used to provide automatic online knowledge structuring, sharing and transferring. This allows operators and decision makers to create virtuous ecosystems with cooperative system support. Automatic Point Of Interests, or POI, are physical or logical events, linked to structured and unstructured data, which are collected in the data lake. Among these there are the process data and the images on TVCC cameras. All significant data sources are stored in an onpremises IIoT platform from where they can be easily retrieved. Moreover, manual POIs can be generated by operators whenever they notice new behaviors worth being signaled.

A dedicated DIP software implements



the so-called digital twin, reproducing the operating conditions around a POI. Additionally, a feature called "time machine" allows for comparison of same-family POIs, aligning those with previously-stored data sources. The purpose of this infrastructure is to build a powerful troubleshooting tool to analyze an immense combination of behaviors, to identify the reasons why they are happening and to define specific solutions: it is a system which auto-learns from multidisciplinary experience (i.e., maintenance, operation, quality). Starting from the POI concept, the most advanced DIP feature makes it easy to implement machine-learning models to predict events and related patterns belonging to different domains. The integration with dedicated intelligent packages for quality management (Q3 Premium) and energy management (Q3-DEMS) covers all possible relationships. The Pulpit then provides an environment in which every single operator or technician can count on their preset configuration to operate more comfortably, deeply personalizing screens and commands too: that is why it is called the "wearable pulpit".

CONCLUSIONS

Benefits of this technology are multi-dimensional. There is an undoubted impact on safety and simplification of process guidance, with a minimum number of operators needed and a single control pulpit. Another advantage is empowering operators' learning and know-how transfer, as well as the increased awareness on critical events along the entire plant, thanks to the intelligent TVCC systems and plant data and KPIs centralization.

Indeed, this simplification increases productivity and repeatability of process. Also, the DIP, Q3 Pulpit and all other technologies discussed facilitate the operators' work. The architecture is cybersecure by design, an unavoidable feature for a modern plant. Last, but not least, artificial intelligence and machine learning will provide additional benefits after longer deployment times at the plant. With the Danieli Intelligent Plant, ABS and Danieli designed an outstanding approach to plant supervision and process control, transforming the steel industry, or as we say, simplifying metals complexity.



www.anamet.cz



FORMATION AND FLOW OF GAS BUBBLES IN LIQUID METAL

¹SATERNUS Mariola, ¹MERDER Tomasz, ¹PIEPRZYCA Jacek

¹Silesian University of Technology, Katowice, Poland, EU, mariola.saternus@polsl.pl

Abstract

Refining the steel metal bath with argon is carried out in order to homogenize the chemical composition and temperature throughout the entire volume of liquid metal as a result of introducing mechanical mixing energy by blowing inert gas. For this reason, this element of refining plays an important technological role and requires optimization activities in the conditions of each steelworks, and model studies and simulation results are very useful for this purpose. The behaviour of gas bubbles in liquid metal and their shapes are a very important issue, widely discussed and studied. Knowledge about the mechanism of gas bubbles formation and the characteristics of the interaction parameters in the water-gas system is very helpful when analysing the process of blowing argon into liquid steel. The article presents an analysis of the shapes of gas bubbles, the mechanism of bubble formation and flow from a gas-permeable fitting, patterns of gas, flow rate, pressure and the relationship between the density of liquid and gas on the nature of the gas flow and the accompanying phenomena in the liquid.

Keywords: Metallurgy, steel, refining, argon blowing, gas bubbles formation

1. INTRODUCTION

The main tasks of secondary metallurgy include deoxidation, dephosphorization and desulfurization of the metal bath, obtaining an appropriate, uniform chemical composition and temperature of the bath adopted for the type of steel produced, obtaining the appropriate degree of the so-called metallurgical purity of steel, understood as obtaining the level of contamination with non-metallic inclusions and gas content (hydrogen and nitrogen) in accordance with the standards. Regardless of the type of bath refining operation used in a specific case (secondary metallurgy), argon refining is always used. The basic task of this refining is to homogenize the chemical composition and temperature in the entire volume of liquid metal as a result of introducing mechanical mixing energy by blowing inert gas. Argon is blowing during the refining process because chemical processes are constantly taking place in the liquid metal. For this reason, this element of refining plays an important technological role and requires optimization activities in the conditions of each steelworks, so model tests and simulation results are very useful for this purpose. To obtain the expected results in the process of blowing argon into liquid metal, it is important that the gas bubbles disperse throughout the entire volume of the ladle. Argon is introduced through gas-permeable fittings, which are usually placed at half the radius of the bottom of the ladle. Gas-permeable fittings must be characterized by high mechanical and thermal strength, appropriate gas permeability (blowing the desired amount of gas at a specific time) and the ability to produce a sufficiently large number of gas bubbles with the smallest possible dimensions.

2. FORMATION OF GAS BUBBLES IN THE PROCESS OF ARGON BLOWING

The formation of a gas bubble in the process of argon blowing into liquid metal is shown in **Fig. 1**. The formation and flow mechanism presented in this drawing assumes that the gas bubble formed, after leaving the opening of the fitting, rises up in the liquid metal layer until it reaches the metal-slag boundary and then penetrates into the upper slag layer.




Fig. 1 Behavior of the gas bubble in the process of argon blowing into liquid metal using a gas-permeable fitting [1-3]

Two types of penetration patterns are observed in the slag layer. The first pattern (left side of **Fig. 1**) assumes that the thin metal layer surrounding the front of the gas bubble is broken above the metal-slag interface. This results in the formation of many small metal droplets and tiny secondary argon bubbles ("daughter bubbles") due to the propagation of the capillary wave on the bubble. The second pattern (right side of **Fig. 1**) assumes



that the thin metal layer surrounding the gas bubble collapses after it completely penetrates the upper slag layer. Behind the argon bubble, a long strip of liquid metal forms, which then breaks up into smaller droplets. Additionally, many liquid metal droplets are created in the same way as those visible on the left side of **Fig. 1**. Each gas bubble eventually reaches the surface of the bath and then bursts, ejecting small droplets of slag [2-6].

Additionally, **Fig. 2** summarizes the most important parameters affecting the process of gas bubble formation. In the flow of gas bubbles in a liquid, many types of flow can be distinguished: bubble, cork, foam, annular [7,8]. Liquid iron solutions mainly experience bubble flows, characterized by small bubbles of equal size moving vertically with slight lateral and axial oscillations. There is virtually no coalescence and disintegration, hence there is a narrow bubble size distribution and little fluid movement. The parameters that determine the size of the bubbles formed are primarily the gas pressure, the diameter of the pores of the gas-permeable fittings, the physical properties of the liquid (density, viscosity, surface tension of steel) and the gas flow rate (argon). In the process of refining liquid steel with argon, it is important to use a low gas flow rate, i.e. such that the flow is laminar. It is important that the metal surface is not exposed to the slag, as this causes intense oxidation of the metal.



Fig. 2 The most important parameters influencing the process of gas bubble generation [4]

A very important issue, widely discussed and researched, is the behavior of gas bubbles in liquid metal and their shapes [9-11]. The gas flow rate has a significant impact on the shape of the formed gas bubbles, as shown in **Fig. 3**. Knowledge of the mechanism of gas bubble formation and the characteristics of the interaction parameters in the water-gas system is very helpful when analyzing the process of blowing argon into liquid steel. Based on dimensional analysis, it is possible to define dimensionless modules recommended for modeling fluid motion in a liquid-gas system. Therefore, it was found that the behavior of gas bubbles is characterized by three criteria numbers [12]:

- Morton number independent of bubbles size,
- Eotvos number,
- Reynolds number.





Fig. 3 Scheme of the change of dispersion level of gas bubbles generated by gas-permeable fitting in the dependence on the flow rate of gas [13]

Fig. 4 shows the areas where gas bubbles floating in the liquid phase take a specific shape depending on the physicochemical properties and hydrodynamic conditions. There are bubbles: spherical, ellipsoidal, spherical with recess, spherical bowl, bowl with torn edges and irregular. For a constant Morton number, the shape of the gas bubble changes from spherical to ellipsoidal and into the shape of a spherical bowl when its equivalent diameter increases (corresponding to the Eotvos number). Bubbles can be considered spherical when the surface tension and/or viscous forces are greater than the inertial forces. Ellipsoidal bubbles are defined as oblate spheroids (axial symmetric ellipse with respect to the minor axis). Chao [14] claims that air bubbles in the water phase retain a spherical shape up to Re = 400.



Fig. 4 Durability area of the determined shape of gas bubbles and liquid drops moving in the gaseous phase [3,14]



When the Reynolds number is greater than 400, the bubbles become flat: first ellipsoidal, then spherical bowl. Clift, Garce and Weber [14] reported that the boundary between spherical bubbles and the spherical bowl occurs at the Eotvos number Eo = 40, and Bertherat, Odievre, Allibert and Le Brun [10] confirmed this. However, differences were noted at the transition between spherical and ellipsoidal bubbles - according to Clift, Eo=0.3, and according to Bertherat, at Eo>3.

The diagram presented in **Fig. 4** refers to aqueous media, a similar diagram was developed for liquid metals, as shown in **Fig. 5**. The results of experimental tests are shown in coordinates corresponding to the dimensionless criterion numbers (Weber number and Reynolds number) along with the shape of the gas bubble and their radial distribution for the contribution of the gas phase α .

It should be clearly noted that there are significant differences between the interactions occurring in water-gas and metal-gas systems. One of the main differences is the fact that the liquid metal wets the surface of the gas-permeable fitting to a much lesser extent, which can significantly change the conditions for the detachment of gas bubbles from the edge of the fitting's outlet channel. As already mentioned, tests conducted in the water-gas system provide valuable information on the behavior of gas bubbles, but these tests must be conducted while maintaining the criteria of similarity and equality of characteristic (criterion) numbers. Research on liquid iron solutions is also increasingly carried out thanks to high-voltage X-ray fluoroscopy, which searches for mathematical correlations describing, for example, the diameter of gas bubbles or the speed of their ascent depending on the geometric parameters of the ladle or the design parameters of gas-permeable fittings.



Fig. 5 Gas bubble shape classification diagram for the liquid metal-gas system [1,15]

These parameters and their mathematical description are briefly characterized in **Table 1**, and these relationships are divided into those derived on the basis of model tests conducted in the water environment, where the transparency of the medium guarantees the registration of the image of changes occurring in the water-gas system, and those which were obtained on the basis of experiments conducted on liquid iron alloys.



Tab. 1 Parameters describing the nature of gas flow and accompanying phenomena in the liquid in the process of steel refining with argon and their mathematical description [3,7,11,16,17]

Parameter	Characteristics	No of eq.		
Para	meters derived on the basis of research conducted on water physical models			
diameter of gas bubbles, d _b	tests conducted for a slot nozzle covered with teflon (slot thickness 0.005 and 0.1 mm) gave the following relationship: $d_{b} = \left[\left(\frac{6\sigma d_{o}}{g\rho_{l}} \right)^{2} + \left\{ 0,54 \left(Qd_{o}^{0,5} \right)^{0,289} \right\}^{6} \right]^{1/6}$	(1)		
average speed of gas bubbles, u _b	at the moment the bubble flows out of the fitting (slots with a diameter of 1, 2 and 5 mm) u _b can be expressed by the equation: $u_b = 53 \left(\frac{Q_g^2}{g}\right)^{1/10}$	(2)		
frequency of gas bubble release, f _{wp}	under bubble flow conditions, the f _{wp} from individual channels or nozzles can be calculated from the following relationship: $f_{wp} = \frac{q}{V_b} = \frac{g \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot q}{\pi \sigma \cdot d_o}$	(3)		
De	ependencies derived on the basis of tests conducted in liquid iron solutions			
diameter of gas bubbles, d⊳	this diameter in the liquid Fe alloy was developed on the basis of experimental tests conducted at a temperature of 1250°C: $d_{b} = \left[\left(\frac{3\sigma \cdot d_{no} \cdot N_{C}^{0,816}}{\rho_{g} \cdot g} \right) + \left(\frac{9\sigma^{2} \cdot N_{C}^{1,632}}{\rho_{g} \cdot g^{2}} + \frac{10Q_{g}^{2} \cdot d_{no}}{g} \right)^{1/2} \right]^{1/3}$	(4)		
average speed of gas bubbles, u⊳	u _b measured in liquid iron alloy along the vertical axis of the nozzle at temperatures of 1250°C and 1600°C was described by the relationship: $u_{b} = \frac{0.44(Q_{g} \cdot g^{2})^{1/5}}{c^{2}} \text{ when: } c = 0.26 \left(\frac{\rho_{l}}{\rho_{g}}\right)^{0.07}$	(5)		
frequency of gas bubble release, f _{wp}	developed thanks to experimental data measured in iron solution at 1250°C: $f_{wp} = 12, 1 \cdot Q_g^{0,133} \cdot d_{no}^{-0,434}$	(6)		
where: q – volumetric flow rate of gas flowing from the nozzle, g – acceleration due to gravity, σ – surface tension, ρ_I – liquid density, d_{no} – nozzle diameter, ρ_g – gas density, d_o – average diameter of the outlet opening of the channel, V_b – volume of the largest bubble formed at the outlet of the channel, N_c – constant, N_{ka} – number of channels of the gas-permeable fitting, Q_g – volumetric flow rate of gas flowing into the tank, N_c – dimensionless number pre-nozzle volume.				

3. SUMMARY

Generally, the phenomena occurring when gas is blown into liquid metal depend on many parameters, including: the mentioned geometric parameters of the ladle or the construction of the gas-permeable fitting shape and its location in the bottom, as well as technical parameters related to the type of gas, gas flow rate, pressure and the relationship between liquid and gas density. In the case of blowing argon into a liquid iron solution, these parameters determine the nature of the gas flow and the accompanying phenomena in the



liquid, which are important from a technological point of view. The most important parameters describing the above phenomena include: the diameter of gas bubbles, their flow speed, release frequency, surface velocity (the ratio of the volumetric gas flow rate to the cross-section of the ladle surface) and the volume fraction of the gas phase (the ratio of the volume occupied by gas bubbles to the volume of gas and liquid). The results obtained on the basis of model tests are valuable and useful, however, it is necessary to take into account the differences resulting from the behavior of gas bubbles in such different media as water or liquid iron solution, which is achieved, as already mentioned, by the equality of the criteria numbers.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper was created with the financial support grant 11/020/BK_24/0129 for Faculty of Materials Engineering, Silesian University of Technology, Poland.

REFERENCES

- [1] IGUCHI, M. Generation of fine bubbles, metal droplets, and slag droplets in reactors agitated by bottom gas injection. Tetsu-to-Hagane. 2017, vol. 103, pp. 119-133.
- [2] KOCHI, N., UEDA, Y., UEMURA, T., ISHII, T., IGUCHI, M. Numerical observation of flow field around the water column behind a rising bubble through an oil/water interface. ISIJ Int. 2011, vol. 51, pp. 1940-1942.
- [3] SATERNUS, M: Modelowanie fizyczne zjawisk zachodzących podczas rafinacji roztworów Fe i Al za pomocą gazów obojetnych. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2020.
- [4] KOCHI, N., UEDA, Y., UEMURA, T., ISHII, T., IGUCHI, M. Numerical simulation stage of a rising bubble through an oil/water interface. ISIJ Int. 2011, vol. 51, pp. 1011-1013.
- [5] REITER, G., SCHWERDTFEGER, K. Observation of physical phenomena occurring during passage of bubbles through liquid/liquid interfaces. ISIJ Int. 1992, vol. 32, pp. 50-56.
- [6] REITER, G., SCHWERDTFEGER, K. Characteristics of entrainment at liquid/liquid interface due to rising bubbles. ISIJ Int. 1992, vol. 32, pp. 57-65.
- [7] JOWSA, J. Inżynieria procesów kadziowych w metalurgii stali. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2008.
- [8] CHEN, C.J. Multiphase flow. The CRC handbook of thermal engineering. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.
- [9] FU, Q., EVANS, G. Kinetics of magnesium removal from aluminium alloys by chlorine fluxing. In: Light Metals 1997, TMS, 1997, pp. 417-423.
- [10] BERTHERAT, M., ODIEVRE, T., ALLIBERT, M., LE BRUN, P. A radioscopic technique to observe bubbles in liquid aluminium. In: Light Metals 2002, TMS, 2002, pp. 861-867.
- [11] IGUCHI, M., KAWABATA, H., NAKAJIMA, K., MORITA, Z-I. Measurements of bubbles characteristics in a molten iron bath at 1600 ^oC using an electroresistive probe. Met. Trans. 1995, vol. 26B, pp. 67-74.
- [12] CHAO, B.T. Motion of spherical gas bubbles in a viscous liquid at large Reynolds numbers. Phys. Fluids. 1962, vol. 5, pp. 69-79.
- [13] IGUCHI, M., HOSOHARA, S., KOGA, T., YAMAGUCHI, R., MORITA, Z. The swirl motion of vertical bubbling jet in a cylindrical vessel. Journal of the Iron & Steel Institute of Japan International. 1993, vol. 33, pp. 1037-1044.
- [14] CLIFT, R., GRACE, J.R., WEBER, M.E. Bubbles, drops and particles. New York: Academic Press, 1978.
- [15] IGUCHI, M., NAKATANI, T., TOKUNAGA, H. The shape of bubbles rising near the nozzle exit in molten metal baths. Metallurgical and Materials Transaction B. 1997, vol. 28, pp. 417-423.
- [16] LIAO, Y., LUCAS, D. A literature review on mechanisms and models for the coalescence process of fluid particles. Chem. Eng. Sci. 2010, vol. 65, pp. 2851-2864.
- [17] JOO, S., GUTHRIE, R.I.L. Modeling flows and mixing in steelmaking ladles designed for single and dual-plug bubbling operations. Metallurgical Transaction B. 1992, vol. 23, pp. 765-778.

(3)



MOŽNOSTI PYROMETALURGICKÉHO SPRACOVANIA EOP ÚLETU S PRÍDAVKOM CaO

¹VINDT Tomáš, ¹ORÁČ Dušan, ²MARUŠKINOVÁ Gréta, ²BERAXA Pavol

¹Technická univerzita v Košiciach, Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie, Ústav recyklačných technológií, Letná 9, 042 00 Košice, Slovensko, <u>tomas.vindt@tuke.sk</u>

²ŽP Výskumno-vývojové centrum s.r.o., Kolkáreň 35, 976 81 Podbrezová, Slovensko

Abstrakt

Na Ústave recyklačných technológií, FMMR, TUKE sa dlhodobo rieši problematika využitia priemyselných odpadov ako druhotných surovín z dôvodu ich materiálového potenciálu. Do tejto oblasti druhotných surovín sa jednoznačne zaraďuje aj EOP úlet (prach), vznikajúci ako sekundárny produkt pri výrobe ocele v elektrických oblúkových peciach a to najmä z dôvodu obsahu Fe (30 %) a Zn (20 %). V praxi sa EOP úlet pyrometalurgicky spracováva hlavne tzv. Waelz procesom (v rotačnej peci), ktorého princípom je redukcia oxidov Zn, odparovanie Zn a jeho zachytávanie vo forme ZnO, ktorý je nutné rafinovať. V predkladanom príspevku sa študovala možnosť pyrometalurgického spracovania EOP úletu s prídavkom CaO (v pomeroch úlet:CaO = (1:1), (1:1,5) a (1:2) pri teplotách 500 °C, 900 °C a 1100 °C po dobu ohrevu 1 hod. Cieľom experimentov bola transformácia fázy ZnFe₂O₄ na Ca₂Fe₂O₅ a ZnO (s myšlienkou následného oddelenia fáz ZnO a Ca₂Fe₂O₅ pomocou magnetickej separácie). Vo výsledkovej časti príspevku sú porovnávané prvkové a fázové analýzy spracovávaných vzoriek, z ktorých vyplýva, že pri niektorých podmienkach došlo k predpokladanej transformácií za vzniku fázy Ca₂Fe₂O₅ (dicalcium ferrite). V závere sú uvedené návrhy a odporúčania ďalšieho experimentálneho štúdia v danej oblasti.

Klúčové slova: rRecyklácia, priemyselný odpad, druhotná surovina, metalurgia, železo, zinok

1. ÚVOD

EOP úlet (prach o zrnitosti < 10 μm), vznikajúci ako vedľajší produkt pri výrobe ocele v elektrických oblúkových peciach predstavuje významnú druhotnú surovinu najmä z pohľadu obsahu kovov ako Zn a Fe. Na 1 t vyrobenej ocele vznikne 10 – 25 kg EOP úletu. Tento heterogénny materiál (z chemického ako aj materiálového hľadiska) je tvorený oxidmi kovov. Zn je prítomný vo forme ZnO a tiež spolu s Fe v stabilnej kompozitnej fáze ZnFe₂O₄ (franklinit), rovnako je Fe zastúpené vo forme magnetitu Fe₃O₄ a tiež s Mn vo fáze MnFe₂O₄. Možnosti recyklácie predmetnej druhotnej suroviny predstavujú procesy hydrometalurgie, pyrometalurgie prípadne ich kombinácia. V oblasti hydrometalurgie (či už v laboratótnom, poloprevádzkovom alebo prevádzkovom prostredí) sa pozornosť sústreďuje na kyslé a zásadité lúhovanie Zn do roztoku s následnými operáciami čistenia roztokov od nečistôt (Pb, Cu, Cd) v závislosti od typu cieleného produktu, či už ZnO, ZnSO₄ a tiež železonosného koncentrátu [1]. Pomocou pyrometalurgie sa v súčasnej praxi Zn z EOP úletu (prítomný vo fázach ZnO a ZnFe₂O₄), získava tzv. Waelz procesom (v rotačnej peci) pri teplote približne 1 200 °C. Princípom je redukcia oxidov zinku, odparovanie Zn a jeho zachytávanie vo forme ZnO, ktorý je nutné rafinovať [2].

$$ZnFe_2O_4(s) + 2C(s) = Zn(g) + 2FeO(s) + 2CO(g)$$
(1)

 $2CO(g) = C(s) + CO_2(g)$ (2)

 $Zn(g) + 1/2O_2(g) = ZnO(s)$



Tuhý zvyšok z uvedeného spracovania (s obsahom nakoncentrovaného Fe) kvôli niektorým environmentálnym obmedzeniam predstavuje ďalší problém v danej oblasti.

V ďalšej časti príspevku sú uvedené výsledky experimentálneho štúdia pyrometalurgického spracovania EOP úletu s prídavkom CaO (bez karbotermickej redukcie a pri nižších teplotách) s cieľom transformácie fázy ZnFe₂O₄ na Ca₂Fe₂O₅ a ZnO s myšlienkou následného oddelenia fáz pomocou magnetickej separácie).

2. EXPERIMENTÁLNE ŠTÚDIUM PYROMETALURGICKÉHO SPRACOVANIA EOP ÚLETU S PRÍDAVKOM CaO

Z dodaného materiálu EOP úletu sa odobrali reprezentatívne vzorky, ktoré sa podrobili prvkovej XRF analýze (röntgenová fluorescenčná spektrometria) za účelom identifikácie chemického zloženia. Zosumarizované výsledky prvkovej analýzy predmetných vzoriek sú uvedené v **tab.1**.

EOP úlet							
Vzorka	Fe	Zn	Са	Mn	Pb	к	Mg
	[%]						
GT 346	29.52	22.48	3.69	2.81	1.07	0.91	2.94
GT 346	29.57	22.59	3.72	2.84	1.03	0.91	3.23
GT 347	29.64	22.15	3.72	2.71	1.14	0.9	1.51
GT 347	29.78	22.15	3.66	2.81	1.14	0.88	1.74
GT 348	29.09	21.01	3.68	2.74	1.09	0.96	1.12
GT 348	29.58	21.91	3.88	2.79	1.08	0.88	1.21
priemer	29.53	22.05	3.73	2.78	1.09	0,91	1.96

Tab. 1 Výsledky prvkovej XRF analýzy vzoriek EOP úletu

Priemerný obsah Fe sa pohyboval na úrovni približne 30 %, obsah Zn predstavoval 22 %, obsah Ca 3.7 %, Mn 2.7 %, Pb okolo 1 % a Mg na úrovni 2 %. Vzorky EOP úletu boli rovnako podrobené fázovej XRD analýze (röntgenová difrakčná analýza), za účelom identifikácie fázového zloženia. Výsledky XRD analýzy sú znázornené na **obr. 1** a v **tab. 2**.



Obr. 1 Záznam difraktogramu vzorky EOP úletu



(4)

Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula
01-070-3379	Zinc Iron Oxide	(Zn0.969 Fe0.022) Fe1.999 O4
01-079-0208	Zinc Oxide	Zn O
01-086-1350	Iron Oxide	Fe2.937 O4
01-089-2807	Manganese Iron Oxide	Mn0.43 Fe2.57 O4
01-076-0570	Calcium Hydroxide	Са (О Н)2
01-089-5171	Manganese Oxide	Mn O2

Tab. 2 Výsledky fázovej XRD analýzy vzorky EOP úletu

Ako vyplýva z výsledkov fázovej analýzy prítomné zlúčeniny predstavujú oxidickú formu. Fe sa nachádza vo forme magnetitu (Fe₃O₄) a spolu so Zn (alebo Mn) vytvára kompozitné oxidy ZnFe₂O₄ a MnFe₂O₄ (tzv. franklinit). Zn je okrem formy franklinitu zastúpený aj vo svojej základnej oxidickej forme ako ZnO. V ďalších prípadoch sa potvrdila prítomnosť Ca(OH)₂ a tiež MnO₂. Uvedené výstupy fázovej analýzy korešpondujú s prvkovou analýzou EOP úletu.

V rámci experimentov sa na základe teoretického štúdia [3], predpokladal priebeh nasledovnej chemickej reakcie:

$$ZnFe_2O_4(s) + 2CaO(s) = ZnO(s) + Ca_2Fe_2O_5(s)$$

pričom

 $\Delta G^{\circ} = -32 \ 114 + 11.329T + 4.201 \times 10^{-3} T^2 - 5.46 \times 10^{5} / T - 3.373 T [nT [J]$

 $\Delta H^{\circ} = -32 \ 114 + 3.373T - 4.201 \times 10^{-3} T^2 - 10.91 \times 10^{5} / T \ [J/mol]$

Vypočítane hodnoty ΔG° a ΔH° pre danú chemickú reakciu, pri rôznych uvažovaných teplotách sú uvedené v **tab. 2.**

т [К]	T [°C]	ΔG° [kJ]	ΔH° [kJ/mol]
737	500	-38.89	-33.43
973	700	-40.26	-33.93
1173	900	-41.47	-34.87
1373	1100	-42.50	-36.20

Tab. 5 Hourioly 26, 211 pre chemicku reakciu (4)

Na základe uvedených údajov sa predpokladal priebeh chemickej reakcie (4) v smere tvorby produktov, pričom hodnoty ΔH° poukazujú na exotermický charakter reakcie, čo možno považovať za benefit v rámci pyrometalurgického spracovania.

Podmienky realizovaných experimentov pyrometalurgického spracovania EOP úletov s prídavkom CaO (kalcifikácia) sú zosumarizované v nasledujúcej **tab. 4**.



EOP úlet		20 g							
doba ohrevu		1 hod.							
teplota	500 °C			900 °C			1100 °C		
Pomer úlet:CaO	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2	1:1	1:1,5	1:2
m [g]	20:20	20:30	20:40	20:20	20:30	20:40	20:20	20:30	20:40
Označenie vzoriek	GT 349	GT 350	GT 351	GT 355	GT 356	GT 357	GT 358	GT 359	GT 360

Tab. 4 Podmienky experimentov v rámci spracovania EOP úletu

Tab.	5 \/\	ýsledky	prvkovei	i analýzy	vzoriek po	o pyrometa	luraickom	spracovan
I UN.	U V 1	ysiculty	prvikovoj			<i>pyromota</i>	iui giokom	spracovari

Vzorky po pyrometalurgickom spracovaní								
Vzorka	Fe	Zn	Ca	Mn	Pb	к	Mg	
	[%]							
GT 349	12.58	9.23	38.12	1.13	0.47	0.42	2.93	
GT 350	12.38	8.00	42.29	1.05	0.44	0.30	2.43	
GT 351	9.53	6.25	43.46	0.89	0.30	0.29	2.72	
GT 355	12.49	9.51	37.92	1.10	0.52	0.47	3.77	
GT 356	11.38	7.84	39.81	1.12	0.39	0.37	2.54	
GT 357	10.73	7.46	40.47	0.97	0.36	0.29	1.52	
GT 358	8.92	7.63	43.15	0.83	0.39	0.28	1.51	
GT 359	10.44	7.91	39.52	0.95	0.29	0.19	2.22	
GT 360	7.91	5.55	44.51	0.74	0.26	0.21	2.43	

Na **obr. 2, 3 a 4** sú graficky znázornené obsahy Fe, Zn a Ca v jednotlivých vzorkách po pyrometalurgickom spracovaní EOP úletu s prídavkom CaO. Vo všetkých vzorkách je zjavný nárast obsahu Ca z dôvodu použitia CaO ako prídavku pri realizácií experimentov. Obsah Ca narastá v závislosti so zvyšujúcim sa množstvom pridávaného CaO v rámci dodržania pomeru EOP úlet:CaO stanoveného v metodike experimentov. Najvyšší

obsah Ca predstavuje 44.51 % vo vzorke GT 360. Z výsledkov možno konštatovať že obsah Fe a Zn klesá so zvyšujúcou s teplotou ako aj so zvyšujúcim sa množstvom pridávaného CaO. Obsah Fe je vyšší oproti Zn približne o 3 % vo všetkých vzorkách.

Obr. 2 Grafické znázornenie obsahu Fe vo vzorkách po kalcifikácií













Vzorky po kalcifikácií

Obr. 4 Grafické znázornenie obsahu Ca vo vzorkách po kalcifikácií

V nasledujúcej časti sú diskutované výsledky XRD fázovej analýzy, za účelom identifikácie fázy Ca₂Fe₂O₅ v jednotlivých vzorkách v závislosti od podmienok vykonaných experimentov.

Vo vzorkách podrobených teplote 500 °C boli identifikované dominantné fázy Ca ako CaO a Ca(OH)₂. Rovnako bola zistená prítomnosť franklinitu a zinkitu, čo je dôkazom toho že reakcia (4), transformácie fázy ZnFe₂O₄ na Ca₂Fe₂O₅ a ZnO pri danej teplote neprebehla.

Vo vzorkách spracovaných pri teplote 900 °C už bola identifikovaná fáza Ca₂Fe₂O₅ (dicalcium ferrite) a teda možno konštatovať, že prebehla transformácia ZnFe₂O₄ na Ca₂Fe₂O₅ a ZnO. Túto transformáciu možno označiť za čiastočnú, keďže vo vzorkách bol ešte stále prítomný aj franklinit. Z ďalších fáz sa potvrdila prítomnosť ZnO a CaO.

Na základe výsledkov fázovej analýzy možno konštatovať že záznamy difraktogramov jednotlivých vzoriek podrobených teplote 1100 °C sú v zásade zhodné, rôzna je len intenzita niektorých difrakčných maxím. Ako vyplýva z **tab. 7**, analýzou sa identifikovala prítomnosť fáz Ca₂Fe₂O₅, ZnO, CaO a tiež oxidov Mn a Si. Fáza franklinitu (ZnFe₂O₄) vo vzorkách nebola prítomná a teda došlo k jej transformácií na ZnO a Ca₂Fe₂O₅.



Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula
01-071-2264	Calcium Iron Oxide	Ca2 Fe2 O5
01-079-0208	Zinc Oxide	Zn O
00-037-1497	Calcium Oxide	Ca O
01-080-2148	Silicon Oxide	Si O2
01-089-5171	Manganese Oxide	Mn O2

Tab. 6 Výsledky XRD analýzy vzorky GT 360



Obr. 5 Porovnanie záznamov difraktogramov vzoriek podrobených teplote 1100 °C



Obr. 6 Detail intenzít vybraných difrakčných maxím vzoriek GT 358, GT 359 a GT 360

Zo znázorneného detailu intenzít difrakčných maxím vzoriek spracovaných pri teplote 1100 °C s prídavkom CaO (pomer úlet:CaO = GT 358 (1:1), GT 359 (1:1,5), GT 360 (1:2) vyplýva, že podobne ako pri teplote 900 °C aj v tomto prípade intenzita záznamov pikov Ca₂Fe₂O₅ a ZnO stúpa s klesajúcim pomerom úlet:CaO. V prípade fázy CaO je tento trend opačný čo je vzhľadom k použitému prídavku CaO logické.



Na **obr. 7** sú porovnané detaily intenzít difrakčných maxím vzoriek kde pomer úlet:CaO = 1:1, avšak pri rozdielnych teplotách (GT 349 = 500 °C, GT 355 = 900 °C, GT 358 = 1100 °C)



Obr. 7 Detail intenzít vybraných difrakčných maxím vzoriek GT 349, GT 355 a GT 358

Čiernou farbou sú znázornené fázy CaO a ZnO, ktoré boli identifikované vo všetkých troch vzorkách. Intenzita ich pikov je však rozdielna, napr. u fázy ZnO jeho difrakčné maximum bolo zaznamenané pri vzorke GT 355 (900 °C). Ostatné farebne rozlíšené zlúčeniny prislúchajú k rovnako farebne označeným vzorkám (viď. legenda **obr. 7**). Ako vyplýva z výsledkov analýzy, zlúčenina franklinitu (ZnFe₂O₄) bola identifikovaná len vo vzorke GT 349 (500 °C), kedy neprebehla reakcia (*4*) a nedošlo k transformácií ZnFe₂O₄ na ZnO a Ca₂Fe₂O₅ (ako už bolo uvedené v predchádzajúcej časti dokumentu). Naopak fáza Ca₂Fe₂O₅ bola detekovaná vo vzorkách GT 355 (900 °C) a GT 358 (1100 °C) v ktorých sa už franklinit nenachádza, nakoľko predmetná reakcia (*1*) pri pyrometalurgickom spracovaní EOP úletu s prídavkom CaO prebehla.

Myšlienka aplikácie magnetickej separácie na získaný medziprodukt sa uvažovala na základe teoretického štúdia odbornej literatúry [3], kde sa konštatuje, že fázy ZnO, Ca₂Fe₂O₅ a ZnFe₂O₄ predstavujú nemagnetický, paramagnetický a feromagnetický materiál, resp. že rozdiel medzi magnetickou susceptibilitou ZnO a Ca₂Fe₂O₅ je pozoruhodný. Na základe toho sa predpokladá možnosť magnetickej separácie uvedených fáz, ktorej experimenty sú naplánované v ďalšej časti štúdia predmetnej problematiky.

3. ZÁVER

Na základe predloženého príspevku, možno konštatovať pozitívny výsledok v rámci pyrometalurgického spracovania EOP úletu s prídavkom CaO v tom, že sa potvrdil priebeh reakcie (4), transformácie fázy franklinitu na ZnO a Ca₂Fe₂O₅. Tento fakt predstavuje významný základ pre spracovanie EOP úletu podľa danej metodiky, pričom sa predpokladá možnosť magnetickej separácie uvedených fáz s využitím elektromagnetu s nastaviteľným - pohyblivým magnetickým účinkom (možnosť nastavenia konkrétnej hodnoty magnetickej indukcie [T]).

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol v rámci riešenia grantu VEGA Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR a Slovenskej akadémie vied 1/0678/23 a za jeho finančnej podpory.



LITERATURA

- [1] KUKURUGYA F., VINDT T., HAVLIK T.: Behavior of zinc, iron and calcium from electric arc furnace (EAF) dust in hydrometallurgical processing in sulfuric acid solutions: Thermodynamic and kinetic aspects. Hydrometallurgy 154 (2015), 20-32
- [2] NAKAJIMA K., NAKAMURA SH., ITOH S., NAGASAKA T.: Substance flow analysis of zinc associated with iron and steel cycle in Japan and environmental assessment of EAF dust recycling process. ISIJ International 48 (2008), 1478-1483
- [3] ITOH S., TSUBONE A., et al.: New EAF Dust Treatment Process with the Aid of Strong Magnetic Field. ISIJ International 48 (2008), 1339-1344



www.promatpraha.cz



DANIELI DIGIMELTER® FOR BF TECHNOLOGY TRANSITION - THE VOESTALPINE STAHL DONAWITZ PROJECT

STADLER Werner, SOCHOR Milan

Danieli &C Officine Meccaniche SpA

edited by BURIN Paolo / Vice President, Danieli Centro Met

Abstract

The unique mix of characteristics and performance delivered, make Digimelter the most suitable technology for competitive green steel production – Voestalpine Stahl Donawitz GmbH awarded Danieli the order to supply two, new Digimelters for the special steel production facility in Leoben, Austria, replacing blast furnace #4."



From the top: Meltshop location at Donawitz site, Austria. Rendering of the new meltshop bay layout complete with two Danieli Digimelters and future hot DRI charging HyTemp® towers, dog houses and hot metal charging facilities.

Highlights of technology:

— **Two Danieli Digimelters** powered by Q-One will guarantee the production of ultra-high quality green steel, expandable up to 1.7 Mtpy, with the only addition of two Q-One modules.

— **Q-One, the Danieli-patented power feeder** which makes the fast, dynamic electronic control of the arc possible, with a negligible impact on the power grid. It also establishes a unique process control capability that,



in addition to defining a variable working point, allows for frequency modulation with benefits in arc stability and, consequently, power and electrode consumption reduction.

— Hybrid by design, Q-One allows the direct use of renewable energy sources generated at production sites. Initially supplied with a four-module configuration, providing 67 MVA per Digimelter, the addition of two extra modules will allow voestalpine Stahl Donawitz GmbH to increase their electric steelmaking capability up to 1.7 Mtpy, satisfying the requirement for full liquid steel.

— The management of the melting process will be performed by Danieli Q-Melt, a fully dynamic, adaptive process control of working parameters for both electrical and chemical profiles. Danieli Q-Melt allows the reduction of process variability with notable benefits in terms of furnace utilization factor and efficiency.

— FTP system: The meltshop will be equipped with the latest state-of-the-art dedusting plant, serving both Digimelters, and two independent heat recovery systems, allowing for additional CO2 reduction, due to waste heat recovery through the production of steam and hot water.



www.zdas.com



SIMULATION AND PERFORMANCE TEST RESULTS FOR ELECTROMAGNETIC STIRRING TECHNOLOGY ON 450T CONSTEEL® FURNACE

TENG Lidong, YANG Hongliang, MEHRABAN Zaeim, DRUZHKO Alexander, PINDUR Tomas

ABB Metallurgy, ABB AB, Terminalvägen 24, 72159, Västerås, Sweden, Phone: +46 21-340 917, <u>lidong.teng@se.abb.com</u>

Keywords: Electromagnetic stirring (EMS, ArcSave®, Consteerrer®); CFD simulation; Consteel furnace; Arvedi;

INTRODUCTION

The Acciaeria Arvedi Group in Cremona, Italy is one of Europe's most significant steelmaking realities. The well-known innovative 'Arvedi ESP' process technology, based on the casting and in-line continuous rolling of a thin slab to a finished coil, allows excellent quality ultrathin steels to be produced with very low energy consumption. To comply with the higher productivity of the recently improved ESP line, Arvedi put an order for a new 450t Tenova Consteel[®] electric arc furnace (EAF) in 2018 to replace the existing 350-ton Consteel[®] EAF which was installed in 2008. The new electric arc furnace has a diameter of 9.1 meters and is continuously fed by a 4.0-meters-wide Consteel[®] conveyor. The productivity of the record-breaking new EAF is 412 ton/hour with a tapping weight of 300 metric tons, a power-on time of 37 minutes, and a charge mix of including up to fifty percent of scrap surrogates as Pig Iron and Hot Briquetted Iron (HBI). This output has never been achieved before by a single EAF, and it is made possible thanks to the proprietary Consteel technology of Tenova, complemented by Consteerrer, an innovative system including ABB ArcSave electromagnetic stirring (EMS). Only the EAF Consteerrer® configuration is currently able to achieve the flexibility, productivity, product quality and production efficiency that are pillars of success at Acciaieria Arvedi. The basic data of Arvedi 450t furnace is shown in **Tab. 1**.

Furnace type	Consteel [®] from Tenova
Furnace capacity	450 ton
Heat size	300 ton
Scrap charge mix	Scrap + Pig iron + HBI
Bottom inner shell diameter	9.1 m
EMS stirrer size	ORB65U+

Tab. 1 Basic data of Arvedi Consteel furnace

Consteel[®] furnace is a typical flat bath operation process, and the melted scrap is not in contact with arcs but rather with the liquid metal. One issue for this Consteel flat bath melting process is the temperature homogenization of the furnace bath, especially in the scrap charging area which is always colder compared to the arc heating area. The temperature difference is reported up to 150 °C for a typical 100-ton Consteel furnace¹. To solve this problem of inhomogeneous temperature, a tailor-made Consteerrer solution has been developed through close collaboration between ABB Metallurgy and Tenova S.p.A. The installation of an electromagnetic stirrer underneath the Consteel furnace bottom will increase the mass and heat transfer in the bath, provide a homogeneous temperature distribution and faster scrap melting. In this paper, the effect of electromagnetic stirring on the Arvedi 450t Consteel[®] furnace process has been studied by both numerical simulation and hot test results.



DISCUSSION

1. STIRRING PRINCIPLE AND STIRRER INSTALLATION

The electromagnetic stirrer is placed underneath the furnace bottom, where the whole bottom shell is made of a non-magnetic (austenitic stainless steel) steel plate. The low frequency electrical current carried through the stirrer windings generates a traveling magnetic field which penetrates the furnace bottom and in turn generates forces in the molten steel. Since the magnetic field penetrates the full depth of the melt, the melt flows in the same direction across the entire diameter of the furnace and through the full depth of the bath. After reaching the furnace wall the melt has to flow back along the sides of the furnace. When the travelling field is reversed, the melt flows in the opposite direction. Since the stirrer is extended over the entire diameter of the furnace, an effective stirring force is obtained throughout the whole bath. It should be noted that the magnetic force acts not only in a horizontal but also a vertical direction, which results in a more efficient mixing effect on the entire bath. EMS offers the added benefit of having no physical contact with the steel melt which results in very low maintenance requirements. The stirrer configuration for the Arvedi furnace is to generate a traveling magnetic force in a direction along the furnace bottom central plane extending from the slag door to the tapping hole of the electric arc furnace, as show in **Figure 1**.



Figure 1 Electromagnetic stirrer configuration on Arvedi 450-ton furnace

2. CFD SIMULATION AND HOT TEST RESULTS

The stirring force of EMS in the melt is simulated with Dassault Opera and exported to Ansys Fluent to carry out the CFD simulations². The goal of these simulations is to investigate the distribution of melt temperature, velocity, and heat flux transferred to the scrap in the Arvedi 450-ton EBT tapping Consteel[®] furnace with varying EMS stirring power and steel weight. The bath temperature gradients during the arc power-on period have also been calculated. The scrap charging area is applied as a porous zone, as described in detail in section 2.4.

The performance test was carried out in November of 2021 once the new furnace was in full operation. Following an agreement between Arvedi and ABB, the reference test was started by turning the EMS OFF for a period of 3 days and some 60 continuous heats were collected. The performance test was continued immediately after the reference test by turning EMS-ON for a period of 14 days and around 300 heats were collected. The performance improvements were obtained by directly comparing the process data between the reference heats and performance heats. In the following sections, performance test results have been discussed as a validation of the CFD simulation results.



2.1 Bath temperature homogenization

Bath temperature homogenization is important for reliable bath temperature measurement, improved scrap melting, a high EBT free opening and so on. The effect of EMS on bath temperature homogenization has been calculated with the following assumptions:

- For starting conditions, the bottom temperature is assumed to be 1560 °C while the surface temperature is 1620 °C. Temperature homogenization times are compared with and without EMS stirring.
- 2) For the non-stirred bath, natural stirring is simulated with a case of 5% maximum EMS power as a reference.

Temperature homogenization time for cases with stirring direction from slag door to EBT with 5% EMS (left) and 100% EMS (right) for 450-ton heat size are presented in **Figure 2**. Homogenization time is calculated at the point when the maximum temperature difference between bottom and surface is less than 5 °C. **Figure 2**(left) shows 5% EMS power with a calculated homogenization time of 477 seconds. **Figure 2**(right) shows 100% EMS power with a homogenization time of 113 seconds. These results show that bath temperature homogenization time with EMS is significantly shorter at only 24% of the time required for homogenization with 5% EMS. The bulk turbulent flow induced by the EMS brings a thorough mixing of the whole melt, resulting in faster bath temperature homogenization.

Bath temperature homogenization was measured in the Arvedi furnace by comparing two repeated temperature measurements at the same location before tapping with standard practice. The first one (T₁) was taken immediately after arc power-off and the second one (T₂) was taken within 30 seconds after the first one finished. In total, 30 repeated measurements have been performed. With EMS-ON, the average absolute bath temperature difference [ABS(T₁-T₂)] is 9 °C while it is 24 °C with EMS-OFF. It should be pointed out that if the bath temperature homogenization has been measured in two different locations in the bath, the average absolute bath temperature difference might be higher than 24 °C for the case with EMS-OFF³. Good homogeneity is important from a metallurgical viewpoint. It implies reliable temperature measurement and more consistent tapping temperature control. The good bath homogenization after Consteerrer[®] therefore makes it possible to obtain an exact tapping temperature for various steel grades which is very important for smooth downstream ladle furnace operation. Homogenous temperature distribution in the melt bath will give a hot EBT and smooth tapping without delays.



Figure 2 Temperature homogenization time for stirring direction (from slag door to EBT) with 5% EMS (left) and 100% EMS (right) for 450-ton liquid bath

2.2 Melt velocity distribution and scrap melting

The melt velocity distribution in the Arvedi furnace, simulated by CFD simulation for an intermediate stage with 350-ton liquid steel and solid scrap charging phase is presented in **Figure 3**. The EMS stirring direction is from



slag door towards EBT tapping hole. **Figure 3** (top left) shows the velocity distribution on the surface at 50mm offset from melt bottom, and the main flow in the bath center is from the slag door to the EBT and the reflection is on the sides of the bath. **Figure 3** (top right) shows the velocity distribution on the surface at 50mm offset from melt top surface. The main reflection flow is from EBT to slag door to the EBT. **Figure 3** (bottom left) shows the velocity distribution in the longitudinal cross-section. **Figure 3** (bottom right) is the velocity distribution in the transverse cross section. It can be seen from **Figure 3** that the whole melt bath is involved in the movement except the scrap charging zone. The optimized average volume velocity of the melt is in the range of 0.2-0.3 m/s. This stirring effect accelerates the homogenization of both temperature and chemical composition, as discussed in section 2.1.

The forced convection induced by electromagnetic stirring as shown in **Figure 3** will enhance the melting of larger scrap pieces, pig iron and also HBI. One indication is that the EBT area after tapping is cleaner (less pig iron blockage in the EBT area) with EMS-ON compared with EMS-OFF. The possibility to either increase the scrap feeding rate by 3-4% without changing the specific energy input or reducing the specific energy input but keeping the same scrap feeding rate was also tested.



Figure 3 Melt velocity pattern in the Arvedi furnace simulated during the scrap charging period with 350-ton liquid steel and solid scrap zone. Top left: 50mm offset from bottom surface; Top right: 50mm offset from top surface; Bottom left: Longitudinal cross-section; Bottom right: Transverse cross-section

2.3 Bath temperature distribution during power-on and tapping temperature reduction

In the current simulation the electrode arc heating effect was included in the CFD models. In the arc heating model, the total active arc power was assumed to distribute into the furnace by 3 parts. These are 55% transferred to the melt by convection; 20% by radiation which is assumed to homogeneously distribute into the melt surface; and 25% as power loss to the furnace wall, roof and electrodes. The total active arc power input for the Arvedi 450-ton furnace is assumed to be 200MW. The 55% of convection power applied to the bath surface has been assumed as a function of the distance to the center of the electrodes:

Arc power input by convection
$$P_{\text{convection}} = \int_0^R \frac{k}{(r+1)^2} dr$$

 $k/(r+1)^2$ is the power distribution at position r; k is a constant; R is the bath surface radius; r is the distance from the calculation point to the center of electrodes.



The initial temperature of the melt is set as 1560°C. **Figure 4** presents the temperature distributions for the top surface and the longitudinal cross-section 10 minutes after arc power-on, with steel weight of 350-ton and EMS stirring direction from slag door to EBT. The temperature patterns on the left side in **Figure 4** shows 5% EMS power (the case simulated for without stirring) and the right side shows 100% EMS power. It can be seen from **Figure 4** (left) that the bath surface temperature and temperature gradient from surface to bottom with 5% EMS power case are higher than with 100% EMS power. The high temperature zone on the surface with 100% EMS power is located mainly in the center of the bath. The average temperature gradient between the surface layer (50mm offset from the surface) and the bottom layer (50mm offset from bottom) has been calculated with varying EMS power. The results are for the cases with stirring direction from EBT to slag door during power-on time and the results are presented in **Figure 5**. It can be seen from **Figure 5** that the average temperature gradient with EMS will reduce heat loss from the bath surface and increase arc heating efficiency. This is one of the reasons why it is possible to reduce electrical energy using EMS.



Figure 4 Temperature distribution in the bath after 10 minutes of power-on. Top left: 50mm offset from bottom surface with 5% EMS power, Bottom left: Longitudinal cross-section with 5% EMS power; Top right: 50mm offset from top surface with 100% EMS power; Bottom right: Transverse cross-section with 100% EMS power



Figure 5 Average temperature gradient between the surface layer (50mm offset from the surface) and the bottom layer (50mm offset from bottom) vs EMS power during arc power-on for stirring direction from EBT to slag door.



It is clear that the reduction in thermal stratification in the melt bath with Consteerrer[®] also reduces the tapping temperature. It was found that the tapping temperature with EMS-ON was reduced by an average of 18°C without changing the LF first measured temperature. The temperature drop from EAF to LF after tapping is 48°C with EMS-ON and 65°C with EMS-OFF. The temperature drop with EMS-ON in the EAF is 17°C lower than that with EMS-OFF. The tapping temperature reduction will reduce the final oxygen content in the steel and even reduce refractory wearing in the slag-line area.

2.4 Heat transfer to the scrap charging area and energy savings

The purpose of this simulation is to find out the effect of EMS on the heat flow from the melt into the scrap charging volume for flat bath operation. The scrap charging area is applied as a porous zone with 30% penetrability. The scrap charging area in the Arvedi Consteel[®] furnace is illustrated in **Figure 6**. The heat flux transferred from the melt to the scrap/melt boundary layer of 50 mm is calculated for cases with varying EMS power as presented in **Figure 6** during arc power-on period. The solid scrap temperature is assumed to be constant at solidus temperature of T_s = 1470°C, and the initial liquid melt temperature is T_m = 1560°C. Temperature distribution depends greatly on the heat source applied to the top layer of the melt. Total power input is the same as described in section 2.3. The equation governing temperature is

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T)$$

Where C_p is the specific heat, J/K/kg; ρ is the density of steel; *T* is the bath temperature; *t* is the time; *k* is the thermal conductivity, W/m/K; *U* is the melt velocity.

The heat flux Q_{ms} across the surface of the solid scarp charging zone is directly extracted from the simulation results, including both convective heat flow and conductive heat flow across the surface. The effect of EMS stirring power on the energy transferred to the scrap volume during power-on time has been calculated for cases with stirring direction from slag door to EBT and the results are presented in **Figure 7**. It can be seen from **Figure 7** that the integrated heat transferred to the scrap surface layer increases in line with an increase in EMS stirring power. The heat transferred to the scrap layer









with 100% EMS is more than 8 times higher than that with 5% EMS. The simulation results show that EMS will increase the scrap melting rate and reduce the temperature gradient in the bath (between the arc heating area and the scrap charging area).

The arc heat transfer calculation shows that EMS reduces melt surface superheat during arc heating and the heat from the arc is quickly transmitted to the scrap zone through liquid melt. The decrease of surface superheat temperature will reduce heat



losses to the furnace wall and roof during power-on period, and thereby reduce the electricity consumption. Simultaneously, the faster heat transfer to the scrap zone will increase the arc heating efficiency and scrap melting rate, and therefore save on furnace process time, which also reduces heat loss. Arvedi hot test results show that the average electrical energy reduction is 3.6% and the power-on time reduction is 3.5% after EMS-ON. The lower electrical energy consumption and lower bath surface superheat also result in a 3.3% reduction in electrode consumption.

2.5 Reduction in final tapping oxygen in the steel

It is known that bath stirring in EAF will push the carbon-oxygen reaction closer to its equilibrium state⁴. This has been proven once again by the test results from Arvedi. The EAF tapping oxygen was reduced by an average of 165ppm with a slight tap carbon increase after EMS-ON. The lower oxygen content in the steel is also thanks to the 18°C lower tapping temperature. These results indicate that with the aid of electromagnetic stirring it is possible to reach a low tapping oxygen while almost maintaining tapping carbon content. It is also seen that the FeO content in the slag is reduced by 2.8% after EMS-ON. Average oxygen content in LF with EMS-ON is 18ppm lower than that with EMS-OFF. The oxygen reduction in the steel, FeO reduction in the carry-over slag, and overall reduction in carry-over slag has resulted in a 5-7% decrease in Al consumption in ladle furnace.

2.6 Furnace bottom refractory

After the EMS came into operation, the bottom refractory was carefully monitored by the Arvedi team. After each shell change the bottom refractory thickness was measured and the remaining average thickness was compared with the data collected between EMS-OFF and EMS-ON. It can be concluded that Consteerrer[®] has not created any negative effects on the bottom refractory lining as long as the EMS stirring is properly controlled. On the other hand, the use of EMS has a positive effect on refractory wearing: before EMS installation there is sometimes bottom refractory wearing from the electrode arcs: the electrodes projected area has higher refractory wearing compared to others area far away from electrodes. This might be due to the small hot heel and high arc power input in the furnace. After having EMS in operation with increased hot heel, this problem has never happened.

CONCLUSION

The effect of Consteerrer[®] (EMS) on bath temperature homogenization, stirring power, temperature gradient during arc power-on, and heat transfer from arcs through liquid metal to scrap in the 450-ton Consteel[®] furnace at Arvedi has been investigated via numerical modelling and industrial tests. Simulation results show that the temperature gradient between furnace bottom and surface during arc power-on is reduced from 114°C without EMS to 26°C with 100% EMS power, and the heat flux transferred to the scrap boundary layer with 100% EMS power is 2-3 times higher than without EMS. Site acceptance test results show that EMS increases arc heating efficiency and scrap melting rate, reduces electric energy consumption, power-on time, and oxygen content in the steel, as well as increasing scrap yield. The guaranteed KPIs with EMS are fully achieved as part of the Arvedi project. The process benefits obtained from EMS are presented in **Tab. 2**.

No.	Process parameters	Performance improvements
1	Temperature homogenization (°C)	< 9 °C
2	Tapping temperature reduction (°C)	-18 °C
3	Temperature drop from EAF to LF (°C)	-17 °C
5	Electric energy reduction (kWh/tls)	-3,6%

Tab. 2 Process improvements after Consteerrer® installation at Arvedi



6	Power-on reduction (min/tls)	-3,5%
7	Electrode reduction (kg/tls)	-3,3%
8	Productivity increase (ton/h)	+4,5%
9	Final oxygen reduction in EAF steel (ppm)	-165 ppm
11	First oxygen in LF (ppm)	-18 ppm
12	FeO content in EAF slag (%)	-2,8%
13	Scrap yield (%)	+0,6%
14	Refractory wear	Better
15	Carry-over slag	Less

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the kind support and valuable discussions from Cavina Daniele, Andrea Bianchi and Andrea Aiolfi at Arvedi, Cremona during the EMS hot site test work. Thanks also to Silvio Reali and Andrea Grasselli from Tenova S.p.A for the kind discussion regarding Consteel[®] process and Consteerrer[®] control.

REFERENCES

- [1] A. GRASSELLI, S. REALI, J. ANDERSSON, A. LEHMAN, L. TENG. Consteerrer[™] technology: getting the most out of the electric steelmaking process, The 4th European Conference on Clean Technologies in the Steel Indurstry, Bergamo, Italy, 28-29 Nov 2018.
- [2] Lidong TENG, Kamil JAWORCZAK, Monika ZIELINSKA, Hongliang YANG. Numerical Simulation and Industrial Results for Electromagnetic Stirring Technology in Electric Arc Furnace, 5th ESTAD 2021, Stockholm, 30 August - 2 September, 2021
- [3] Eung-Sou LEE, Ho-Kyoung KIM, Eun-Woo JUNG, Lidong TENG, Kwang-Seok KIM, Joakim ANDERSSON, Hongliang YANG. Problems with and Solutions to Skull Formation in EBT Furnace for Tooling and Stainless Steel Production. *Iron & steel technology*. 2021, January, pp. 56-63.
- [4] R.J. FRUEHAN. "The Making, Shaping and Treating of Steel. (Steel Making and Refining)". 1998, vol. 2, pp.125-133.



PŘÍNOS KORELATIVNÍ MIKROSKOPIE PRO CHARAKTERIZACI MIKROSTRUKTURY OCELÍ

MIKMEKOVÁ Šárka, JOZEFOVIČ Patrik, AMBROŽ Ondřej, ČERMÁK Jan, LISZTWANOVÁ Zuzana, CIBULKA Jiří, HUCZALA Tomáš, ZAWADA Ondřej, TUROŇ Rostislav

> Institute of Scientific Instruments of the CAS, Brno, Česká republika TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a. s., Třinec, Česká republika, EU

Abstrakt

Vybrané vzorky ocelí byly charakterizovány pomocí světelné, laserové a elektronové mikroskopie. Bude diskutován přínos a také limity jednotlivých mikroskopických technik a demonstrován přínos korelativní mikroskopie pro studium mikrostruktury. Přednáška bude doplněna o ukázku přínosu metod hlubokého učení pro vylepšení snímků získaných optickou mikroskopií.

Klíčová slova: Korelativní mikroskopie, pokročilá elektronová mikroskopie, mikroanalýza, umělá inteligence



www.hobra.cz



EXPERIMENTAL EQUIPMENTS OF NEUTRON PHYSICS LABORATORY FOR TESTING OF METALIC SAMPLES

MIKULA Pavol, STRUNZ Pavel

Nuclear Physics Institute ASCR, 250 68 Řež, Czech Republic, mikula@ujf.cas.cz

Abstrakt

The use of neutron scattering for structural and property studies of technologically interesting materials as well as solution of industrial problems has been expanding in the last years. Correspondingly, demands for the beam time at neutron sources have been strongly increased. After using Bragg diffraction optics based on diffraction by curved perfect crystals some experiments of materials science - usually done with small sample volumes - can be effectively performed even at a medium power reactor, in our case at LVR-15 in Řež. Examples of unique experimental results obtained namely, by medium-resolution small-angle neutron scattering, residual strain/stress measurements and conventional powder diffraction at the reactor will be presented. An access to experiments for external users is also presented.

Keywords: Neutron scattering, Neutron physics laboratory, experimental equipment, user access

1. ŘEŽ NEUTRON PHYSICS LABORATORY (NPL)

NPL is a part of Nuclear Physics Institute of the Czech Academy of Sciences established for carrying out neutron physics experiments as well as providing experimental facilities and research experience for external users. Research activities of NPL are concentrated at the medium power 10 MW (mean power) reactor LVR-15 which belongs to the Nuclear Research Institute, plc. (NRI, plc.) operating it on a commercial basis.



Fig. 1 Schematic picture of the experimental facilities of NPL at the reactor LVR-15



The reactor operates on average about 170 days per year with a pattern of operating cycles of three weeks, each followed by one week for maintenance and instrumentation development. The thermal neutron flux in the core is about $9x10^{13}$ n·cm²·s⁻¹. In total, NPL operates 8 instruments installed at 5 radial horizontal beam tubes (for experiments in nuclear physics, solid state physics and materials research) and two vertical irradiation channels (for neutron activation analysis) hired at NRI, plc.

For details see the web page <u>https://www.ujf.cas.cz/cs/oddeleni/oddeleni-neutronove-fyziky/</u>. **Fig. 1** shows a schematic picture of the arrangement of the instruments installed at the reactor LVR-15. The instruments are offered for measurements also for external users by means of CANAM project (see <u>https://www.ujf.cas.cz/cs/vyzkum-a-vyvoj/open-access/</u>). When using these instruments, a considerable emphasis is placed on the provision of entire support including high quality software for data analysis, preliminary raw data elaboration and a permanent assistance of the responsible researcher. Experiments resulting in publications are provided free of charge.

2. EXPERIMENTAL ACTIVITIES

A short description of the main experimental activities carried out with neutrons in NPL is as follows:

TKSN-400 diffractometer equipped with a bent Si single crystal monochromator and ³He position sensitive detector is dedicated to determination of internal strains in polycrystalline materials (contact farkas@ujf.cas.cz). The diffractometer uses advantages coming from focusing both in real and momentum space and yields very good resolution and luminosity. It is mainly used for mapping residual macrostrains, microstrain analysis and in situ tension/compression tests of samples in a wide range of temperatures above the room value. The instrument is equipped with the tension/compression rig (with Joule heating) for measurements under a thermo-mechanical load.

SPN-100 multipurpose diffractometer equipped with a bent Si single crystal monochromator and ³He position sensitive detector (contact <u>nemeth@ujf.cas.cz</u> or <u>strunz@ujf.cas.cz</u>). The diffractometer uses advantages coming from focusing both in real and momentum space. It is mainly used for macrostrain scanning, neutron topography, special tasks of high-resolution powder diffractometry in a short *Q*-range and Bragg diffraction optics. The instrument is equipped with a robot arm system for manipulation of the sample. The usual application is residual stress determination around the welds, in metals after processing, in ceramics e.g. functionally graded.

MAUD double-crystal diffractometer is designed for the measurements of small-angle neutron scattering (SANS) with a high *Q*-resolution. The fully asymmetric diffraction geometry of the bent Si analyser is employed to transfer the angular distribution of the scattered neutrons to the spatial distribution and to analyse the scattering curve by the 2-d PSD. The remote control of the curvatures of the monochromator and analyser crystals makes possible to tune the instrument resolution easily in the δQ range from 10⁻⁴ to 10⁻³ Å⁻¹, according to the expected size of investigated inhomogeneities. It is mainly used for investigations of the inhomogeneities (e.g. in alloys, porous media), cavities, fractal structures, precipitates etc. in the size range (0.05 ÷ 5) µm (contact ryukhtin@ujf.cas.cz). The instrument is equipped with the vacuum furnace.

MEREDIT medium resolution powder diffractometer (contact <u>hervoches@ujf.cas.cz</u>) is designed for determination crystal and/or magnetic structure of powder or solid polycrystalline materials, analysis of their phase composition, *in-situ* studies of phase transitions etc. The related measurements are complementary to the X-ray powder diffraction ones. The advantages of using neutrons consists in a deep sample penetration. Furthermore, neutrons can "see" the light elements as hydrogen and distinguish elements standing beside in the periodic table and permit possibility of studying magnetic structure. Samples can be studied at the room temperature or at low and high temperature when situating it in the cryostat or vacuum furnace.



<u>T-NDP</u> thermal neutron depth profiling facility (contact <u>vacik@ujf.cas.cz</u>) consists of a large vacuum chamber, automatic target holders and several different data acquisition systems which can be used at the same time. T-NDP is used as a nuclear analytical technique for surface studies. It utilises the existence of isotopes of elements that produce prompt monoenergetic charged particles upon the capture of thermal neutrons. From the energy loss spectra of emitted products, the depth distributions of light elements (very close to the surface) can be reconstructed. T-NDP is mainly used for study of numerous problems in solid-state physics (diffusion, sputtering), material science (corrosion), electronics, optronics, life sciences etc.

NAA facility for neutron activation analysis is dedicated to both short- and long-time irradiations performed in vertical channels of the reactor which are located at the outskirts of the reactor core (contact <u>kucera@ujf.cas.cz</u>). For short-time irradiation (typically 0.5-3 min.) in PE-rabbits, a pneumatic system is available which connects the dry vertical channel behind a Be reflector to a measurement station outside the reactor hall. Long-time irradiation (several hours to several days) is carried out in sealed Al-cans in the wet vertical channels located in the Be reflector of the reactor core. The irradiated cans are transported to hot cells for disassembling and further analysis. NAA provides a highly accurate and low-level characterization of various materials by determining up to 40 elements.

3. SAMPLE ENVIRONMENT (PHOTOS)



Fig. 2 Robotic arm at SPN-100 for sample manipulation



Fig. 3 Vacuum furnace for powder diffraction (<10³ °C).



Fig. 4 Close cycle cryostat for powder diffraction (10-298 K).



Fig. 5 Vacuum furnace for SANS at MAUD. (up to 1400°C).



Fig. 6 Deformation rig (60 kN) with Joule heating.



ACKNOWLEDGEMENT

Measurements are carried out at the CANAM instruments of NPL in NPI CAS Řež installed at the CICRR infrastructure LVR-15, which is financially supported by the Ministry of Education and Culture - project LM2023041. The authors acknowledge support from the Czech Academy of Sciences in the frame of the program "Strategie AV21, No. 23".



www.anamet.cz



ZKUŠENOSTI Z POUŽITÍ ALITOVANÝCH ELEKTROD NA PÁNVOVÉ PECI

VRÁNA František, ODEHNALOVÁ Adéla, FILA Pavel, BALCAR Martin

ŽĎAS a.s. Strojírenská 675/6, 591 01 Žďár nad Sázavou 1, Česká republika

Abstrakt

V elektrických obloukových pecích a na ně navazujících pánvových pecích jsou používány grafitové elektrody na tavení a dohřívání oceli. Tyto elektrody jsou opotřebovávány nejen kontaktem s tekutou ocelí, ale také oxidací pecní atmosférou.

Ve ŽĎAS, a.s. byly ověřovány grafitové elektrody s povrchovou úpravou. Povrchová úprava formou alitace představuje nanesení několika vrstev různých kovů, jenž chrání elektrodu před oxidací. V důsledku by mělo být dosaženo výrazně nižší oxidace povrchu elektrody a snížení spotřeby grafitových elektrod na vyrobenou tunu oceli. Ochranný povlak je vyráběn společností Graphite COVA GmbH, Röthenbachu a.d. Pegnitz, Německo. Článek zmiňuje průběh a výsledky experimentálních zkoušek.

Klíčová slova: Pánvová pec, grafitové elektrody, sekundární metalurgie

PROBLEMATIKA OPOTŘEBENÍ ELEKTROD

Opotřebení obloukem

Ve chvíli, kdy je grafitová elektroda v kontaktu s roztavenou ocelí a probíhá elektrický oblouk, je spodek elektrody přímo opotřebováván elektrickým obloukem a částečně dochází k rozpouštění určitého množství grafitu v tavenině kovu a strusky.

Tomuto opotřebení nelze zabránit, protože je přímým důsledkem používání pro účel ohřevu taveniny.

Opotřebení oxidací

Povrch grafitové elektrody při teplotě nad 650 °C a za přístupu kyslíku [1] velmi intenzivně oxiduje.

Oxidací elektrody na jejím povrchu se postupně mění tvar elektrody a ta získává jehlanovitý tvar, jak je uvedeno na obr. 1. Nerovnoměrné opotřebení a vznik jehlanovitého tvaru elektrody je důsledkem doby expozice elektrody při teplotách nad 650 °C.

Opotřebení oxidací lze zmírnit buď snížením času, po který jsou elektrody vystavené žáru vyššímu, než je teplota 650 °C nebo omezením přístupu kyslíku.



Obr. 1 Standardní grafitové elektrody



OCHRANA ELEKTROD PROTI OXIDACI

Chlazení elektrod

Při výrobě a zpracování oceli na elektrických obloukových pecích (EOP) a pánvových pecích (LF) je možné chladit elektrody ostřikem vodou. Ostřikem a následným odpařováním vody jsou elektrody ochlazovány, což brání jejich oxidaci. Ostřik elektrod vodou se provádí na části elektrod nad víkem pece a proud vody je kontrolován tak, aby voda nestékala po elektrodě do pece a taveniny. [2] Ochrana elektrod proti oxidaci ostřikováním vodou má omezenou účinnost vlivem vysokých teplot v oblasti nad hladinou kovu a pod víkem pece. Účinnost daného způsobu chlazení elektrod se tak výrazně zvyšuje ve fázích tavby, kdy je přerušen elektrický oblouk a elektrody jsou vysunuty nad víko pece.

Omezení přístupu kyslíku k povrchu elektrody

Snížení opotřebení elektrod oxidací je možné i způsobem, který zabrání přímému kontaktu grafitu s kyslíkem. Ochrana se v současnosti provádí povlakováním elektrod speciálními slitinami, které se nazývá alitace. V technické praxi se ochrana grafitových elektrod provádí nanášením několika vrstev kovu a slitin. Ochranné povlaky jsou ve dvou variantách, černá a bílá. Bílá varianta obsahuje ve třech

Tab. 1 Parametry ochranné vrstvy elektrod [3]

Parametr	Jednotka	Hodnota
Tloušťka	mm	0,5 až 0,8
Rezistivita	Ω*µm	0,07 až 0,10
Neprodyšnost na 900 °C	hodin	> 50
Teplota rozpadu	°C	> 1850
Zpoždění oxidace grafitu	hodin	10 až 20

vrstvách od povrchu elektrody kombinaci hliníku a výrobcem neuvedených složek, hliníkových slitin a čistého hliníku. Černá varianta má navíc na povrchu vrstvu výrobcem neuvedeného kovu a vrstvu grafitu. Parametry ochranné vrstvy jsou v **tabulce 1**. [3]

Podle výrobce se hliníková vrstva má při teplotě cca 600 °C roztavit a jako kapalina přilnout k povrchu elektrody, čímž dále zabraňuje přístupu kyslíku. [3]

EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE

Pro provozní ověření přínosů použití alitovaných grafitových elektrod v porovnání s běžnými grafitovými elektrodami, které jsou v současnosti dodávány s impregnací proti oxidaci, byla využita kvalita černých alitovaných elektrod průměru 255 mm. Ověření a provozní zkoušky byly realizovány ve ŽĎAS, a.s. na LF pro zpracování 20 tun tekutého kovu.

Dokumentace alitovaných elektrod

Pro experimentální ověření v Ocelárně ŽĎAS, a.s. bylo nakoupeno 6 ks alitovaných elektrod o hmotnosti cca 159 kg/ks, při celkové hmotnosti 898 kg. Před zahájením instalace alitovaných elektrod na pánvovou pec (LF) byly elektrody vizuálně kontrolovány a označeny pořadovými čísly 1A až 7A, jak je zřejmé z **obr. 2**.

Obr. 3 dokládá zjištěnou vadu povrchu jedné z dodaných elektrod s označením 5A. Vada se vyskytovala lokálně a byla charakteru porušení souvislosti vrstvy alitace a přítomnosti oxidů kovu.



Obr. 2 Zkušební alitované elektrody



Obr. 3 Vady povrchu elektrody 5A



Ověření alitovaných elektrod na LF

Před instalací alitovaných elektrod na jedno z ramen LF byla provedena vizuální kontrola stavu měděných kontaktních ploch, které dokumentuje obr. 4.

První alitovaná elektroda byla instalována na jedno ze tří ramen LF na standardní grafitovou elektrodu. Následně bylo provedeno vážení všech tří instalovaných sloupců elektrod a výchozí váhy byly zaznamenány.

Alitované elektrody byly v průběhu ověřování postupně nasazovány na stejné rameno LF. V daném časovém rámci tak bylo možné porovnávat vizuální rozdíly mezi opotřebením různých typů elektrod instalovaných na jednotlivých ramenech. Současně bylo možné provádět průběžnou kontrolu spotřeby grafitových elektrod na jednotlivých ramenech LF.



Obr. 4 Stav měděné svorky ramene pro uchycení elektrody na LF

V rámci experimentální práce bylo dohlíženo na stav měděných kontaktních ploch pro uchycení elektrody v rameni a přenos elektrického proudu. Po dobu zpracování 7ks alitovaných elektrod nebylo zaznamenáno nestandardní opotřebení ani nebyly pozorovány stopy lokálního přehřívání měděných ploch.

Obr. 5 dokumentuje vzhled přechodu standardní GE na alitovanou GE. Je patrné výrazně rozdílné opotřebení elektrod oxidací.

Na **obr. 6** pak můžeme pozorovat výrazný rozdíl v opotřebení použitých typů elektrod oxidací ve finální fázi ověření alitovaných elektrod. Na uvedeném snímku je zřejmý přechod mezi dolní alitovanou elektrodou a následující horní standardní grafitovou elektrodou.

Z uvedených **obr. 5** a **obr. 6** lze učinit závěr, že alitované GE vykazují vyšší odolnosti proti opotřebení oxidací, resp. jsou schopné výrazně delší dobu odolávat oxidaci za vysokých teplot v podmínkách zpracování taveniny na LF.

Na **obr. 7** je dokumentována vada alitované GE 5A, která souvisí s poškozením uvedeným na **obr. 3**. V průběhu zpracování GE 5A došlo po tepelné expozici k uvolnění vrstvy alitace a odkrytí povrchu původní GE.

Obr. 8 uvádí případ poškození alitace GE po běžné tepelné expozici a následném nenuceném ochlazení celé elektrody. Poškození alitace bylo zřejmě způsobenou vlivem rozdílných teplotních roztažností použitých materiálů a grafitové elektrody. Při sledování povrchu elektrody v průběhu následného zpracování nebylo vizuálně pozorováno, že by zdokumentované poškození alitace dále vedlo ke snížené ochraně GE a místnímu nadměrnému opotřebení nebo oxidaci.



Obr. 5 GE vpravo – přechod alitovaná (horní)/standardní (dolní)



Obr. 6 Přechod standardní (horní)/ alitovaná (dolní)





Obr. 7 Vada GE 5A – lokální ztráta vrstvy alitace v místě původního poškození



Obr. 8 Vada GE 4A - prasklina vrstvy alitace

Z pohledu spotřeby grafitových elektrod bylo hodnocení 6 ks alitovaných elektrod realizováno v rozsahu sledování 160 taveb od první instalace až do okamžiku spotřebování poslední alitované elektrody ve sloupci elektrod na daném rameni LF. Po dobu experimentu bylo na LF zpracováno **2.833 tun taveniny**.

V rámci experimentu bylo:

na 1. rameni LF spotřebováno 1306 kg GE,

na 2. rameni LF spotřebováno 1375 kg GE,

na 3. rameni LF spotřebováno 271 kg GE a 898 kg alitovaných GE, tj. celkem 1169 kg GE.

Výsledné spotřeby GE na jednotlivých ramenech dokládají rozdílnou spotřebu standardních GE a alitovaných GE. Celková průměrná spotřeba GE v rámci taveb zohledněných v experimentu činí **1,36 kg/t** tekutého kovu. Při uvážení rozdílných spotřeb standardních GE a alitovaných GE lze předpokládat, že při instalaci alitovaných GE na všechna tři ramena LF by spotřeba GE klesla a teoreticky průměrná spotřeba běžných GE je na úrovni **1,42 kg/t** a alitovaných elektrod na úrovni **1,19 kg/t** tekutého kovu. Použitím alitovaných elektrod by tedy bylo možné dosáhnout **úspory cca 16 %**.

ZÁVĚR

Provedené experimentální práce ve ŽĎAS, a.s., ve spolupráci se společnostmi Graphite COVA GmbH a Advanced Carbon Technology s.r.o., Praha, byly zaměřeny na ověření přínosů použití grafitových elektrod s povrchovou úpravou alitací. Průběh a výsledky experimentálních prací potvrzují nižší opotřebení grafitových elektrod s alitací. Nižší opotřebení bylo doloženo jednak vizuální kontrolou míry opotřebení oxidací povrchu elektrod a jednak výpočtem skutečné úspory ve spotřebě grafitových elektrod při použití GE s alitací. Používání GE s alitací vyžaduje vyšší nároky na šetrnou manipulaci s elektrodami jak při jejich převozu, tak při instalaci. Mechanické poškození vrstvy alitace může vést ke snížení ochranného účinku při použití na pánvové peci.

Na základě provedených prací a znalosti rozdílné intenzity působení kyslíku při zpracování taveniny na EOP a LF lze předpokládat, že výrazně vyšších úspor ve spotřebě GE je možné v případě GE s alitací očekávat na EOP.

LITERATURA

- [1] SCHWEITZER, D. G., GURINSKY D.H., KAPLAN, E., SASTRE, C. A Safety Assessment of the Use of Graphite in Nuclear Reactors Licenced by the U.S. NRC. 1. vyd. Upton, New York: Brookton National Library, 1987.
- [2] Udo, Eidi.Cooling apparatus for electric arc fonace electrodes. IPC: US07. Spojené státy americké, Patent US4852120A. Dostupný také z: <u>http://patents.google.com/patent/US4852120A/en</u>
- [3] BOLIJOV Adrian, Protective Coating for Graphite Electrodes, vyd. Graphite Cova, D-90552 Röthenbach/Peg. Grünthal 1-6



STANOVENÍ AKTUÁLNÍCH MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ NÁDOBY KONVERTORU POMOCÍ METODY SPT

^{1,2}KANDER Jan

¹Materiálový a metalurgický výzkum, s.r.o. Pohraniční 693/31, 703 00, Ostrava ²VŠB-TUO, Fakulta materiálově-technologická, 17. listopadu 2172/15, 708 00, Ostrava

Abstrakt

Metoda SPT (small punch test) je velmi výhodná pro hodnocení mechanických, ale i křehkolomových vlastností komponent, obzvlášť v případech, kdy není k dispozici dostatek materiálu pro standardní mechanické zkoušení nebo je nutné materiál hodnotit nedestruktivně. Testovaný materiál je odebírán pomocí speciálního zařízení, které zajišťuje naprosto minimální odběr materiálu, a proto nejsou po odběru nutné jakékoliv opravy. Z odebraných vzorků, je mimo mechanické vlastnosti, možné stanovit chemické složení či metalografickou analýzu, tím je možné poskytnout opravdu komplexní materiálovou analýzu při minimálním odběru materiálu. Materiálový a metalurgický výzkum, s.r.o má více než 20 let zkušeností s metodou SPT a její průmyslovou aplikací, jeden z řešených problémů bude prezentován i v tomto článku.

Klíčová slova: Small punch test, aktuální materiálové vlastnosti, zbytková životnost, kyslíkový konvertor

1. ÚVOD

Small punch test (SPT) je relativně nedávno vyvinutá metoda pro hodnocení materiálových vlastností součástí, která minimalizuje množství odebraného zkušebního materiálu. Své využití nachází nejen v energetice, pro kterou byla původně vyvíjená, ale i v mnoha jiných průmyslových odvětvích, a nově je rovněž implementovaná do evropských norem [1]. Velkou výhodou této metody je používání miniaturizovaných zkušebních tělísek, která jsou vyráběna ze vzorků odebíraných speciálním nástrojem (obr. 1) přímo na provozované součástí bez negativního ovlivnění její funkce a také bez jakýchkoliv oprav, pouze s nutností odstávky. Tuto metodu tak lze použít i v případech, kdy je potřeba získat zkušební tělesa z velmi úzkých vrstev materiálu, například z oduhličených vrstev, segregací, povlaků apod. Dalším typickým příkladem použití metody SPT je hodnocení materiálových charakteristik konkrétních oblasti svarových spojů nebo depozitních vrstev. Vzhledem k tomu, že z odebraných vzorků lze stanovit chemické složení i je podrobit metalografické analýze, tak lze metodu SPT s úspěchem využít ke komplexním analýzám aktuálních materiálových vlastností či pro stanovení zbytkové životnosti dané komponenty.



Obr. 1 Zařízení pro odběr malých vzorků [1]



Zkušebními tělísky metody small punch test jsou malé disky o průměru d = 8 mm a tloušťce t = 0,5 mm [1, 2, 3], které jsou protlačovány v matrici razníkem s hemisférickým vrcholem nebo keramickou kuličkou o průměru d = 2 nebo 2,5 mm [1, 4]. Schematicky je tento princip zachycen na obr. 2.



Obr. 2 Princip metody SPT [5]

Během testu je snímána aplikovaná síla na vzorek (F) a posuv razníku (v) nebo deflexe vzorku (u). Takto vzniklou závislost síla – posuv razníku (deflexe vzorku) je možné rozdělit do pěti charakteristických oblastí [5] viz **obr. 3**:

- (1) Elastická oblast
- (2) Elasticko-plastický přechod (odklon od linearity)
- (3) Lokální průhyb, přechod do režimu membránového napětí
- (4) Režim membránového napětí
- (5) Finální lom (protržení)



Obr. 3 Typická závislost síla-posuv razníku pro metodu SPT [5]

Z výše uvedené křivky je stanoveno několik zásadních bodů a hodnot, které jsou dále využity pro stanovení mechanických a jiných vlastností [1, 6]:



 F_e – síla na elasticko-plastickém přechodu, která charakterizuje přechod od linearity do oblasti spojené se vznikem plastické deformace a jejím šířením skrz celou tloušťku vzorku. Síla je definována průsečíkem dvou tečen ke křivce síla-posuv razníku (na obr. 3 by byla jedna tečna k oblasti 1 a druhá k oblasti 3). Při porovnání se standardní tahovou zkoušku odpovídá síla F_e mezi kluzu (N).

 \mathbf{F}_{m} – maximální síla, které je během testu dosaženo. Vzhledem ke standardní zkoušce tahem bychom k síle F_{m} vztahovali mez pevnosti (N).

 v_m , u_m – posuv razníku nebo deflexe vzorku při dosažení síly F_m (mm).

 E_{SP} – energie testu stanovená pro danou závislost síla-posuv razníku jako plocha pod křivkou, přičemž dolní mezí je 0 a horní mez tvoří F_m . Hodnota E_{SP} je podstatná v případě, kdy potřebujeme stanovit tranzitní teplotu (mJ).

Stanovení mechanických vlastností z hodnot SPT testu je realizováno formou korelací vůči standardní zkoušce tahem [1]. Rovnice (1) a (2) udávají základní vztahy pro stanovení meze kluzu a meze pevnosti.

$$R_{p0.2} = \alpha \cdot \frac{F_e}{h_0^2}$$
(1)
$$R_m = \beta \cdot \frac{F_m}{h_0 \cdot v_m}$$
(2),

kde:

R_{p0,2} – mez kluzu (MPa)

- R_m mez pevnosti (MPa)
- Fe síla na elasticko-plastickém přechodu (N)
- ho tloušťka malého diskového vzorku (mm)

v_m – posuv razníku (mm)

α, β – korelační koeficienty

2. EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL A METODY

Předmětem zájmu byla nádoba konvertoru pro zpracování oceli vyrobená z oceli P460NH, kdy po porušení vyzdívky vznikly obavy, zda vsázka nemohla tepelně degradovat i materiál konvertorové nádoby. Vzhledem ke snaze minimalizovat dobu odstávky byly odebrány malé vzorky a použita metoda SPT, protože odpadá nutnost opravy v místě odběru vzorku. Vzorky byly odebrány speciálním zkušebním zařízením SSamTM⁻² fy Rolls-Royce, **obr. 4**. Odběr materiálu byl proveden na třech místech, dvakrát v místech, kde došlo k porušení vyzdívky (A, B), třetí referenční vzorek byl odebrán na protilehlém místě (C).



Obr. 4 Odběrové zařízení Rolls-Royce SSamTM⁻² s magnetickou upínkou


Z odebraných vzorků bylo následně stanoveno chemické složení metodou spalovací a ICP OES, provedena metalografická analýza pro ověření úrovně degradace struktury a jejího případného tepelného ovlivnění a v neposlední řadě byly metodou SPT vyhodnoceny mechanické vlastnosti konvertorové nádoby.

Výsledky analýzy chemického složení (**Tab. 1**) potvrdily deklarovanou jakost oceli P460NH pouze s drobnou kladnou odchylkou v obsahu uhlíku, která však bezesporu nemohla negativně ovlivnit mechanické vlastnosti konvertoru ani průběh jejich možné degradace.

Prvek	С	Mn	Si	Р	S	Cu	Cr	Мо	Ni	v
konvertor	0.24	1.63	0.51	0.015	0.02	0.33	0.05	0.01	0.20	0.17
P460NH [7]	max. 0.20	1.10 1.70	max. 0.60	max. 0.025	max. 0.010	max. 0.70	max. 0.30	max. 0.10	max. 0.80	max. 0.20

Tab. 1 Chemické složení nádoby konvertoru [hm. %]

Z každého z odebraných vzorků byla připravena tři zkušební tělíska pro penetrační testy při laboratorní teplotě. Z jejich výsledků byly následně pomocí známých korelačních vztahů stanoveny mechanické vlastnosti (mez kluzu, mez pevnosti), které jsou uvedeny v **tabulce 2**. Vzhledem k velmi podobné úrovni dosažených mechanických vlastností bez ohledu na místo odběru je téměř jisté, že k tepelnému ovlivnění pláště konvertoru nemohlo dojít. Přesná tloušťka pláště v místě odběru sice není známá, avšak spadá do intervalu 60 až 100 mm, vůči kterému jsou získané výsledky v **tabulce 2** porovnány. Lze tak konstatovat, že mechanické vlastnosti splňují limity předepsané normou v celém tomto intervalu. Vyšší mez kluzu může být zapříčiněna zvýšeným obsahem uhlíku.

Vzorek	Zk. těleso	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	
	1	538	611	
А	2	540	651	
	3	535	637	
	1	526	656	
В	2	541	661	
	3	554	663	
	1	534	652	
С	2	555	670	
	3	553	646	
	P460N	H [7]		
60 mi	m < t ≤ 100 mm	400	540-710	

Tab. 2 Mechanické vlastnosti konvertorové nádoby

Mikrostrukturní rozbor byl proveden na výbrusu rovnoběžném s rovinou odběru vzorku. S touto orientací je spojený atypický vzhled struktury zejména při menším zvětšení, přestože se stále jedná o obvyklou řádkovitost feriticko-perlitické mikrostruktury, obr. 5-vlevo. Při větším zvětšení se pak ukázalo, že zatímco v tmavých oblastech stále převládala původní lamelární perlitická struktura, třebaže i tam se tyto lamely již rozpadaly, v oblastech světlých byl rozpad původní feriticko-perlitické struktury výraznější a byl doprovázen jak rozpouštěním perlitu, tak hlavně vznikem hrubých částic cementitu, vyloučených primárně na hranicích zrn,



obr. 5-vpravo. Je však třeba zdůraznit, že mikrostruktura všech tří analyzovaných vzorků byla kvalitativně shodná, žádný z nich nevykazoval pokročilejší stádium rozpadu mikrostruktury, směsnou strukturu, která by ukazovala na přehřátí spojené s přechodem přes teplotu A_{c1}, či známky počínajícího creepového poškození.



Obr. 5 Vzorek B – feriticko-perlitická jemnozrnná mikrostruktura, přehledný snímek



Obr. 6 Vzorek B – detail feriticko-perlitické mikrostruktury

Proběhlé změny v mikrostruktuře i stav jednotlivých fází jsou lépe vidět na detailních snímcích při velkém zvětšení získaných pomocí skenovací elektronové mikroskopie na přístroji JEOL JSM 5510 v režimu zobrazení v sekundárních elektronech. Na obrázcích 6 i 7 jsou stále patrné zbytky původního lamelárního uspořádání perlitu, náznaky sbalování lamel cementitu i hrubší kulovité částice cementitu vylučující se na hranicích zrn a mezi potenciálně poškozeným a referenčním vzorkem nejsou ve struktuře vůbec žádné rozdíly.



Obr. 6 Vzorek B – feriticko-perlitická mikrostruktura a hrubé částice cementitu na hranicích zrn



Obr. 7 Referenční vzorek C –mikrostruktura a hrubé částice cementitu na hranicích zrn

3. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Jak chemické složení nádoby konvertoru, tak i její mechanické vlastnosti jsou (až na nevýznamnou kladnou odchylku v obsahu uhlíku) v plné souladu s materiálovou normou. Reliéf, který byl u sledovaných vzorků pozorován (střídání světlých a tmavých oblastí), je způsoben tím, že rovina výbrusu je rovnoběžná s rovinou válcování a je pro plošně tvářené výrobky (plechy) a feriticko-perlitickou strukturu obvyklý. Ovšem u mikrostruktury se již projevily známky jejího rozpadu. Ocel P460NH se až na výjimky dodává ve stavu po



normalizačním žíhání a měla by tedy mít ve výchozím stavu mikrostrukturu tvořenou feritem a lamelárním perlitem, případně i s určitým podílem bainitu. Dlouhodobé provozování ocelí za zvýšené teploty ovšem vede v důsledku uplatnění tepelně aktivovaných procesů (nekonzervativní pohyb dislokací, difúze, precipitace a rozpouštění sekundárních fází) k mikrostrukturním změnám, které předcházejí vzniku a rozvoji defektů. Hodnocení stupně rozpadu a přeměny feriticko-perlitické a feriticko-bainitické struktury vlivem dlouhodobé expozice na zvýšené teplotě lze provést za použití etalonů pro nízkolegované žárupevné oceli [8]. Tato proměna je odstupňována do šesti stádií (A až F) a tyto stupně degradace (a jí odpovídající změny mikrostruktury během dlouhodobé creepové expozice) jsou přehledně uvedeny na obr. 8 jak pro feriticko-perlitickou, tak i pro feriticko-bainitickou mikrostrukturu. Na základě tohoto srovnání lze degradaci struktury konvertorové nádoby ohodnotit stupněm C/D. Nicméně, zjištěná mechanické vlastnosti jsou stále dostatečně vysoké, rozpad struktury a hlavně vylučování hrubých částic cementitu na hranicích zrn může být určitou hrozbou pro houževnatost oceli a může zapříčinit vzrůst přechodové teploty křehký-houževnatý stav (FATT).



Obr. 8 Klasifikace strukturních stavů podle sferoidizace struktury [8]

4. ZÁVĚR

Pomocí výše uvedených analýz bylo pomocí metody SPT prokázáno, že konvertorová nádoba nevykazuje žádné známky dodatečného tepelného ovlivnění či degradace mikrostruktury nad rámec běžných strukturních změn, ke kterým dochází během jejího standardního provozu. Pozorované strukturní změny se zatím nijak negativně neprojevily na užitných vlastnostech materiálu nádoby, a proto mohla být bez potíží uvedena zpět do provozu.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl v rámci Institucionální podpory dlouhodobého a koncepčního rozvoje výzkumné organizace v roce 2024, kterou poskytlo Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR.

LITERATURA

[1] EN 10371. Metallic materials – Small punch test method. Belgium: European committee for standardization, 2021.



- [2] GUAN, K., WANG, D., DOBROVSKÁ, J., MATOCHA, K. Evaluation of the ductile-brittle transition temperature of anisotropic materials by small punch test with un-notched and U-notched specimens. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019, vol. 102, pp. 98-102.
- [3] ARANKUMAR, S. Overview of small punch test. *Met. Mater. Int.* 2020, vol. 26, pp. 719-738.
- [4] MATOCHA, K. Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů. Ostrava: Vysoká škola báňská-technická univerzita, 2010. 73 p. ISBN 978-80-248-2223-5
- [5] LUCON, E., BENZING, J., HRABE, N. Development and Validation of Small Punch Testing at NIST. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) – 8303. 2020.
- [6] BRUCHHAUSEN, M. et al. Recent developments in small punch testing: Tensile properties and DBTT. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2016, VOL. 86, PP. 2-10.
- [7] ČSN EN 10028-3. Ploché výrobky z ocelí pro tlakové nádoby a zařízení Část 3: Svařitelné jemnozrnné oceli, normalizačně žíhané. Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [8] NEEDHAM, N. G., CANE, B. J. Creep strain and rupture predictions by cavitational assessment in 2. 25 Cr-1 Mo steel weldments. In. *Proc. of Int. Conf Advances Life Prediction Methods, ASME NO 65*, Albany, N.Y., 1983.



www.promatpraha.cz



VYUŽITÍ POKROČILÝCH NUMERICKÝCH SIMULACÍ PRO OPTIMALIZACI PLYNULÉHO LITÍ OCELI

¹TKADLEČKOVÁ M., ¹CIBULKA J., ¹HUCZALA T., ¹LASOTA M., ¹CUPEK J., ²KOTAS P., ²JELÍNEK D.

¹TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město 739 61 Třinec, Česká republika, <u>research@trz.cz</u>

²MAGMA Gießereitechnologie GmbH, org. Složka, K Vinici 1256, 530 02 Pardubice, Česká republika

Abstrakt

Virtuální pokročilé numerické simulace dnes hrají již nezastupitelnou pozici při optimalizaci metalurgických procesů. Díky poměrně široké nabídce sofistikovaných softwarových systémů lze numerické analýzy využívat jak při verifikaci dějů primární výroby, tak i dějů spojených s odléváním a tuhnutím oceli. Cílem předkládaného příspěvku je prezentace zkušeností s využíváním software MAGMASOFT[®] při studiu plynulého odlévání ocelových předlitků v podmínkách TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN, a.s.

Klíčová slova: Ocel, plynulé lití, simulace

1. PLYNULÉ ODLÉVÁNÍ OCELI

TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s. provozují dvě zařízení plynulého odlévání oceli. Zařízení plynulého odlévání č.1 je blokové, pětiproudé a je přizpůsobeno pro sekvenční odlévání kruhových formátů o průměru 320, 410, 470, 525 a 600 mm v délce 2,5 až 6,4 m, ale také bloků obdélníkového tvaru o rozměrech 300 x 350 mm v délce 4 až 6,5 m. Zařízení plynulého odlévání č. 2 je sochorové a umožňuje odlévání sochorů o rozměru 155 × 155 mm, v délce 10 až 12 m. [1]

Během plynulého odlévání je tavenina oceli řízeně průběžně transformována na tuhý stav požadovaného rozměru a tvaru předlitku určeného k následnému tváření. Při plynulém způsobu odlévání je licí pánev s taveninou oceli umístěna na otočný licí stojan licího zařízení. Odtud je ocel přes stínicí trubici odlévána do mezipánve. Z mezipánve je ocel vedena ponornými výlevkami do oscilujících krystalizátorů (primární zóna



chlazení). Pod krystalizátorem je soustava vodících a opěrných válečků (sekundární zóna chlazení) včetně chladících trysek, jež zajišťují tažení, přetváření a chlazení licího proudu oceli [2].

Významnou úlohu při plynulém odlévání oceli sehrávají krystalizátory, které určují tvar předlitku. Krystalizátory jsou tvořeny ocelovým pláštěm a měděnou vložkou, která zajišťuje díky vysoké tepelné vodivosti rychlý odvod tepla a vznik licí kůry předlitku. Při tuhnutí oceli vzniká mezi vnitřní stěnou krystalizátoru a licí kůrou předlitku plynová mezera, která brání intenzivnímu chlazení předlitku. Z tohoto důvodu bývá krystalizátor lehce zúžený ve své dolní části. Obvyklý úběr představuje 1 % na jeden metr délky krystalizátoru. Vytahování předlitku z krystalizátoru je zajištěno díky oscilaci krystalizátoru, dostatečnému mazání licími prášky (které chrání i hladinu oceli v krystalizátoru před sekundární oxidací), a soustavou tažných a vodících válečků. Dnes se začíná ve větší míře prosazovat hydraulické zajištění oscilace, které umožňuje například

Obr. 1 Schéma dějů v oblasti krystalizátoru [8]



asymetrický průběh oscilace a vede tak k redukci povrchových vad [3-7]. Schéma dějů v oblasti krystalizátoru je zachyceno na **Obr.1**.[8]

Po opuštění krystalizátoru je předlitek tedy tvořen pouze tenkou licí kůrkou s tekutým jádrem. Aby bylo zajištěno utuhnutí předlitku v celém jeho objemu ještě před jeho dělením, je předlitek v sekundární zóně ochlazován soustavou vodních ostřikových zón. Protože na předlitek s tekutým jádrem působí také ferostatický tlak spolu s gravitační silou, ale i kombinace tažných a rovnacích sil vodících a tažných válečků, je třeba zajistit takovou rychlost tažení a intenzitu chlazení, aby měla výsledná makrostruktura předlitku odpovídající kvalitu.[9]

Způsob krystalizace a tuhnutí plynule litého ocelového předlitku lze také ovlivnit použitím tzv. elektromagnetického míchání tekutého jádra plynule litého předlitku. Kromě elektromagnetického míchání v oblasti v krystalizátoru (M-EMS = Mould ElectroMagnetic Stirrer) či sekundárního chlazení (S-EMS) se dnes prosazují i míchače v oblasti konce tzv. metalurgické délky (neboli konce tekutého jádra předlitku), tzv. F-EMS = Final Electromagnetic Stirrer). V tomto místě se také začíná poslední dobou zavádět i tzv. Dynamic Soft Reduction, neboli redukce průřezu předlitku. [10-12]

Na konci sekundární zóny, kdy je předlitek tuhý v celém svém objemu, dochází k jeho dělení, např. kyslíkopalivovými hořáky. Obvykle jsou předlitky za dělícím zařízením ukládány na tzv. chladícím loži, kde dochází k dalšímu ochlazování předlitku sáláním, prouděním a vedením tepla do okolí a chladícího lože.[3]

2. STRUKTURA PLYNULE LITÉHO OCELOVÉHO PŘEDLITKU

Růst krystalů a utváření struktury po délce předlitku je zachyceno na **Obr.2**. Typická struktura plynule litých předlitků v příčném řezu je pak schematicky zachycena na **Obr. 3**. Je patrné, že primárně vzniká jemná rovnoosá struktura. Se snížením odvodu tepla se začnou vytvářet protáhlé kolumnární krystaly, které mohou dle způsobu odvodu tepla přerůstat až v dendritický růst (zejména při výrazné rychlosti ochlazování). Ve středu předlitku pak detekujeme různě orientované rovnoosé krystaly.







Obr.3 Schéma struktury plynule litých předlitků v příčném řezu pro formát a) obdélníkový, b) kruhový [15]

Při vytváření makrostruktury plynule litého ocelového předlitku hrají velkou roli právě okrajové podmínky odlévání. Například **Sun a kol** ve svém článku porovnával míru vlivu intenzity míchače v oblasti krystalizátoru,

licí teploty a licí rychlosti na výslednou makrostrukturu. Nejvýrazněji makrostrukturu za zvolených podmínek odlévání ovlivnila intenzita míchání, kdy byl testován proud 200 A, 300 A, 400 A a 450A. Při vyšší hodnotě proudu se zvětšil rozsah rovnoosé oblasti a současně docházelo k zmenšení velikosti zrna. [16]

3. METODY VERIFIKACE PROCESU PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI

Z výčtu výše uvedených informací je zřejmé, že metalurgie oceli je složitá. V průběhu výroby a zpracování taveniny oceli dochází k řadě fyzikálně chemických jevů, z nichž některé lze v reálných podmínkách ověřovat jen omezeně nebo vůbec. Předpokladem kvalitativně stabilní výroby je však pak právě správné zvládnutí nastavení okrajových podmínek technologie odlévání, respektive jejich verifikace a optimalizace. Zvláště v náročných metalurgických podmínkách dnes proto při optimalizaci postupů výroby a odlévání oceli hraje nezastupitelnou pozici tzv. metoda modelování, a to jak fyzikální tak numerické modelování.

Numerické modelování (vytvoření numerického modelu reálného systému), nebo též numerická simulace procesů (simulace různých podmínek procesu na modelu) představuje metodu verifikace, kdy je zkoumaný systém (proces) popsán soustavou parciálních diferenciálních rovnic (PDR) doplněných i o rovnice empirické povahy a řešených numerickými metodami. Obecně se pomocí numerických metod hledá vhodné numerické řešení (výpočet, algoritmus) PDR, tedy takové, kdy je velmi obtížné nalezení přesného analytického řešení. Každé numerické řešení je charakterizováno stabilitou algoritmu výpočtu, konvergencí a mělo by rovněž obsahovat i odhad chyby [17]. Pro uživatele by přímé řešení rovnic bylo komplikované. Aby mohla být aplikována numerická metoda, je vhodné systém proto rozčlenit na menší objemové úseky (budeme-li uvažovat o třírozměrných úlohách) a v těchto dostatečně malých podoblastech základní geometrie hledat diskrétní nebo aproximační řešení. Výsledkem řešení je hodnota hledané veličiny v diskrétním bodě tzv. výpočetní sítě. Podle typu úlohy lze volit nejčastěji ze tří numerických metod, a to metody konečných diferencí (FDM), konečných objemů (FVM) a konečných prvků (FEM).[18]

Je zřejmé, že značnou nevýhodou numerického modelování je náročnost sestavování modelu a výpočtového programu (algoritmu), zejména pro komplikované systémy a děje. K řešení různých procesů z oblasti přenosu hmoty, hybnosti a energie jsou však dnes k dispozici speciální a mnohdy univerzální programové produkty, které již obsahují matematické modely proudění a tuhnutí a algoritmy jejich řešení. Jedním z těchto software je MAGMASOFT[®], který je také aktuálně využíván při studiu plynulého odlévání ocelových předlitků v TŘINECKÝCH ŽELEZÁRNÁCH, a.s..

4. MODELOVÁNÍ PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI S VYUŽITÍM SW MAGMASOFT

MAGMASOFT® je modulární software určený pro komplexní 3D plně prostorový numerický výpočet a simulaci dynamiky proudění kovové taveniny a následné tuhnutí oceli.[19] Simulace plynulého odlévání oceli je realizována ve verzi MAGMASOFT 6.0 vybaveného modulem Continuous Casting (CC modul). MAGMA CC, dle mota "committed to casting excellence", poskytuje robustní řešení pro kontinuální lití oceli s důrazem na návrh procesních podmínek pro optimalizaci kvality výrobků i díky implementovanému algoritmu DOE (Design of Experiment).

Jako většina software tohoto typu uvažuje s rozdělením výpočtu do tří etap. První etapou je tvorba geometrie analyzované části procesu a definice vstupních dat, v průběhu druhé etapy probíhá vlastní výpočet a poté následuje třetí etapa s vyhodnocením výsledků.

4.1 Zkušenosti s přípravou geometrie

Z pohledu uživatele nabízí SW velmi příjemné a intuitivní prostředí tvorby geometrie. Modul pro přípravu geometrie obsahuje řadu nástrojů, které tvorbu konstrukčních prvků zařízení plynulého odlévání značně



usnadňují. Např. zde existuje nástroj pro přímou definici tvaru, délky a pozice analyzovaného licího proudu. V případě elektromagnetického míchače lze definovat počet vinutí.

Výpočet tuhnutí oceli tak lze, obdobně jako v případě jiných SW, realizovat buď na zjednodušené geometrii odlévaného licího proudu a okrajové podmínky definovat výběrem konkrétních ploch nebo uživatelskou funkcí.

A nebo je navíc možné v případě komplexního výpočtu, kdy cílíme i na predikci proudění v průběhu odlévání včetně elektromagnetického míchání a tuhnutí během vytahování předlitku z krystalizátoru, při tvorbě geometrie zakreslit a zhmotnit všechny důležité konstrukční prvky, které jsou zahrnuty i do výpočtu. Vytvoření podstatných funkčních i procesních částí zařízení plynulého odlévání oceli, jež ovlivňují způsob tuhnutí předlitku, je výhodné nejen pro lepší prostorovou představu při analýze a prezentaci výsledků procesu, ale i z důvodu zpřesnění definice parametrů výpočtu. Základní geometrii tak tvoří nejen základní licí proud, ale např. i krystalizátor, chlazení krystalizátoru, výlevka, elektromagnetický míchač, konec startovací tyče, ostřikové oblasti či vodící, tažné a rovnací válečky. Příklad geometrie 3D modelu plynule odlévaného předlitku s vybranými konstrukčními prvky zařízení plynulého odlévání oceli je uveden níže na **Obr. 4.**

4.2 Zkušenosti s přípravou výpočetní sítě

Výpočetní síť je tvořena elementy konečných diferencí. Jedná se tedy o pravoúhlou síť, která popisuje jednotlivé konstrukční části pravoúhlými hexaedry (šestistěny). Při tvorbě výpočetní sítě je proto důležité promyslet, které konstrukční prvky jsou nejdůležitější a vyžadují zjemnění a naopak, které lze, řekněme, zvolit větší. Pro simulace plynulého lití včetně zachycení odlévání je důležité jemně vysíťovat vstup (výlevku). Aby byl dobře zachycen i přestup tepla mezi chlazenými válečky, ostřikovými zónami a licím proudem, je třeba zvážit i velikost výpočetních buněk těchto komponentů a ověřit velikost dotykových ploch. Z tohoto důvodu je důležité rozdělit jednotlivé konstrukční prvky ZPO do tzv. skupin. Při přípravě jednotlivých skupin, které se liší velikostí výpočetních buněk, je také důležité pořadí jednotlivých komponent. Nejdůležitější komponenta je na konci seznamu, a "důležitost" se směrem nahoru "snižuje". Ukázka detailu výpočetní sítě modelu ZPO v řezu je uvedena na **Obr. 5**.







Obr.5 Ukázka detailu výpočetní sítě v řezu



4.3 Definice parametrů výpočtu

Jakmile je hotova geometrie a výpočetní síť modelu pro simulaci procesu plynulého odlévání oceli, je třeba definovat parametry výpočtu. Pokud je geometrie a síť vytvořena správně, software automaticky předpřipraví platformu pro zadávání všech relevantních veličin a kontroluje i vzájemnou provázanost hodnot veličin či matematických funkcí, jimiž je hodnota počítána. V případě nesouladu definice veličiny se objeví v příkazovém řádku varování i se stručným popisem problému. Protože parametrů, které je potřeba stanovit, je velké množství, je tato automatická kontrola velkým pomocníkem.

Mezi nezbytné parametry modelu obvykle patří:

- termodynamické a termo-fyzikální vlastnosti materiálů komponent modelu
- přestupy/odvody tepla na rozhraní krystalizátor-předlitek, předlitek ostřiky, předlitek-válečky, chlazení krystalizátoru, chlazení válečků
- okrajové podmínky, jako je licí teplota a licí rychlost
- operační podmínky (gravitace, operační tlak, teplota okolí atd.

Termofyzikální vlastnosti konkrétních kovových materiálů lze do SW importovat z výpočtu v SW JatMatPro. Nicméně SW MAGMASOFT disponuje už i tak základní rozsáhlou nejen materiálovou databází, ale i databází funkcí např. pro výpočet přestupu tepla. Také okrajové podmínky, jako je např. licí rychlost, je možné definovat jako časově závislou proměnnou a nikoli jen jako konstantu. Variabilita definice parametrů výpočtu je tak široká, ale je třeba mít na paměti, že volba způsobu definice způsobu výpočtu parametrů už závisí především na zkušenostech a znalostech uživatele.

5. VÝSLEDKY VÝPOČTU

Numerickou simulací je získávána informace o rozložení rychlostního a teplotního pole po délce plynule litého předlitku, charakteru proudění při použití různých typů ponorných výlevek a elektromagnetického míchání, tloušťce licí kůry na konci krystalizátoru, metalurgické délce, ale také napěťových stavech, které mohou ovlivňovat konečnou kvalitu plynule odlévaných ocelových předlitků. Příklady výsledků jsou uvedeny na **Obr. 6 a Obr.7.**



Obr. 6 Vlevo: Příklad teplotního pole v oblasti krystalizátoru, Vpravo: Ukázka stanovení tloušťky licí kůry na konci krystalizátoru





Obr.7 Ukázka výsledků simulací dějů v oblasti krystalizátoru a) proudění při použití M-EMS b) profil rychlosti v řezu středem výlevky c) profil teplotního pole v řezu středem výlevky

6. ZÁVĚR

Překládaný příspěvek stručně shrnuje poznatky autorů s využíváním software MAGMASOFT® při studiu plynulého odlévání ocelových předlitků v podmínkách TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN, a.s Výsledky simulací jsou kontrolovány v provozních podmínkách např. pomocí termovizního měření či makrolepty příčných řezů, kde je možné odečítat šířku krystalizačních pásem v závislosti na změně intenzity chlazení. Díky komplexnímu výzkumu a hodnocení procesu plynulého odlévání oceli se daří v podmínkách TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN, a.s. optimalizovat podmínky výroby oceli a udržet tak trvale kvalitní výrobu.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl vypracován za podpory projektu TŽ - TT/TTw/2/TVP-507.

LITERATURA

- [1] © TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY MORAVIA STEEL, 2024. Polotovary. Dostupné: https://www.trz.cz/produkty/polotovary/ [citováno 2024-04-12].
- [2] TKADLEČKOVÁ, M.: Numerické modelování metalurgických procesů. Habilitační práce. Katedra metalurgie a slévárenství. Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Ostrava, duben, 2013.
- [3] DOLEJŠÍ, Zdeněk. *Plynulé odlévání oceli: tepelně technické poměry při plynulém odlévání oceli*. Praha: SNTL -Nakladatelství technické literatury, 1987. Poradenská příručka, č. 42.
- [4] DOLEJŠÍ, Zdeněk. Plynulé odlévání oceli. 2. díl, Nové systémy v technologii plynulého odlévání oceli. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. Poradenská příručka, č. 42/2.
- [5] BÖHM, Zdeněk. *Plynulé odlévání oceli*. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 80-03-00661-9.



- [6] BHATTACHARY, A. K.; DEBJANI, S.; ROYCHOWDHURY, A.; DAS, J. Optimization of Continuous Casting Mould Oscillation Parameters in Steel Manufacturing Process Using Genetic Algorithms. In 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation. New York City, USA: IEEE, 2007, p. 3998-4004. ISBN 14-244-1339-7.
- [7] CIBULKA, J.; PINDOR, L.; CUPEK, J.; KUFA, J.; KAWA, F. První zkušenosti s provozováním hydraulické oscilace na sochorovém zařízení plynulého odlévání v TŽ, a. s. In *Iron and Steelmaking*. Horní Bečva, Česká republika, 2011.
- [8] LIU, Z., LI, B. Effect of vertical length on asymmetric flow and inclusion transport in vertical-bending continuous caster. Powder Technology, 2018, vol.33, s. 403-415. Dostupné z doi:<u>https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.10.034</u>
- [9] PŘÍHODA, Miroslav, Jiří BAŽAN, Jana DOBROVSKÁ, Petr JELÍNEK, Zdeněk JONŠTA a Milan VROŽINA. Nové poznatky z výzkumu plynulého odlévání oceli. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2001. ISBN 80-248-0037-3.
- [10] CUPEK, J.: Vliv technologických parametrů plynulého odlévání oceli na makro a mikrostrukturu ocelí určených ke kování. Disertační práce. VŠB Technická univerzita Ostrava, 2017.
- [11] BRIDGE, M. R., ROGERS, G. D.: Structural effects and band segregate formation during the electromagnetic stirring of strand-cast steel. Metallurgical and Materials Transactions, 1984, vol. 15, no. 3, s. 581-589. ISSN 1073-5615.
- [12] DOMANSKI, D., KIM, K. S. aj.: Optimized electromagnetic stirring for continuous casting of steel billets and blooms. SEAISI quartely journal, 2010, vol. 39, no. 2, p. 46-52. ISSN 0129-5721.
- [13] HOU, Z., CHENG, G.: Characteristics and a novel quantitive model of macrosegregation in continuously cast high-carbon billets. In AISTech Proceedings, Atlanta, 2012, p. 1229-1238. ISBN 978-1-935117-24-7.
- [14] CIBULKA, J.: Studium tvorby segregací v podmínkách sochorového zařízení plynulého odlévání oceli. Disertační práce. VŠB Technická univerzita Ostrava. 2015.
- [15] Yang, X. G., Xu, Q. T., Wu, C. L., & Chen, Y. S. (2017). Experimental study of the continuous casting slab solidification microstructure by the dendrite etching method. Materials Science and Engineering(283). doi:doi:10.1088/1757-899X/283/1/012017
- [16] Sun, T., Yue, F., Wu, H.-j., Guo, C., Li, Y., & Ma, Z.-c. (2016). Solidification Structure of Continuous Casting Large Round Billets under Mold Electromagnetic Stirring. Journal of Iron and Steel Research, International, 23(4).
- [17] KOZUBKOVÁ, M., DRÁBKOVÁ, S. Numerické modelování proudění FLUENT I., VŠB TU Ostrava, 2003, Sylaby dostupné na (<u>http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/</u>).
- [18] TKADLEČKOVÁ, M.; MICHALEK, K.; SVIŽELOVÁ, J.; WALEK, J.; STROUHALOVÁ, M. Termodynamické, termochemické a numerické výpočty v metalurgii a jejich využití při optimalizaci technologie výroby oceli. In Oceláři Sborník konference, 35. ročník konference o teorii a praxi výroby a zpracování oceli. Rožnov p. Radhoštěm, 4.- 5.4.2019, □ 2019 TANGER spol. s.r.o., Ostrava, Česká republika, s. 93-100, ISBN 978-80-87294-90-1.
- [19] MAGMA Gießereitechnologie GmbH. Modul CC, software MAGMASOFT. Dostupné: https://www.magmasoft.de/cs/reseni/continuous-casting/strangguss-steel/ [citace 2024-04-12]



UŽITÍ NUMERICKÝCH VÝPOČTŮ PŘI VÝVOJI HLADINOMĚRŮ

KUPCZAK Marek

VÚHŽ a.s., divize Automatizace, Dobrá, Česká republika, Tel: +420558601277, kupczak@vuhz.cz

Abstrakt

Příspěvek shrnuje dosavadní zkušenosti autora v oblasti tvorby počítačových modelů a numerických výpočtů elektromagnetických polí, proudění a vedení tepla. Pozornost je věnována popisu virtuální laboratoře na divizi Automatizace, VÚHŽ v Dobré. Ta slouží jako podpůrné pracoviště pro výzkum a vývoj nových prototypů elektromagnetických snímačů výšky hladiny tekuté oceli v krystalizátorech pro plynulé odlévání. V příspěvku je pozornost zaměřena především na prezentaci vytvořených počítačových modelů různých typů krystalizátorů a hladinoměrů. Součástí obsahu příspěvku je i představení popisu vybraných laboratorních zkoušek.

Klíčová slova: Elektromagnetický snímač, hladinoměr, hladina tekuté oceli, krystalizátor, numerické výpočty

1. ÚVOD

Stěžejním výrobkem divize Automatizace, VÚHŽ, a.s. je hladinoměr, který sestává z elektromagnetického snímače výšky hladiny tekuté oceli v krystalizátoru, vyhodnocovací jednotky a (pokud je potřeba) snímače oscilací krystalizátoru. Zařízení pracuje ve velmi náročném prostředí (teplota oceli až 1600 °C, teplota licí trubice až 1200 °C), krystalizátor osciluje, všechny kovové části obklopující snímač se během lití ohřívají, dilatují a v průběhu života krystalizátoru více nebo méně deformují, je přítomno elektromagnetické rušení (elektromagnetické brzdy a míchače). Na hladině oceli pokryté vrstvou licího prášku se mohou vyskytnout víry a různé typy vln. Od měřicího systému se přitom vyžaduje rychlá a spolehlivá reakce na změny hladiny, vysoká přesnost a dlouhodobá stabilita, tj. odolnost proti proměnlivým vlivům okolí, viz **Obr. 1** [1].



Obr. 1 Elektromagnetický snímač s příslušenstvím



Snímač je umístěn na izolační podložce na opracované horní ploše měděné desky v ose krystalizátoru. Je elektricky izolován od všech okolních kovových částí. Snímač má nejčastěji tvar hranolu. Je vyroben z korozivzdorné, žáruvzdorné neferomagnetické oceli. Souměrně k ose snímače je umístěna buďto jedna nebo dvě snímací cívky. Snímače dále obsahují několik budicích cívek, teploměr a vodiče spojující všechny komponenty s vnitřní svorkovnicí. Snímač je chlazen vodou, obsahuje vnitřní chladicí okruh.

Měření se opírá o elektromagnetický princip. Střídavé elektromagnetické pole vybuzené budicími cívkami snímače indukuje v tekuté oceli a v okolních vodivých součástech vířivé proudy. Výsledné rozložení elektromagnetického pole vířivých proudů závisí na výšce hladiny oceli v krystalizátoru. Toto pole indukuje ve snímacích cívkách snímače napětí. Indukované napětí je zpracováváno ve vyhodnocovací jednotce řízené mikroprocesory.

2. POPIS VIRTUÁLNÍ VÝZKUMNĚ-VÝVOJOVÉ LABORATOŘE

Na základě analýzy naměřených dat a zkušeností z dlouhodobého provozování hladinoměrů byly v minulosti vyvinuty metodiky efektivního zkoušení snímačů v laboratoři. Během lití je snímač zatěžován komplexně řadou vnějších vlivů – tepelné záření licí trubice, postupný ohřev krytů a dalších kovových součástí v těsné blízkosti snímače, proměnlivé tepelné záření povrchu licího prášku na hladině oceli, dilatace a deformace kovových částí v okolí snímače (včetně měděných desek krystalizátoru), změny přechodových odporů mezi těmito kovovými částmi, změn teploty a tlaku chladicí vody protékající snímačem, postupné změny emisivity čela snímače (začerněný povrch je ohříván více než kovově lesklý) atd, viz **Obr. 2**.

Studiem výše zmíněných vlivů byly pracovníky výzkumu a vývoje v rozmezí několika let navrženy a zhotoveny různé typy zkušebních standů pro laboratorní testování snímačů s možností odděleného modelování provozních podmínek, které nejvíce ovlivňují výstupní signál, viz např. Obr. 3. Všechny typy používaných laboratorních standů sestávají z jedné, dvou či čtyř kovových (většinou měděných) desek, které nahrazují stěny krystalizátoru. Snímač bývá dále umístěn na feromagnetické desce, jež představuje horní víko chladicí skříně. Třetí nezbytnou částí je hliníková simulační deska, která nahrazuje v laboratorních podmínkách hladinu tekuté oceli v krystalizátoru. Na Obr. 4 je zobrazen virtuální model laboratorního standu. Výpočty se opírají o Maxwellovy rovnice [2].



Obr. 2 Snímač v provozu



Obr. 3 Laboratorní stand



Obr. 4 Virtuální model laboratorního standu



Na **Obr. 5** je zobrazen laboratorní hliníkový stand, jeho virtuální počítačový model je na **Obr. 6**. Tento model krystalizátoru má pohyblivé úzké desky (zvané bočnice), které slouží k simulaci změny šířky licího formátu během lití.



Obr. 5 Hliníkový stand



Obr. 6 Virtuální model hliníkového standu

Na **Obr. 7** je ukázáno osazení dvou snímačů na tenké bramě. Tento typ krystalizátoru se ve výzkumněvývojové laboratoři nenachází. Existuje pouze jeho virtuální počítačový model, viz. **Obr. 8**.



Obr. 7 Osazení snímačů na tenké bramě



Obr. 8 Virtuální model tenké bramy

Na **Obr. 9** je ukázáno osazení rámečkového snímače na laboratorním blokovém standu. Virtuální počítačový model blokového krystalizátoru a rámečkového snímače je zobrazen na **Obr. 10**.



Obr. 9 Rámečkový snímač na blokovém standu



Obr. 10 Virtuální model blokového standu



3. STRUČNÝ POPIS FUNKCE ELEKTROMAGNETICKÉHO SNÍMAČE

Elektromagnetický snímač vyhodnocuje deformace magnetického pole nad hladinou tekuté oceli. Ty vznikají vzájemnou interakcí mezi siločarami magnetického pole a elektricky vodivými materiály, ve kterých je vyvolán rotující pohyb elektronů neboli indukován elektrický proud tekoucí v kruhových trajektoriích. Proto jsou tyto proudy nazývány vířivými proudy. Indukované vířivé proudy tečou v uzavřených smyčkách, čímž vytvářejí sekundární magnetické pole, které podle Lenzova zákona působí proti poli budicímu, čímž budicí pole zeslabuje, viz. **Obr. 11**. Nejvyšší hustota vířivých proudů je na povrchu a s hloubkou exponenciálně klesá, viz. **Obr. 12**. Jedná se o tzv. povrchový jev (anglicky *skin effect*). Velikost poklesu hustoty proudů v závislosti na povrchové hloubce je charakterizována hloubkou vniku δ . Velikost hloubky vniku δ [m] lze určit pomocí vztahu (1), kde *f* [Hz] je frekvence střídavého proudu, kterým je napájeno budicí vinutí, μ [H/m] je magnetická permeabilita a σ [S/m] je konduktivita neboli měrná elektrická vodivost kovového materiálu [3,4,5].



Obr. 11 Vířivé proudy

Obr. 12 Hloubka vniku

4. NUMERICKÉ SIMULACE LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

4.1. Základní charakteristika snímače

Základní laboratorní zkouškou je citlivost snímače na změnu polohy hliníkové desky, která v laboratorních podmínkách nahrazuje hladinu tekuté oceli v krystalizátoru. Na **Obr. 14-16** je zobrazeno rozložení magnetického pole v závislosti na poloze simulační hliníkové desky od hrany krystalizátoru.



Obr. 13 Hliníková deska v 10 cm



Obr. 14 Rozložení mag. pole (bez desky)





Obr. 15 Rozložení mag. pole (deska v 10 cm)



Obr. 16 Rozložení mag. pole (deska v 20 cm)

4.2. Teplotní laboratorní zkoušky

Teplotní laboratorní zkoušky modelují vliv změny ohřevu krystalizátoru a měděných krytů snímače. Jedná se o nežádoucí jevy, které musí algoritmus ve vyhodnocovací jednotce určený pro výpočet hladiny tekuté oceli kompenzovat. Změny v rozložení teplotního pole v okolí měřicí sondy se projeví jako deformace elektromagnetického pole, která je důsledkem změny velikosti hloubky vniku δ elektromagnetické vlny pronikající do kovových částí. Děje se tak prostřednictvím změny rezistivity ρ , respektive konduktivity σ [6].

Rezistivita neboli měrný elektrický odpor ρ [Ω .m] kovů v určité teplotní oblasti roste přibližně lineárně (měď přibližně od -200 do +600 °C), viz. **Obr. 17**. V závislosti na teplotě platí přibližný empirický vztah (2), kde ρ_{θ} [Ω .m] je počáteční rezistivita, ΔT [K, °C] je teplotní rozdíl a α [K⁻¹, °C⁻¹] je teplotní součinitel elektrického odporu. Konduktivitu neboli měrnou elektrickou vodivost σ [S.m⁻¹] lze vyjádřit jako převrácenou hodnotu rezistivity ρ .



Obr. 17 Závislost rezistivity mědi na teplotě

 $\rho = \rho_0 \left(1 + \alpha \, \Delta T \right)$



Na **Obr. 18** je termovizní snímek laboratorní zkoušky ohřevu krystalizátorové desky, na **Obr. 19** je ukázáno rozložení teplotního pole virtuálního laboratorního standu.



Obr. 18 Termosnímek ohřevu krystalizátoru



Obr. 19 Rozložení teplotního pole standu

Na **Obr. 20** je snímek laboratorní zkoušky ohřevu horního měděného krytu snímače prostřednictvím silitových tyčí. Tato zkouška modeluje vliv sálání licí trubice a částečně mezipánve. Na **Obr. 21** je ukázáno rozložení teplotního pole virtuálního modelu jednoho z prototypů snímače.



Obr. 20 Snímek ohřevu horního krytu snímače



Obr. 21 Rozložení teplotního pole ve snímači

5. ZÁVĚR

Příspěvek rekapituluje poznatky autora z oblasti numerického modelování, především elektromagnetických polí. Ve stručnosti byla prezentována vytvořená virtuální laboratoř, která slouží jako podpůrné pracoviště určené pro výzkum a vývoj nových prototypů elektromagnetických snímačů hladiny tekuté oceli v krystalizátorech. Dále byly krátce nastíněny virtuální obdoby několika laboratorních zkoušek, které nahrazují reálné provozních podmínky, kterými jsou snímače během lití vystaveny.

PODĚKOVÁNÍ

Autor příspěvku děkuje spolupracovníkům divize Automatizace, VÚHŽ, a.s. za pomoc a ochotu při přípravě, realizaci a vyhodnocení experimentálních prací.



LITERATURA

- [1] VUHZ Mold Level Measuring System, firemní prospekt, <u>https://www.vuhz.cz/images/prospekty/mold_level.pdf</u>
- [2] KULHÁNEK, Petr. Teorie elektromagnetického pole. AGA, 2020, <u>https://www.aldebaran.cz/studium/elmg.pdf</u>
- [3] KREIDL, M., ŠMÍD, R. Technická diagnostika. BEN technická literatura, Praha 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [4] <u>https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current</u>
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical resistivity and conductivity



www.zdas.com

BADANIA MODELOWE KSZTAŁTKI GAZOPRZEPUSZCZALNEJ O NOWEJ KONSTRUKCJI

¹PIEPRZYCA Jacek, ¹MERDER Tomasz, ²WENDE Robert, ³WITEK Jerzy, ¹SATERNUS Mariola

¹Politechnika Śląska, Krasińskiego 8, Katowice, Poland, <u>jacek.pieprzyca@polsl.pl</u>
²Cognor SA Ferrostal Łabędy Gliwice, Anny Jagiellonki 47, Gliwice, Poland
³Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Cementowa 8, Kraków, Poland

Abstrakt

Stosowane obecnie w procesie przedmuchiwania ciekłej stali gazami obojętnymi kształtki gazoprzepuszczalne charakteryzują się bardzo wyrafinowaną konstrukcją. Dalsze zwiększenie ich efektywności jest trudne i mało skuteczne. Dlatego podejmowane są próby opracowania nowej konstrukcji kształtek gazoprzepuszczalnych. Przedstawiona w artykule koncepcja nowej kształtki ma konstrukcję modułową. Gaz do ciekłej stali wdmuchiwany jest przez rodzaj kolektora, z którego rozdzielany jest do systemu szczelin. Takie rozwiązanie pozwala na znaczne zwiększenie powierzchni aktywnej modułu w porównaniu do powierzchni aktywnej obecnie stosowanych kształtek gazoprzepuszczalnych.

W artykule przedstawiono wstępne wyniki doświadczeń laboratoryjnych modelowego modułu (dyfuzora KS) gazoprzepuszczalnego przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu wodnego kadzi stalowniczej. Celem tych badań było określenie wpływu szerokości szczelin w module na zachowanie tworzącej się fazy ciekło-gazowej, a w konsekwencji kształtowanie się struktury hydrodynamicznej w objętości kadzi.

Słowa kluczowe: Stal, kadź stalownicza, rafinacja stali, argon, kształtka gazoprzepuszczalna

1. WSTĘP

Proces przedmuchiwania ciekłej stali gazami obojętnymi stanowi podstawowy zabieg jej obróbki pozapiecowej. Pomimo nieskomplikowanej techniki jego stosowania, zjawiska hydrodynamiczne zachodzące w ciekłym metalu mają bardzo złożony charakter. Dlatego stanowią przedmiot wielu badań, o czym świadczy literatura na ten temat [1-3]. Celem stosowania procesu jest przyspieszenie wypływania wtraceń niemetalicznych z objętości ciekłej stali i ich skuteczny transport do fazy żużlowej. Przedmuchiwanie ciekłej stali gazami obojętnymi prowadzone jest również w celu jej homogenizacji, zarówno z punktu widzenia składu chemicznego, jak i temperatury. Skuteczność procesu zależy w głównej mierze od warunków tworzenia się struktury hydrodynamicznej w objętości ciekłej stali wskutek oddziaływania strumienia wdmuchiwanego gazu, konstrukcji kształtki gazoprzepuszczalnej, użytych do jej budowy materiałów oraz lokalizacji kształtki w dnie kadzi stalowniczej. Wspomniane czynniki oddziałują bezpośrednio na sposób tworzenia się i charakter kolumny gazowej, a w konsekwencji na ruch ciekłej stali w kadzi stalowniczej. Przyjmuje się, że aby uzyskać wymaganą skuteczność procesu, wypływające z powierzchni kształtki gazoprzepuszczalnej pęcherzyki gazu powinny charakteryzować się jak największym rozdrobnieniem. Kolumna gazowa powinna więc cechować się możliwie dużą liczbą pęcherzyków gazowych o bardzo małych rozmiarach. Ma to również znaczenie z punktu widzenia oddziaływania kolumny gazowej na powierzchnię podziału metal - żużel i tworzenie się oka żużlowego.

Stosowane obecnie rozwiązania konstrukcyjne kształtek gazoprzepuszczalnych są niezwykle wyrafinowane. Dalsze zwiększenie ich efektywności jest trudne i mało skuteczne. Uzasadnione więc jest poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych umożliwiających dalsze zwiększanie, szczególnie rafinacyjnej skuteczności procesu. Takim nowym rozwiązaniem jest zaproponowana konstrukcja moduł typu szczelinowego (dyfuzor KS), w którym możliwe jest zwiększenie powierzchni aktywnej (powierzchnia tworzenia się kolumny gazowej) w porównaniu do dotychczasowych rozwiązań. Ocenę przydatności do



zastosowania tego rozwiązania z punktu widzenia możliwości tworzenia wymaganej struktury hydrodynamicznej w objętości ciekłej stali przeprowadzono z wykorzystaniem modelu wodnego kadzi stalowniczej wyposażonej w model modułu (dyfuzora).

2. PZEDMIOT BADAŃ I METODOLOGIA BADAŃ

Badania laboratoryjne, fizyczne przeprowadzono na stanowisku wyposażonym w model kadzi stalowniczej wykonany w skali liniowej pomniejszającej S_L=1:3,4. Model kadzi stalowniczej odwzorowuje obiekt rzeczywisty o pojemność 65 t ciekłej stali. Model zbudowany jest zgodnie z wymogami teorii podobieństwa dynamicznego i kinematycznego, spełnia również warunek podobieństwa geometrycznego [4]. Model ten szczegółowo opisany jest w pracy [5]. Kształtka gazoprzepuszczalna – moduł gazoprzepuszczalny umieszczony jest na 2/3 promienia od osi kadzi. Na stanowisku pomiarowym zainstalowano również dodatkowy rotametr wyposażony w system regulacji przepływu gazu oraz urządzenie do precyzyjnego podawania znacznika w strudze gazu. Na **rysunku 1** przedstawiono widok schematu stanowiska badawczego.



Rys. 1 Widok schematu stanowiska badawczego

Jako dominujące kryterium podobieństwa dynamicznego przyjęto zmodyfikowane kryterium Froude`a wyrażone wzorem [6]:

$$Fr_M = \frac{\rho_s \cdot v^2}{\rho_l \cdot g \cdot L} \tag{1}$$

gdzie: ρ_S – gęstość gazu, g·cm⁻³; ρ_l – gęstość cieczy, g·cm⁻³; ν – prędkość gazu, cm·s⁻¹; g – przyspieszenie ziemskie, cm·s⁻²; wymiar charakterystyczny, cm.

Podobieństwo kinematyczne przepływu strumienia gazu w modelu kadzi stalowniczej wyznaczono metodą skal według równania [6]:

$$Q^{`} = \left(\frac{c^{`}}{c}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot S_{L}^{\frac{5}{2}} \cdot Q \tag{2}$$

gdzie: Q` - objętościowy strumień przepływu gazu dla modelu wodnego, m³·s⁻¹; Q - objętościowy strumień przepływu gazu dla kadzi przemysłowej, m³·s⁻¹; c` - stała dla modelu wodnego, (-); c – stała dla kadzi przemysłowej, (-); S_L – skala geometryczna.



W badaniach analizowano dwie wartości natężenia strumienia przepływu gazu obojętnego. Pierwszy to 3,7 dm³/min (przemysł to wartość – 200 dm³/min), natomiast drugi to 4,2 dm³/min, przemysł to wartość – 225 dm³/min).

Eksperymenty z wykorzystaniem modelu fizycznego kadzi stalowniczej przeprowadzano po zainstalowaniu wymaganego typu modułu - kształtki gazoprzepuszczalnej. Analizie poddano dwa warianty modułów typu szczelinowego. Moduły posiadały taką samą ilość szczelin - 8. Moduły różniły się od siebie szerokością szczelin. Moduł modelowy A posiadał szczeliny szerokości 150 μm (co w warunkach przemysłowych równe jest - 510 μm), natomiast moduł B posiadał szczeliny szerokości 50 μm (co w warunkach przemysłowych równe jest - 170 μm). Powierzchnia aktywna obu modułów była taka sama – wynosiła 1856 mm². Oba warianty modelowych moduł typu szczelinowego, zostały wykonane przez Sieć Badawczą Łukasiewicz - Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, zgodnie z patentem nr. PL 229475 [7]. Widok modułu z ważniejszymi oznaczeniami przedstawiono na **rysunku 2**.



Rys. 2 Widok moduł typu szczelinowego (dyfuzora KS).

Metodologia dla każdego wariantu eksperymentu obejmowała następujące czynności: model kadzi stalowniczej napełniano cieczą modelową (woda), a następnie przepuszczano przez moduł (kształtkę) określony na podstawie teorii podobieństwa strumień gazu (powietrze). W eksperymentach, w których wymagane było zastosowanie znacznika w postaci wodnego roztworu KMnO₄ lub NaCl (w zależności od rodzaju badań), wprowadzano go w osi modułu ze specjalnie w tym celu skonstruowanego zbiornika.

3. WYNIKI BADAŃ

Badania podzielono na dwa etapy. Pierwszy etap obejmował określenie sposobu kształtowania się kolumny gazowej oraz ocenę stopnia dyspersji gazu w objętości cieczy modelowej. Badania te miały charakter wizualizacji. Ich przebieg polegał na rejestracji za pomocą sytemu kamer przebiegu eksperymentu w różnych płaszczyznach, a następnie na obróbce komputerowej zarejestrowanego materiału i jego interpretację.

Drugi etap badań przeprowadzono w celu określenia skuteczności przebiegu procesu homogenizacji cieczy modelowej pod wpływem wdmuchiwanego gazu. Polegał on na wyznaczeniu wartości minimalnego czasu wymieszania znacznika w cieczy modelowej na podstawie analizy uzyskanych w wyniku eksperymentu krzywych RTD.

W **tabeli 1** przedstawiono przykładowe wyniki badań ilustrujące stopień dyspersji pęcherzyków gazu w cieczy modelowej oraz mechanizm powstawania stożka pęcherzyków gazu (kolumny gazowej) dla rozpatrywanych wariantów - modułów A i B.



Tab. 1 Mechanizm powstawania stożka pęcherzyków gazu (kolumny gazowej) oraz ich stopień dyspersji w cieczy modelowej dla rozpatrywanych wariantów badań



Na podstawie wizualizacji (**tabela 1**) zaobserwowano korzystniejszy mechanizm tworzenia się kolumny gazowej dla wariantu B. Zaobserwowano większe rozdrobnienie pęcherzyków gazu oraz równomierne ich wypływanie w kierunku lustra cieczy modelowej. W przypadku wariantu B stwierdzono łączenie się pęcherzyków gazu na powierzchni modułu w większe konglomeraty, nasilające się wraz z zwiększaniem strumienia wdmuchiwanego gazu. Skutkuje to nadmiernym ich rozrostem i ograniczeniem ich liczby. Zaobserwowano również pojawienie się tendencji do wirowania kolumny gazowej wraz ze wzrostem natężenia przepływu gazu

Na **rysunkach 3 i 4** przedstawiono przykładowe wyniki wizualizacji mechanizmu mieszania się cieczy modelowej dla obu wariantów eksperymentu (moduł A i B - dwa natężenia przepływu gazu - dla kolejnych kroków czasowych).



Rys. 3 Mechanizm mieszania się cieczy modelowej - Moduł modelowy A - wartości natężenia strumienia przepływu gazu obojętnego: a) 3,7 dm³/min, b) 4,2 dm³/min.

Obserwacje ruchu cieczy modelowej (**Rys. 3 - 4**) pod wpływem wdmuchiwanego gazu dla wariantu A pozwoliły na stwierdzenie niekorzystnych tendencji do nierównomiernego rozchodzenia się znacznika. Spowodowany on jest powstawaniem stref przepływu cyrkulacyjnego w rejonie ścian modelu kadzi stalowniczej. To z kolei



sprzyja powstawaniu niebezpiecznych stref martwych w objętości cieczy modelowej. Taki ruch nie sprzyja skutecznej homogenizacji fazy ciekłej. Zagrożenia te, wraz ze zwiększaniem strumienia wdmuchiwanego gazu rosną.



Rys. 4 Mechanizm mieszania się cieczy modelowej - Moduł modelowy B -- wartości natężenia strumienia przepływu gazu obojętnego: a) 3,7 dm³/min, b) 4,2 dm³/min.

Porównując cechy ruchu cieczy modelowej w wariancie A i wariancie B, należy stwierdzić znaczną ich poprawę na korzyść wariantu B. W tym wariancie zaobserwowano klasyczny rozpływ znacznika w cieczy modelowej. Kolumna gazowa wymusza pionowy obieg cyrkulacyjny fazy ciekłej w całej jej objętości. Sprzyja to równomiernej homogenizacji. Wraz ze wzrostem natężenia przepływu strumienia gazu, zgodnie z oczekiwaniami, skuteczność mieszania również rośnie. W tym wariancie badań nie zaobserwowano również niebezpieczeństwa powstawania nadmiernych obszarów stref przepływu martwego.

W drugim etapie badań, eksperymenty prowadzono w ten sposób, aby możliwe było wykreślenie krzywych mieszania RTD umożliwiających określenie minimalnego czasu mieszania znacznika w cieczy modelowej. Minimalny czas mieszania znacznika potraktowano jako kryterium oceny skuteczności procesu homogenizacji

ciekłej stali. Doświadczenie w tym etapie badań prowadzono w seriach po pięć replikacji dla każdego wariantu. Analiza uzyskanych wykresów RTD pozwoliła na wyznaczenie średnich wartości minimalnego czasu wymieszania znacznika w cieczy modelowej dla każdego z nich. Na rysunku 5 przedstawiono w sposób graficzny wyniki tej analizy.



Rys. 5 Średnie wartości minimalnego czasu wymieszania znacznika.

Wyznaczone w oparciu o analizę krzywych RTD, wartości minimalnego czasu wymieszania znacznika (**Rys. 5**), potwierdziły przeprowadzone wcześniej obserwacje. Istotnie krótsze czasy wymieszania uzyskano

dla wariantu B w porównaniu z wariantem A. Dotyczy do obu stosowanych wartości natężenia przepływu strumienia gazu. Na tej podstawie można stwierdzić, że korzystniejsze warunki hydrodynamiczne z punktu widzenia skuteczności przebiegu homogenizacji fazy ciekłej generuje wariant B modułu.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań modelowych należy stwierdzić, że nowa konstrukcja modułu gazoprzepuszczalnego typu szczelinowego (dyfuzor KS) może stanowić skuteczną alternatywę dla obecnie stosowanych rozwiązań. Ważną cechą konstrukcyjną dyfuzora jest właściwy dobór szerokości szczelin, który ma bezpośredni wpływ na skuteczność jego działania. Szerokość ta musi być wyznaczana w oparciu o wyniki badań prowadzonych dla konkretnych warunków pracy kadzi stalowniczych uwzględniających specyfikę stosujących je stalowni. W przypadku przedstawionym w artykule, dla 65 t kadzi stalowniczej o określonych parametrach geometrycznych, lepszym pod każdym względem rozwiązaniem jest wariant B. Wyznaczone minimalne czasy mieszania oraz wizualizacja ruchu cieczy modelowej w objętości kadzi stalowniczej wskazują na dużą skuteczność modułu do generowania warunków hydrodynamicznych sprzyjających homogenizacji kąpieli. Również sposób tworzenia się kolumny gazowej pozwala prognozować wymaganą skuteczność rafinacyjną.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu numer 1/POIR/08/2018 beneficjent Cognor SA Oddział Ferrostal Łabędy Gliwice.

Artykuł powstał dzięki grantowi finansowemu nr BK-202/RM2/2024 dla Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej.

LITERATURA

- [1] LIS, T. Metalurgia stali o wysokiej czystości. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, Poland, 2009.
- [2] MAZUMDAR, D., DHANDAPANI, P., SARVANAKUMAR, R. Modeling and optimization of gas stirred ladle systems. *ISIJ Int.*, 57, 2017, p. 286-295.
- [3] AMARO-VILLEDA, A.M., RAMIREZ-ARGAEZ, M.A., CONEJO, A.N. Effect of slag properties on mixing phenomena in gas-stirred ladles by physical modeling. *ISIJ Int.*, 54, 2014, p. 1-8.
- [4] MÜLLER, L. Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modelowych. PWN, Warszawa, Poland, 1983.
- [5] MERDER, T., WARZECHA, P., PIEPRZYCA, J., WARZECHA, M., WENDE, R., HUTNY, A. Model investigation of argon injection into liquid steel at ladle furnace station with using of innovative module. *Materials* 16, 2023, 24, 7698, https://doi.org/10.3390/ma16247698.
- [6] PIEPRZYCA, J., MERDER, T. Modified Froud's criterion in modeling two-phase flows in a steel ladle. *Metalurgija*, 61, 2022, 1, p. 145-148.
- [7] BARCHUK, Y., SHCHERBAK, M. Moduł do dennego przedmuchiwania wytopu gazami szlachetnymi. PL Patent 229475, 31 July 2018.



NOWE ROZWIĄZANIE KONSTRUKCYJNE KSZTAŁTKI GAZOPRZEPUSZCZALNEJ

¹MERDER Tomasz, ¹PIEPRZYCA Jacek, ²WENDE Robert, ³WITEK Jerzy, ¹SATERNUS Mariola

¹Politechnika Śląska, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland, <u>tomasz.merder@polsl.pl</u>

²Cognor SA Ferrostal Łabędy Gliwice, Anny Jagiellonki 47, 44-109 Gliwice, Poland

³Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Cementowa 8, 31-983 Kraków

Abstrakt

Najbardziej rozpowszechnionym i relatywnie prostym procesem rafinacji ciekłej stali jest argonowanie, które prowadzone jest na stanowisku pieca kadziowego. Głównym zadaniem wdmuchiwanego gazu jest homogenizacja ciekłej stali zarówno pod względem temperaturowym, jak i chemicznym oraz przechwytywanie i wynoszenie wtrąceń niemetalicznych do fazy żużlowej. Do wprowadzania gazu obojętnego do ciekłej stali wykorzystywane są kształtki gazoprzepuszczalne usytułowane w dnie kadzi stalowniczej. Obecnie stosowane konstrukcje kształtek gazoprzepuszczalnych (szczelinowe, hybrydowe) osiągnęły bardzo wysoki poziom technologiczny. Jednak kształtki te obejmują stosunkowo niewielką powierzchnię dna kadzi stalowniczej. W artykule przedstawiono nowe rozwiązanie konstrukcyjne modułu (dyfuzora gazoprzepuszczalnego KS (Kadzi Stalowniczej) - zastępującego kształtkę gazoprzepuszczalną typu szczelinowego, który charakteryzuje się znacznie większą powierzchnią aktywną od obecnie stosowanych kształtek. Przedstawiono pilotażowe wyniki badań modelowych CFD (Computational Fluid Dynamics) -z zastosowaniem modułu KS.

Słowa kluczowe: Stal, kadź stalownicza, rafinacja stali, argon, kształtka gazoprzepuszczalna

1. WSTĘP

Skuteczność procesu wdmuchiwania gazu obojętnego do ciekłej stali w głównej mierze zależy od dwóch parametrów. Pierwszym z nich jest parametr procesowy i który dotyczy wielkości strumienia wdmuchiwanego gazu wyrażanego najczęściej w l/min. Drugim parametrem jest parametr technologiczny, który zależy od konstrukcji kształtki gazoprzepuszczalnej, przez którą wdmuchiwany jest gaz. Połączenie tych dwóch parametrów powinno zapewnić wymagany sposób tworzenia się kolumny gazowej o dużej liczbie możliwie silnie rozdrobnionych pęcherzyków. Sprzyja to uzyskaniu wymaganej skuteczności rafinacyjnej procesu. Z drugiej strony, tworząca się kolumna gazowa powinna posiadać odpowiednia energię zapewniającą skuteczne mieszanie kąpieli metalowej w celu uzyskania jednorodnego, zarówno temperaturowo jak i chemicznie, stopu. Uzyskanie najlepszych warunków przebiegu procesu argonowania dokonuje się więc na drodze kompromisu pomiędzy wspomnianymi wcześniej parametrami. Zaawansowana technicznie budowa współcześnie stosowanych kształtek gazoprzepuszczalnych powoduje, że zakres możliwości sterowania procesem poprzez regulację natężenia przepływu gazu staje się znacznie ograniczony, a uzyskanie takiego kompromisu coraz trudniejsze, gdyż możliwości kształtowania właściwości generowanej kolumny gazowej determinuje budowa kształtki gazoprzepuszczalnej. Skutkuje to osiagnieciem pewnego maksimum możliwości działania dotychczas stosowanych rozwiązań, a w konsekwencji znaczne ograniczenie dalszej poprawy skuteczności procesu. Rozsądnym rozwiązaniem tego dylematu jest uzyskanie możliwości zwiększenia powierzchni aktywnej kształtki, przez którą wdmuchiwany jest gaz do ciekłego metalu. Powinno to zapewnić utrzymanie zdolności kształtki do generowania dużej liczby drobnych pęcherzyków przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej energii kolumny gazowej do skutecznego mieszania kąpieli metalowej. Takim rozwiązaniem jest zaproponowana nowa konstrukcja kształtki gazoprzepuszczalnej typu szczelinowego (dyfuzor - moduł KS (kadzi stalowniczej). Jej konstrukcja odbiega znacznie od dotychczas stosowanych rozwiązań i stanowi nowy kierunek w dziedzinie budowy tych elementów wyposażenia kadzi stalowniczej [1-3].



W celu stwierdzenia przydatności zaproponowanego rozwiązania do zastosowania w warunkach przemysłowych dokonano szeregu badań laboratoryjnych. Przedstawione w artykule wyniki dotyczą badań pilotażowych przeprowadzonych w celu określenia wytycznych do konstrukcji i wykonania egzemplarzy prototypowych dyfuzorów KS przeznaczonych do dalszych badań z wykorzystaniem modeli wodnych. Badania pilotażowe przeprowadzono dla konkretnej konstrukcji kadzi stalowniczej o nominalnej pojemności 65 t metodami CFD w programie AnsysFluent. W badaniach zwrócono szczególną uwagę na takie zagadnienia jak liczba i rozmieszczenie i szerokość szczelin na powierzchni aktywnej dyfuzora. Również badania te prezentują korzyści z zastosowania nowego rozwiązania - dyfuzora (modułu) zastępującego tradycyjne rozwiązania - kształtki typu szczelinowego w kadzi stalowniczej na stanowisku obróbki pozapiecowej. W artykule opisano również wykonie prototypów modułów KS do badań z wykorzystaniem modelu wodnego na specjalnie w tym celu zbudowanym stanowisku badawczym kadzi stalowniczej.

2. PRZEDMIOT BADAŃ I METODYKA BADAWCZA

W badaniach pilotażowych zastosowano zasadę, że wszelkie badania mające na celu poprawę skuteczności działania dowolnego procesu technologicznego stosowanego w warunkach konkretnego przedsiębiorstwa przemysłowego powinny uwzględniać jego warunki techniczne i specyfikę produkcji. Dlatego metodykę badań opracowano w oparciu o dane dostarczone przez stalownię Cognor S.A. Oddział Ferrostal Łabędy w Gliwicach dla wykorzystywanych tam kadzi stalowniczych o pojemności nominalnej 65 t.

2.1. Moduł gazoprzepuszczalny

Nowe rozwiązanie technologiczne – moduł typu szczelinowego (dyfuzor KS) - różni się od stosowanych obecnie w hutach tradycyjnych kształtek gazoprzepuszczalnych typu szczelinowego parametrami geometrycznymi, budową zewnętrzną i wewnętrzną oraz co najważniejsze wielkością powierzchni aktywnej. Sformułowanie powierzchnia aktywna - należy rozumieć jako powierzchnia, w obrębie której występują szczeliny.

Powierzchnia aktywna modułu przypomina tradycyjną kształtkę typu szczelinowego, jednak szczeliny rozmieszczone są w nim na planie prostokąta, a nie jak w tradycyjnych kształtkach okręgu. Dodatkowo nie posiada pancerza stalowego i nie wymaga do montażu kształtki muszlowej. Moduł objęty jest patentem nr. PL 229475 [4]. Budowę modułu przedstawiono na Rys. 1. Innowacyjny system (moduł typu szczelinowego) do przedmuchiwania wytopu gazami obojetnymi składa się z modułu kapilarnego umieszczonego w kolektorze, do którego przyłączony jest krócieć, dostarczający W module kapilarnym gaz. umiejscowione kapilary szczelinowe są 0 określonym przekroju (szerokości). Szerokość szczelin nie powinna przekraczać 350 µm. Korzystne jest, aby szczeliny miały szerokość od 100 do 300 µm. Stosunek głębokości M do N wynosi 0,478. Moduł otoczony jest warstwa materiałów ogniotrwałych o określonej grubości.







2.2. Badany obiekt – kadź stalownicza

Przedmiotem analizy była kadź stalownicza, wyposażona w kształtkę gazoprzepuszczalną typu szczelinowego – obecnie stosowaną lub dyfuzor KS do przedmuchiwania ciekłej stali gazem obojętnym, będąca elementem stanowiska pieca kadziowego. Jej nominalna pojemność wynosi 65 t ciekłej stali. Cechy konstrukcyjne kadzi stalowniczej (oraz jej modelu) wraz z lokalizacją moduł typu szczelinowego – dyfuzora, przedstawiono w **Tabeli**.

	Podstawowe parametry konstrukcyjne					
Parametr	Symbol	Jednostka	Obiekt przemysłowy skala 1:1, mm	Model kadzi stalowniczej, skala 1:3,4, mm	A1	
			wart	ość		
6 I I	A		2456	722,4		
Srednica	A ₁		2616	769,4	A	
D /	R		1228	361,2		
Promien	R1		1308	384,7	LK1.	
Wysokość kadzi	н	mm	2322	682,9	L _{K2}	
Wysokość kadzi (poziom ciekłej stali)	h		1840	541,0	R	
Położenie	L _{K1}		500	147,0		
kształtki	L _{K2}		600	176,5		

Tab. 1 Parametry konstrukcyjne kadzi stalowniczej na stanowisku pieca kadziowego

Umiejscowienie w dnie kadzi stalowniczej kształtki typu szczelinowego lub modułu pokazano na **Rys. 2**. Podstawowe parametry analizowanej kształtki moduł pokazano w **Tab. 2**.

Tab. 2 Parametry konstrukcyjne kształtki szczelinowej i modułu

Analizowane warianty	llość szczelin	Powierzchnia rozmieszczenia szczelin, mm	Szerokość szczeliny, μm
Kształtka szczelinowa	12	Ø 70	250
Moduł – nowe rozwiązanie	8	110x210	170



Rys. 2 Położenie kształtki i modułu w dnie kadzi stalowniczej.

2.3. Metodologia obliczeń CFD

Przedmiotem analizy numerycznej była przemysłowa kadź stalownicza, o nominalnej pojemności 65 t ciekłej stali. Istotne cechy konstrukcyjne kadzi stalowniczej opisano w **Tabeli 1**. Analizowano dwa warianty wprowadzania gazu obojętnego do ciekłej stali – z zastosowaniem tradycyjnej kształtki typu szczelinowego oraz moduł - nowe rozwiązanie konstrukcyjne.

W ramach prac przygotowawczych przetestowano siatkę obliczeniową, model turbulencji oraz dokonano doboru odpowiednich warunków początkowych i brzegowych. Model numeryczny przyjęty do obliczeń



numerycznych jest zgodny z wynikami uzyskanymi podczas obliczeń testowych. Docelowa siatka obliczeniowa wynosiła nie mniej niż 470 000 komórek obliczeniowych (siatka była identyczna w obu badanych wariantach). Obliczenia numeryczne przeprowadzano w programie Ansys Fluent [6] - wersji Academic Associate. Szczegółowo model numeryczny opisano w pracy [5]. Dane wykorzystywane do obliczeń CFD podano w **Tabeli 3**.

Tab. 3 Dane użyte do obliczeń CFD

Analizowany	Temperatura ciekłej stali, °C	Gęstość ciekłej stali.	Lepkość dynamiczna	Ciepło właściwe	Natężenie gazu (Ar).	Strumień str [7], kW·m	at ciepła -2
gatunek stali		kg·m ^{−3}	stali, kg·m⁻¹ s⁻¹	J·kg ⁻¹ K ⁻¹	dm³·min ⁻¹	Powierzchnia górna	Ściany i dno kadzi
B500B	1585	7011	0,007	821	200	12,5	5,0

Do symulacji numerycznych przyjęto takie same dane materiałowe dotyczące ciekłej stali dla obu rozpatrywanych przypadków (istniejąca technologia i proponowane nowe rozwiązanie), co pozwala na bezpośrednie porównanie wyników badań.

3. Wyniki pilotażowych badań - CFD

Na **Rys. 3** przedstawiono wyniki prognozowanego pola przepływu ciekłej stali obliczonych metodą CFD (rozkład wektorów prędkości stali na płaszczyznach kontrolnych) dla wariantu dotychczasowej technologii - kształtka szczelinowa i proponowanego rozwiązania. Za reprezentatywne uznawano wyniki obliczeń przedstawiające stan ustalony ruchu płynów, czyli wyniki pochodzące z obliczeń po osiągnięciu ich zbieżności na poziomie drugiego rzędu.

W celu określenia udziału stref martwych w objętości kąpieli stalowej, wyniki symulacji numerycznej prognozującej prędkość ciekłej stali w kadzi zawężono do zakresu prędkości 0 - 0,05 m/s. Na **Rys. 4** pokazano wyniki CFD na płaszczyznach kontrolnych dla obu analizowanych wariantów.



Rys. 3 Rozkład wektorów prędkości na charakterystycznych płaszczyznach KS a) dotychczasowa technologia, b) proponowane rozwiązanie – moduł

Aby uwypuklić przestrzenny charakter tego ruchu wyznaczono pola prędkości ciekłej stali na przekroju pionowym przechodzącym przez oś kadzi oraz kształtkę/moduł, oraz na dwóch przekrojach poziomych, zlokalizowanych na wysokościach 0,5m oraz 1,5m licząc od dna kadzi. Porównując przedstawione na rysunkach rozkłady wektorów prędkości, nie ujawniają się większe różnice dla poszczególnych wariantów symulacji. Struktura przepływu cieczy w kadzi stalowniczej jest dla obu przypadków bardzo zbliżona. Widać, że struktura przepływu zdominowana jest przez prąd cyrkulacyjny wytworzony wznoszącą strugą gazową. Kąpiel metalowa rozpływa się w różnych kierunkach na powierzchni cieczy i – po napotkaniu ściany kadzi - jest zawracana w kierunku dna, tworząc silne zawirowania wielkości wektorów prędkości cieczy. W podsumowaniu należy stwierdzić pewną poprawę warunków hydrodynamicznych przy zastosowaniu



dyfuzora KS w objętości cieszy modelowej sprzyjających skuteczniejszemu usuwaniu wtrąceń niemetalicznych. Mimo, że sposób cyrkulacji ciekłej stali w obu wariantach jest zbliżony to mechanizm tworzenia się kolumny gazowej wykazuje dla zastosowania nowego rozwiązania więcej cech uważanych za korzystne z punktu widzenia prowadzenia skutecznej rafinacji ciekłej stali w kadzi stalowniczej.

W celu określenia udziału stref martwych w objętości kąpieli na drodze symulacji numerycznych (**Rys. 4**) wykorzystano fakt, że w tych obszarach prędkość przepływu płynu jest istotnie niższa od pozostałych obszarów. Z reguły w tego typu badaniach, przyjęto, że prędkość poniżej 0,05 m/s stanowi granicę, od której uznaje się przepływ za stacjonarny, a strefę jego występowania za strefę martwą.

Na **Rys. 4**. przedstawiono wyniki obliczonych CFD - mapy konturowe prędkości ciekłej stal na charakterystycznych płaszczyznach, zawężone do zakresu prędkości 0 - 0,05 m/s.

W celu określenia procentowego udziału stref martwych w objętości kadzi stalowniczej zastosowano więc następującą procedurę: wyodrębniono strefy kadzi, w której prędkość ciekłej stali jest mniejsza niż 0,05 m/s, wyznaczono objętość ciekłej stali, dla której prędkość jest mniejsza niż 0,05 m/s – V1 i obliczono udział V1/V0, gdzie V0 to całkowita objętość kadzi stalowniczej. Wyznaczony w ten sposób udział stref martwych w kadzi stalowniczej przedstawiono w **Tabeli 4**.

Z przedstawionego zestawienia (**Tabela 4**) wynika, że moduł – (dyfuzor KS) o szerokości szczelin 170 i ilości 8 sztuk (model - 50) µm charakteryzuje się mniejszym udziałem stref martwych w objętości kąpieli metalowej w kadzi stalowniczej. Zastosowanie modułu zmniejsza udział stref martwych (stagnacyjnych) w przestrzeni roboczej kadzi w stosunku do technologii dotychczasowej. Lokują się one w tych samych rejonach przestrzeni objętości kadzi, jednak zauważalna jest tendencja do ograniczania ich zasięgu.



Rys. 4 Mapy konturowe prędkości ciekłej stali na charakterystycznych płaszczyznach KS a) dotychczasowa technologia, b) proponowane rozwiązanie

Tab. 4 Udziału stref martwych w objętości kąpieli (%) dla rozpatrywanych wariantów badań

Ozn. pomiaru	Natężenie gazu, dm³/min	Parametry kształtki/modułu szer. szczelin, μm/ ilość	Udziału stref martwych w objętości kadzi stalowniczej, %	
Kształtka szczelinowa		250/12	17,47	
Moduł –(dyfuzor KS)	200	170/8	7,22	

4. PROJEKT I WYKONANIE MODUŁÓW MODELOWYCH

Warianty modelowych modułów zostały wykonane po analizie pilotażowych badań CFD przez Sieć Badawczą Łukasiewicz - Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, zgodnie z patentem nr. PL 229475 [4]. Na tym etapie realizacji badań było opracowanie modułów odzwierciedlających rzeczywiste warunki pracy z jednoczesnym uwzględnieniem wymagań narzuconych przez konstrukcję modeli wodnych w/w kadzi (min. uwzględnienie skali modelu (skala 1:3.4)).



Po szczegółowej analizie wyników badań i patentu, ustalono rozmiary modułu (dyfuzora KS) oraz ilość i rozstaw szczelin (**Rys. 5**). Założono, że modelowy moduł KS będzie wyposażony w 8 szczelin ułożonych równolegle, w odległościach 9±0,15 mm. Natomiast szerokość szczelin będzie wynosiła - 50 μ m (co w warunkach przemysłowych równe jest - 170 μ m), oraz w drugim wariancie 150 μ m (co w warunkach przemysłowych równe jest - 510 μ m). Z uwagi na budowę modelu wodnego kadzi stalowniczej, podłączenie króćca doprowadzającego medium gazowe usytuowano na ściance bocznej modułu. W projektowanym - dyfuzorze przemysłowym będzie on usytuowany od dołu.

W celu wykonania dyfuzorów KS modelowych zaprojektowano i zrobiono formę, której projekt obrazuje **Rys. 6**., przedstawia on formę przymocowaną do stołu wibracyjnego, przed i po zalaniu betonem. Wymiary i konstrukcja form odpowiadały wcześniej zaprojektowanym dyfuzorom do badań w modelach wodnych kadzi stalowniczej.

Ostatecznie, zaprojektowano stanowisko (zespół form) dla wykonania modułów – dyfuzorów KS do badań w modelu wodnym. Koncepcję w/w stanowiska przedstawiono na **Rys. 6 a-c**. Wyposażono je w system mocowania elementów (taśm) kształtujących szczeliny. W jego skład wchodzą 3 formy do modelu wodnego kadzi stalowniczej.



Rys. 5 Koncepcja modułu do badań w modelu wodnym kadzi stalowniczej.

W oparciu o koncepcję przedstawioną na **Rys. 6 a-c** zaprojektowano i wykonano stanowisko umożliwiające równoczesne formowanie trzech modelowych dyfuzorów do kadzi stalowniczej (**Rys. 6 d**). W zależności od zastosowanych elementów (taśm) kształtujących szczeliny, w czasie jednego cyklu formowania możliwe jest otrzymanie modułów ze szczelinami o różnej szerokości. Stanowisko mocowane jest do stołu wibracyjnego umożliwiającego odpowiednie zagęszczenie materiału w czasie formowania modułów.



Rys. 6 Projekt i wykonane formy do zrobienia modułów - dyfuzorów modelowych KS: a) projekt stanowiska, b) projekt stanowiska z dyfuzorem, c) projekt - widok całości, d) widok wykonanego stanowiska.



W efekcie pierwszych prób formowania modułów (dyfuzorów KS modelowych) dokonano drobnych korekt konstrukcyjnych stanowiska. Ostatecznie osiągnięto bardzo dobre rezultaty formowania. Wykonane w czasie prób modułów do badań w modelu wodnym kadzi stalowniczej przedstawiono na Rys. 7. Szerokość szczelin - 50 μ m (przemysł - 170 μ m) - 2 szt., oraz 150 μ m (przemysł - 510 μ m) - 1 szt.

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań CFD należy stwierdzić, że nowe rozwiązanie konstrukcyjne modułu typu szczelinowego - dyfuzor KS spełnia założone



Rys. 7 Prototypy modułów (dyfuzorów) do badań z wykorzystaniem modelu fizycznego KS

wymagania w porównaniu z dotychczas stosowanym rozwiązaniem. Analiza wektorów prędkości upoważnia nawet do stwierdzenia, że przy jednakowej wartości strumienia wdmuchiwanego gazu, generowane przez dyfuzor KS warunki hydrodynamiczne w objętości kąpieli metalowej pozwalają oczekiwać wzrostu skuteczności rafinacyjnej układu w porównaniu z dotychczas stosowaną techniką przedmuchiwania. Podobnie zdolność do homogenizacji kąpieli w przypadku zastosowania dyfuzora KS jest większa niż przy zastosowaniu tradycyjnej kształtki gazoprzepuszczalnej typu szczelinowego. Świadczy o tym ograniczenie występowania obszarów stref martwych mieszania.

Takie rezultaty badań stanowiły podstawę do realizacji dalszego etapu badań, czyli wykonania prototypów dyfuzorów KS do dalszych badań z wykorzystaniem modelu wodnego kadzi stalowniczej.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu numer 1/POIR/08/2018 beneficjent Cognor SA Oddział Ferrostal Łabędy Gliwice.

Artykuł powstał dzięki grantowi finansowemu nr BK-202/RM2/2024 dla Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej.

LITERATURA

- [1] LIS, T. Metalurgia stali o wysokiej czystości. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, Poland, 2009.
- [2] JOWSA, J. Engineering of ladle processes in metallurgy, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2008.
- [3] STOLTE, G. Secondary metallurgy fundamentals processes applications, Woodhead Publishing, Dusseldorf 2002.
- [4] BARCHUK, Y., SHCHERBAK, M. Moduł do dennego przedmuchiwania wytopu gazami szlachetnymi. PL Patent 229475, 31 Lipiec 2018.
- [5] MERDER, T., WARZECHA, P., PIEPRZYCA, J., WARZECHA, M., WENDE, R., HUTNY, A. Model investigation of argon injection into liquid steel at ladle furnace station with using of innovative module. Materials 16, 2023, 24, 7698, <u>https://doi.org/10.3390/ma16247698</u>.
- [6] ANSYS. User's Guide; ANSYS: Canonsburg, PA, USA, 2019.
- [7] XIA, J.L., AHOKAINEN, T. Homogenization of temperature field in a steelmaking ladle with gas injection. Scand. J. of Metall. 32, 2003, 211–217.



NOVÁ GENERÁCIA AL₂O₃ – SIC – C STAVÍV SO ZVÝŠENOU ODOLNOSŤOU VOČI KORÓZII TROSKOU V POROVNANÍ S KONVENČNÝMI PÁLENÝMI STAVIVAMI PRE SPRACOVANIE ŽELEZA

¹CHUDÍKOVÁ D., ¹MIŠANEKOVÁ V., ¹HIRJAK R., ¹KAMENSKÝ R., ¹BABA M., ¹PIROŠKO M., ²MAŠLEJOVÁ A., ²DEMČÁKOVÁ M.

> ¹RMS Košice s.r.o., Košice, Slovensko ²U. S. Steel Košice, s.r.o., Košice, Slovensko

Abstrakt

Stavivá surovinovej skladby oxid hlinitý, karbid kremíka a uhlík nachádzajú čoraz väčšie uplatnenie v oblasti procesu úpravy tekutých kovov v pojazdnom miešači po celom svete. V procese spracovania železa v panvách a miešačoch sú žiaruvzdorné materiály vystavené veľmi prísnym požiadavkám na životnosť. Ich výhodou pre výrobcu je v porovnaní s pálenými stavivami nižšia spotreba energie na výrobu. Staviva sa temperujú pri teplotách okolo 200 °C, zatiaľ čo pálené stavivá na báze rovnakej suroviny vyžadujú teplotu výpalu takmer 1550 °C. Merná spotreba plynu pri výpale je tak rádovo vyššia.

Ďalšou výhodou týchto stavív je ich extrémna odolnosť proti prieniku trosky a železa, majú vynikajúcu odolnosť proti tepelným šokom, odolnosť proti korózii a sú preto vhodné ako pre zónu železa, tak aj pre zónu trosky a zónu nárazu v spodnej časti nalievacej panvy surového železa. V tomto príspevku bola vykonaná kompletná štúdia porovnania rôznych vlastností stavív, ktoré ovplyvňujú aplikáciu v nalievacej panve na prepravu železa. Železo sa ešte vo väčšine hutí vyrába vo vysokých peciach a v ďalších procesoch výroby sa spracováva v pojazdných miešačoch a nalievacích panvách. V nalievacej panve prebieha odsírenie železa za pomoci odsírovacích zmesí na báze vápna (CaO), horčíka (Mg) a iných za vzniku sulfidov, ktoré prechádzajú do trosky. Troska sa následne z povrchu železa v nalievacej panve oddeľuje a v nalievacej panve ostáva čisté odsírené železo pripravené na ďalšie spracovanie v kyslíkovom konvertore.

1. ÚVOD

V niektorých hutiach sa surové železo z pojazdného miešača, ktorý zabezpečuje transport surového železa na oceliareň, dostáva do nalievacej panvy na spracovanie, inde slúžia nalievacie panvy aj na transport, aj na liatie do kyslíkového konvertora. Tým sa pobyt železa v nalievacej panve predlžuje. Žiaruvzdorný materiál v takomto náročnom procese musí odolávať ako chemickým, tak aj tepelným a mechanickým šokom. Jeho životnosť je priamo úmerná opotrebovaniu a starostlivosti zo strany prevádzkovateľa. Najnebezpečnejším prvkom v železe je síra, ktorá následne spôsobuje krehkosť ocele a znižuje odolnosť voči korózii. Síra sa zo surového železa odstraňuje pomocou troskotvorných prísad a fúkaním kyslíka. Najčastejšie používanou odsírovacou zmesou je CaO (vápno), kedy sa síra naviaže na Ca (vápnik) podľa schémy:

 $S + Ca + C \rightarrow CaS + CO, alebo S + Ca + Si \rightarrow CaS + SiO_2.$

Keďže sa v priebehu vzniku komplexných zlúčenín tvoria ťažko-taviteľné fázy, do trosky sa pridáva kazivec, ktorý spôsobí stekutenie trosky.

Spoločnosť RMS Košice s.r.o. pre nalievacie panvy a pojazdné miešače dodáva stavivo ALKO 60 A na báze andaluzitu (**tab. 1**) do niekoľkých hutí s rôznymi výsledkami životností v závislosti na podmienkach prevádzkovania.



Fyzikálne parametre			Chemické zloženie		
OH (kg.m-3)	.m-3) ZP (%) PTL (MPa)		Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	
min. 2440	max. 17	min. 55	min. 59	max. 1,2	

Táto práca sa zaoberá vyhodnotením podmienok prevádzkovania pôvodného staviva (ALKO 60 A) a návrhom nového staviva (ALKO 66 ASC), ktoré by mohlo spĺňať náročné podmienky prevádzkovania za optimálnej výkonnosti staviva.

Pálené stavivo ALKO 60 A je vytvorené na báze andaluzitu a prísad, je charakterizované nízkou zdanlivou pórovitosťou, vysokou pevnosťou v tlaku, vysokou únosnosťou v žiare, nízkymi hodnotami tečenia v tlaku a vysokou odolnosťou voči zmenám teploty

Napriek týmto vynikajúcim charakteristikám, dosahujeme v huti A životnosť staviva asi 400 – 500 tavieb a v huti B okolo 900 – 1000 tavieb. Z uvedeného teda vyplýva, že podmienky v huti A sú náročné natoľko, že dochádza k nadmernému opotrebeniu staviva a jeho vynikajúce vlastnosti nie sú postačujúce na aktuálny stav a podmienky. Bolo vykonaných niekoľko meraní stavív po ukončení kampaní, ktoré budú zhrnuté v nasledujúcich kapitolách.

2. EXPERIMENTÁLNE MERANIE ALKO 60 A

Surové železo s teplotou 1430 – 1450 °C sa leje z pojazdného miešača do studenej nalievacej panvy. Valcová časť je vymurovaná stavivom ALKO 60 A a výlevka torkrétovaná andaluzitovým betónom so stredným obsahom cementu (**obr. č. 1**). Na odsírenie sa používa odsírovacia zmes (**tab. č. 2**) obsahujúca vápno (CaO), horčík (Mg) a kazivec (CaF₂), ktorá sa injektuje odsírovacími dýzami. Najviac opotrebená časť nalievacej panvy je v mieste fúkania alebo oproti výlevke, kde dochádza k erózii výmurovky.



Obr. 1 – Nalievacia panva post mortem

Tab. 2 Chemické zloženie odsírovacej zmesi

Odsírovacia zmes	CaO (%)	Mg (%)	CaF₂ (%)
	67	30	3



Po niekoľkých kampaniach sa valcová časť panvy torkrétuje bázickým betónom s fosfátovou alebo kremičitanovou väzbou, jeho teoretické chemické zloženie je uvedené v **tabuľke č. 3**.

Tab. 3 Chemické zloženie bázického torkretačného materiálu

Bázický torkretačný materiál	MgO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO2 (%)	P2O5 (%)
	73	9	6,5	2	6,5

Po ukončení kampane bola vykonaná vizuálna kontrola zostatkovej hrúbky a RTG fázová analýza nálepov na povrchu staviva. Zostatková hrúbka staviva po 300 liatiach je v miestach vírenia taveniny od 0 do 6 cm, čo je už pod bezpečnostnou limitnou hranicou. Mechanizmus odlupovania je nasledovný: 0,5 mm hrúbky sa odlúpne pri každej tavbe za predpokladu, že výmurovka panvy je opakovane nahrievaná na maximálnu teplotu surového železa a ochladená pod 2/3 maximálnej teploty liatia surového železa, no vo väčšine prípadov je teplota po schladení nalievacej panvy rovná až teplote okolia. V tomto prípade dochádza k postupnému olupovaniu výmurovky. Ak v procese ochrany výmurovky sa nanáša torkretačný materiál miešaný s prídavkom vody za studena, opotrebenie výmurovky je rýchlejšie.

Na stavivách post mortem bola vykonaná fázová analýza a bola zisťovaná prítomnosť zlúčenín negatívne ovplyvňujúcich životnosť agregátu. Pri hrúbke staviva 177 mm bola hĺbka penetrácie železa zlúčenín vznikajúcich pri odsírení a ošetrovaní približne 90 mm (**obr. 2 a 3**). Boli zámerne vybraté také vzorky, ktoré boli odlišné hĺbkou penetrácie a líšia sa aj sfarbením. Pri chemickej analýze vzoriek č. 5 a č. 8 bolo zistené, že sa líšia obsahom MgO, Al₂O₃, CaO smerom od teplej ku studenej strane (**tab. 4**). Keďže základnou surovinou je andaluzit, očakávaný obsah Al₂O₃ je cca 60 %, jeho koncentrácia v stavive sa znižuje so zvyšovaním Fe₂O₃ a MgO, pochádzajúce z torkretačného materiálu, resp. vznikol oxidáciou pridaného horčíka (Mg) z odsírovacej zmesi. Poslednou testovanou vzorkou bol nálep, ktorý sa skladal prevažne z oxidu železitého a oxidu horečnatého. Oba oxidy pochádzajú z torkretačného materiálu, a keďže ide o odlupovanie andaluzitového staviva, vzorka obsahuje aj oxidy Si a Al pochádzajúce z pôvodnej skladby staviva.



Obr. 2 Vzorka č. 5 staviva ALKO 60 A post mortem



Obr. 3 Vzorka č. 8 staviva a nálepu ALKO 60 A post mortem

Fab. 4 Chemické zloženie vzoriek č. 5 a	č. 8, TS – te	eplá strana, :	SS – studená strana
--	---------------	----------------	---------------------

Chemické zloženie	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO₂ (%)	MnO (%)	S (%)
Vzorka č. 5/ TS	35	54	7	0,7	1,12	0,3	0,4	0,024
Vzorka č. 5/ SS	35	61	1,9	0,2	0,31	0,28	0,04	0
Vzorka č. 8/ TS	35	52	8,22	0,9	1,43	0,4	0,8	0,017
Vzorka č. 8/ SS	35	61	1,27	0,17	0,22	0,3	0,24	0
Nálep č. 8	9,7	5,2	33,8	6,2	32,5	0,16	0,6	0,618



Ak dochádza k postupnému odlupovaniu výmurovky, deje sa to pri každom naliatí železa do panvy. Stuhnuté ťažko-taviteľné fázy sa cez praskliny a zatekanie ocele do špár oddeľujú od výmurovky a sú vyplavované do trosky. Obsah síry na úrovni 0,017 % – síra difundovala do objemu staviva. Na teplej strane staviva je výrazne vysoký obsah Fe₂O₃ (8,22 %) a vysoký obsah MgO (1,42 %). Tieto oxidy (z **tab. č. 4**) v stavive spôsobili vytvorenie fázy indialit (2Mg/FeO.2Al₂O₃.5SiO₂ Tt = 1465 °C) (**tab. č. 5**), jej teplota tavenia je tesne nad teplotou tavenia železa. V tejto vrstve mohlo dôjsť k tvorbe taveniny, zatekaniu železa do medzi-zrnných priestorov a narušeniu štruktúry a odlupovaniu.

Fázové zloženie	Mulit Al₀Si₂O₁₃	Kristobalit SiO ₂	Fe – alfa	Korund Al ₂ O ₃	Hercynit FeAl ₂ O ₄	Andaluzit Al₂SiO₅	Indialit 2Mg/FeO.2Al ₂ O ₃ .5SiO ₂
Vzorka č. 5/ TS	87	4,5	2,3	1,5	3	0,7	0
Vzorka č. 5/ SS	85	7	0	4,19	0,12	3,6	0
Vzorka č. 8/ TS	90	2,19	1,67	2,16	0	0	3,18
Vzorka č. 8/ SS	92,6	0,55	0,2	3,18	0	0	3,45

Tab. 5 Fázové zloženie vzoriek č. 5 a č. 8, TS – teplá strana, SS – studená strana, %

Kristobalit, korund a mulit sú pôvodnými fázami staviva. RTG fázovou kvantitatívnou analýzou vzoriek uvedenej v **tabuľke č. 5**, bola dokázaná prítomnosť zlúčenín s vysokým bodom tavenia.

Nálep (**tab. 6**) je bohatý na MgO (32,5 %), Fe₂O₃ (33,81 %) a CaO (6,18 %) v hrúbke 4 – 5 cm. Obsah síry v nálepe 0,618 %. V železe sa nachádza 0,06 % až 0,002 % síry. V nálepe je 10 až 100-násobne prekročený obsah síry. Nálep sa skladá zo 42 % periklasu, ktorý je základnou fázou bázických torkretačných materiálov, 6,62 % magnoferit je novovzniknutá fáza v reakcii tokrétu a železa, 3,11 % magnetit s približnými teplotami tavenia 1583 – 1597 °C, hematit (Tt = 1538 °C) je fázou pochádzajúcou z oxidácie železa. 4,1 % spinelu MgO.Al₂O₃ vzniklo v reakcii torkretačného materiálu a voľného korundu v stavive. Keďže železo obsahovalo 10-násobné množstvo síry, vytvorili sa v nálepe sulfidy železa (FeS). Monticelit (Tt = 1503 °C) je produktom reakcie vápna (CaO) z odsírovacej zmesi MgO z torkretačného materiálu a Al₂O₃ buď z odsírovacej zmesi alebo zo staviva. Rovnako môže pochádzať táto fáza aj z použitého torkretačného materiálu, ktorého zloženie nepoznáme. Olivín (Tt = 1900 °C) je zložkou torkretačného materiálu.

Tab. 6 Fázové zloženie nálepu na vzorke č. 8 v %

Fázové zloženie	Fe- alfa	Andaluzit Al₂SiO₅	Periklas MgO	Magnoferit (Mg.Al)₃O₄	Magnetit Fe₃O₄/ Hematit Fe₂O₃	Spinel Fe(Mg.Al)₃O₄	Troilit FeS	Monticellite CaMgSiO₄	Olivine FeMgSiO₄
Nálep vzorky č.8	20,15	1,05	42,06	6,68	3,11/2,18	4,08	0,9	13,38	6,40

V neposlednom rade nemožno opomenúť spotrebovávanie odsírovacích zmesí. Čím vyšší obsah síry, tým vyššia spotreba odsírovacej zmesi, tým dlhší pobyt železa v nalievacej panve majú za následok rýchlejšie opotrebenie výmurovky.

V laboratórnych podmienkach bol vykonaný téglikový korózny test odsírovacou zmesou s chemickým zložením uvedeným v **tabuľke č. 2**. Test bol vykonaný na teliesku 100x100 mm s hĺbkou téglika 70 mm x ø 50 mm. Test prebiehal pri teplote 1550 °C/5 hodín. Ako je vidieť na obrázku č. 4, stavivo sa v zmesi železa a odsírovacej zmesi rozpúšťa.



Obr. 4 Téglikový korózny test staviva ALKO 60 A



3. VERIFIKÁCIA VLASTNOSTÍ STAVIVA ALKO 66 ASC PRE PODMIENKY V NALIEVACEJ PANVE

Svet sa mení, technológie sa menia, materiály nie sú tie, čo boli pred 20 rokmi, aj my sme nútení meniť veci k lepšiemu. Skúmať ich výhody a nevýhody a rozhodovať sa na základe získaných výsledkov, experimentov a faktov. Samozrejme výsledok v ideálnych laboratórnych podmienkach je krásna a radostná vec. Potom prichádza prevádzková realita, veci sa dejú a všetko sa mení za pochodu. Návrh nového materiálu a test v laboratóriu je 20 % úspechu. Ďalších 80 % tvorí technológia výroby, inštalácia a reálne prevádzkovanie. Všetky tieto udalosti musia do seba zapadať ako kolieska v hodinkách. Jedno koliesko poháňa to druhé a tretie, a nakoniec to tretie sa vráti k tomu prvému, lebo niečo nebolo ideálne. Tak to má byť, aby sme boli stále lepší, prijímame názory iných, analyzujeme a skúmame. Ten úspech nakoniec príde.

Temperované stavivo ALKO 66 ASC je odpoveďou na meniace sa podmienky, hlavne zvyšovanie cien energií a znižovanie životností nalievacích paniev. Pálené stavivá sú energeticky náročné tak na výpal, ako aj na starostlivosť. Nové stavivo ALKO 66 ASC je na báze andaluzitu a prísad, pojené ekologickou živičnou väzbou bez prídavku fenolu s obsahom uhlíka.

V **tabuľke 7** sú chemické a fyzikálne vlastnosti staviva. Meranie fyzikálnych vlastností bolo realizované podľa STN EN 993.

F	- yzikálne parametro	9		Chemické zloženie	
OH (kg.m⁻³)	OH (kg.m ⁻³) ZP (%)		Al ₂ O ₃ (%)	SiC (%)	C (%)
2860	7,5	50	66	7	10

Tab. 7 - Parametre staviva ALKO 66 ASC

Dôvodov, prečo navrhujeme tento typ staviva do nalievacej panvy, je niekoľko. Prvým a najdôležitejším je práve odolnosť proti odlupovaniu vplyvom penetrácia trosky do objemu staviva. Grafit zabezpečí odolnosť staviva voči zmáčavosti taveninami. Andaluzit, ako hlavná surovina, zabezpečí odolnosť voči tepelným šokom, pri správnej teplote výpalu je jeho únosnosť v žiare oveľa vyššia ako pri použití bauxitu.

Bolo vykonaných niekoľko nasledovných testov pre dokázanie týchto tvrdení.

3.1 Meranie tepelných šokov

Na stanovenie odolnosti voči tepelným šokom bola použitá norma ASTM 1525, kedy sa testovaná vzorka ohreje na teplotu 1093 °C a ponorí sa to studenej vody. Skúma sa počet cyklov a výskyt trhlín na povrchu vzorky.



Obr. 5 – Vyhodnotenie odolnosti voči náhlym zmenám teploty ALKO 66 ASC

Dôležitou operáciou pri prevádzkovaní nalievacej panvy je jej ošetrovanie. Pri ošetrovaní sa používajú torkretačné materiály miešané vodou. Nanášajú sa po čiastočnom schladnutí panvy. Stavivo ALKO 66 ASC


bolo podrobené 30. cyklom. Ako je uvedené na **obrázku č. 5**, po dvanástich cykloch nedošlo k výskytu trhlín na povrchu vzorky. Po šestnástich cykloch boli pozorované mierne trhliny. Po tridsiatich cykloch boli pozorované stredné trhliny, ale ako je vidieť na obrázku, nedošlo k porušeniu celistvosti vzorky.

3.2 Meranie miery oxidačnej odolnosti

Nalievacia panva sa opakovane podrobuje tepelným šokom a zároveň je vystavená oxidačnej atmosfére. Stavivá s obsahom uhlíka môžu na povrchu reagovať s kyslíkom a tvorí sa oduhličená vrstva, dochádza k vyhorievaniu uhlíka na povrchu. Táto testovacia metóda zahŕňa hodnotenie oxidácie, resp. odolnosť žiaruvzdorných materiálov s obsahom karbidu kremíka pri zvýšených teplotách v atmosfére pary. Para sa používa na urýchlenie testu. Oxidačná odolnosť je schopnosť karbidu kremíka (SiC) v žiaruvzdornom materiáli odolávať premene na oxid kremičitý (SiO₂) a pozoruje sa jeho sprievodný kryštalický rast spojený s objemovou zmenou. Keďže v našom laboratóriu nemáme možnosť priviesť do pece paru, test bol vykonaný vo vzdušnej atmosfére, pričom sme pozorovali oxidáciu na povrchu vzorky a zmenu objemu na teliesku 50x50 mm. Test bol vykonaný pri teplote 1482 °C s dobou trvania 5 hodín a výsledky sú uvedené na **obr. č. 6**. Plocha, ktorá je oduhličená alebo oxidovaná, nesmie podľa normy prekročiť 40 %. Na pozorovanom teliesku nie je dekarbonizovaná plocha merateľná, pričom zmena objemu bola 2,2 % pri teplote 1482 °C. Táto objemová zmena mohla byť spôsobená fázovou premenou andaluzitu na mulit.



Obr. 6 - Vyhodnotenie oxidačnej odolnosti ALKO 66 ASC

3.3 Korózny test železom a troskou

Korózne testy boli vykonané v oxidačnej atmosfére pri teplote 1550 °C so železom a 1500 °C s troskou s dobou trvania 5 hodín na telieskach 100x100 mm s hĺbkou diery 70 mm a ø 50 mm. Obrázok č. 7 dokumentuje, že stavivo ALKO 66 ASC odoláva surovému železu, nie je pozorovateľná žiadna interakcia železa a žiaruvzdorného materiálu. Rovnako aj koróznu odolnosť staviva voči vysokopecnej troske môžeme hodnotiť ako vyhovujúcu. Základným predpokladom pre takýto výsledok je nízka zdanlivá pórovitosť 7,5 %.





Obr. 7 – Vyhodnotenie koróznej odolnosti ALKO 66 ASC železom a vysokopecnou troskou



3.4 Meranie únosnosti v žiare

Únosnosť v žiare bola vykonaná s cieľom zistiť, pri akej teplote sa teliesko začne deformovať, keďže na stavive ALKO 60 A je nameraná 0,5 % deformácia pri teplote 1677 °C (**obr. č. 8a**). Stavivo ALKO 66 ASC sa deformuje o 0,5 % pri teplote 1701 °C (obr. č. 8b). Krivky oboch únosností sa líšia práve spôsobom výroby. Stavivo ALKO 66 ASC je temperované pri 200 °C a jeho krivka zodpovedá fázovej premene andaluzitu. Stavivo ALKO 60 A je vypálené pri teplote 1450 – 1500 °C a andaluzit je už premenený na mulit. Únosnosť v žiare bola meraná po vyhriatí na 800 °C v oxidačnej atmosfére.









3.5 Meranie pevnosti v ohybe

Pre stavivá vhodné do výmuroviek nalievacích paniev a pojazdných miešačov pre spracovanie surového železa je predpísaná skúška pevnosti v ohybe za tepla. Podľa normy je požiadavka, aby pri teplote 1370 °C s dobou výdrže 5 hodín v peci s oxidačnou atmosférou bol dosiahnutý stredný modul prasknutia > 250 psi (1,7 MPa). V našich laboratórnych podmienkach nemáme možnosť merať pevnosť v ohybe za tepla, preto sme merali pevnosť v ohybe za studena po výpale na teplotu 1482 °C. Rozdiel medzi pevnosť v ohybe za tepla sa na stavivách s obsahom karbidu kremíka pohybuje od 1 – 5 MPa, zatiaľ čo pevnosť v ohybe za studena na vypálených telieskach je v rozmedzí od 10 – 15 MPa. Na stavivách ALKO 66 ASC bola nameraná hodnota 12 MPa.

4. DISKUSIA

Ak by sme mali zhrnúť a porovnať výhody a nevýhody používania páleného staviva ALKO 60 A a temperovaného staviva ALKO 66 ASC, hlavnou výhodou je vynikajúca korózna odolnosť temperovaného staviva. Pri tomto type stavív sa kladie vysoký zreteľ na nízku tvorbu oduhličenej vrstvy pri opakovaných ohrevoch panvy. Cieľom je dosiahnuť pri ohreve na prevádzkovú teplotu čo najtenšiu vrstvu bez uhlíka. V tejto vrstve dochádza ku zvýšenej pórovitosti, ktorá dáva možnosť tavenine prenikať do medzi-zrnných priestorov. Práve korózna odolnosť voči tavenine železa a trosky je zabezpečená prídavkom uhlíka a karbidu kremíka. Pri pálenom stavive ALKO 60 A dochádza ku postupnému olupovaniu vrstiev penetrovaných taveninou. Troska tvorená oxidmi z odsírovacej zmesi a torkretačného materiálu je hustá a lepkavá. Na pálených stavivách je uhol zmáčania väčší ako na temperovaných stavivách, je teda predpoklad, že bude dochádzať k rýchlejšiemu úbytku hrúbky výmurovky.



5. ZÁVER

Výsledky laboratórneho testovania stavív na báze andaluzitu páleného a temperovaného smerujú k využívaniu práve temperovaných stavív v náročných podmienkach nalievacích paniev a pojazdných miešačov s cieľom znižovania nákladov na spotrebu zemného plynu pri temperovaní agregátov na prevádzkové podmienky. Po laboratórnych testoch budú nasledovať poloprevádzkové skúšky, o ktorých pevne dúfame, budeme môcť informovať na ďalšej konferencii.

LITERATÚRA

- [1] TAKI, N. et al.: Improvement of Refractory Life for Teeming Ladles. J. Techn. Assoc. of Refr. Japan, 37 (2017), 4, 236-244
- [2] MATSUO, Y. et al.: Ladle Refractory Cost Reduction. refractories worldforum 8 (2016), 1, 22-26
- [3] Tetsuo HIROTA, Masayuki SAKAGUCHI and Yukio OGUCHI. Deformation behaviour under load of Al2O3–SiC-C Bricks for Torpedo Car, Taikabutsu Overseas Vol 15, No 2, pp 42–47.
- [4] N SAHOO, S K CHOUDHRY, Development of improved quality Alumina silicon carbide carbon bricks for hot metal transfer and Torpedo Ladles, UNITECR 07, pp 381–383.
- [5] Joao R.C FILHO, Manoel Poubel BESTOS, Gerson Correa FILHO. Performance of Al2O3-SiC-C for Torpedo car lining. UNITECR 93, pp 1632–1640.



www.hobra.cz



CEMENTÁCIA VÝLUHOV Z LÚHOVANIA EOP ÚLETOV A PRÍPRAVA KONEČNÉHO PRODUKTU

TAKÁČOVÁ Zita, PIROŠKOVÁ Jana, MIŠKUFOVÁ Andrea

Ústav recyklačných technológií, Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie, Technická univerzita v Košiciach, Letná1/9, Košice – Sever, Slovensko, <u>zita.takacova@tuke.sk</u>

Abstrakt

Príspevok sa zameriava na štúdium podmienok cementácie kovových kontaminantov z výluhov po alkalickom lúhovaní oceliarenských úletov s koncentráciou Zn 8250 a 11750 µg/ml a na prípravu konečného produktu oxidu zinočnatého cestou kryštalizácie a kalcinácie. Obsah prímesí kovov, ako Fe, Pb, Cu, Cr, Mn sa vo výluhoch pohyboval v jednotkách až desiatkach µg/ml. Ako cementátor sa použila zmes práškového Al a Zn v pomere 1:1. Sledoval sa vplyv navážky cementátora (Al:Zn = 2,5:2,5 g/l respektíve 5:5 g/l) a teploty (20, 40, 60 80 °C) na účinnosť odstraňovania vybraných kontaminantov – Fe, Pb a Cu. Zistilo sa, že teplota (t) významne vplýva najmä na odstraňovanie železa. Pri t = 20 °C sa pri nižšej navážke cementátorov vycementovalo iba 40 % Fe, kým pri teplote 80 °C až 100 %. Ostatné sledované kovy sa cementovali so 100 %-nou účinnosťou aj pri t = 20 °C. Rafinovaný výluh sa spracovával kryštalizáciou s následnou kalcináciou získaného medziproduktu pri t = 900 °C počas 4 hod. Maximálna čistota produktu ZnO 96,7 % sa dosiahla spracovaním výluhu cementovaného pri stanovených optimálnych podmienkach, a to pomere cementátorov Zn:Al = 5:5 g/l a t = 60 °C. Získaný ZnO má veľký potenciál pre použitie v polovodičovej technike na výrobu varistorov, kedy prítomné nečistoty Si, Ca ktoré nemožno odstrániť cementáciou, a zostatková koncentrácia Fe môžu pôsobiť ako želané dopanty.

Kľúčové slová: Oceliarenský úlet, hydrometalurgia, cementácia, kalcinácia, oxid zinočnatý

1. ÚVOD

Recyklácia úletov z elektrických oblúkových pecí (EOP) je v súčasnosti široko diskutovanou témou, a to z dôvodu jeho vysokej produkcie, nebezpečných vlastností a ekonomickej hodnoty vďaka obsahu zinku. V súčasnosti sa úlety z EOP s nízkym obsahom Zn (približne 3 %) primiešavajú do peliet/brikiet na výrobu železa. V prípade úletu s vyšším obsahom Zn (25 - 46 %) sa uprednostňuje pyrometalurgické spracovanie [1], najmä Waelzov proces, ktorým sa spracuje takmer 90 % vyprodukovaného úletu. Produktom je surový ZnO, ktorý sa následne rafinuje elektrolyticky alebo ISP procesom (Imperial Smelting Process) [2,3]. Hydrometalurgické spracovanie EOP úletov sa v priemysle používa len zriedkavo. Vo výskumnom meradle však existuje množstvo štúdií zaoberajúcimi sa procesmi kyslého lúhovania úletov [4 - 10]. Okrem kyslého lúhovania možno pri spracovaní úletov z EOP použiť aj alkalické médiá, ako napríklad NaOH [3] a (NH₄)₂CO₃ [11, 12]. Výhodou alkalických lúhovacích činidiel je vzájomná separácia železa a zinku, pretože kým zinok prechádza do výluhu, väčšina železa sa koncentruje v nerozpustnom zvyšku. Dôvodom je skutočnosť, že zinok sa extrahuje najmä zo ZnO, zatiaľ čo železo sa z fázy ZnFe₂O₄ nevylúhuje. Okrem zinku sa však do výluhu extrahuje aj množstvo sprievodných kovov, ako je Fe, Pb, Cu, Cr, Mn, Si, Cd, atď. [3, 11, 12]. Z uvedeného dôvodu je potrebné výluhy pred ďalším spracovaním rafinovať. Najbežnejšou a najdostupnejšou metódou rafinácie je cementácia, kde sa ako cementačné činidlo používa zinok, ktorý navyše obohacuje výluh.

Keďže predchádzajúce výsledky poukázali na nedostatočnú účinnosť rafinácie výluhu, zvolila sa kombinácia kovového práškového zinku a hliníka s cieľom zlepšiť účinnosť procesu cementácie. Cieľom tejto práce bolo študovať podmienky cementácie vybraných sprievodných kovov, hlavne Fe, Cu a Pb (typ a množstvo cementátora, teplota 20 – 80 °C) z výluhov vznikajúcich pri lúhovaní EOP úletov pomocou (NH₄)₂CO₃.



Zámerom bolo získať rafinovaný výluh s dostatočnou čistotou pre následnú kryštalizáciu medziproduktu a zisk kalcinovaného ZnO s vhodnými vlastnosťami na jeho použitie v keramickom, elektrotechnickom alebo gumárenskom priemysle.

2. TERMODYNAMICKÉ ŠTÚDIUM

Pre účely predikcie podmienok cementácie sa zostrojili pomocou HCS Chemistry 6.1 E-pH diagramy pre systémy Me-Zn-Al-C-N (kde Me = Fe, Pb, Cu) pri najnižšej z uvažovaných teplôt (20 °C). Zvolil sa rozsah pH 6 – 10, pričom sa forma prítomnosti skúmaných kovov hodnotila pri pH = 8 - 9, čo predstavovalo skutočné pH výluhu. Zároveň sa zohľadnili aj maximálne koncentrácie cementovaných kovov vo výluhoch.



Obr. 1 E-pH diagramy pre systémy Me-Zn-Al-C-N-H₂O pri 20 °C, kde Me = Fe a), Pb b), Cu c)

Ako vyplýva z E-pH diagramov, oblasť stability kovového Fe v prítomnosti (NH₄)₂CO₃ a iných rozpustených nečistôt sa nachádza v oblastiach mimo stability vody v celom uvažovanom rozsahu pH, preto možno očakávať, že pomocou Zn a Al pri uvažovanom pH = 8-9 sa železo môže z roztoku odstrániť skôr ako FeCO₃ než ako kovové Fe. Priebeh cementácie železa pri teplote 20 °C reprezentujú chemické reakcie (1, 2) a hodnota ΔG^{0}_{293} vypočítaná na 1 mol cementovaného kovu.



(9),

$$2Fe^{+2} + Zn + 4CO_{3}^{-2} + H_{2}O = ZnO + 2FeCO_{3} + 2HCO_{3}^{-} + 2e^{-}, \Delta G^{0}_{293} = -78,60 \ [kJ/mol]$$
(1),

$$6Fe^{+2} + 2AI + 12CO_{3}^{-2} + 3H_{2}O = AI_{2}O_{3} + 6FeCO_{3} + 6HCO_{3}^{-} + 6e^{-}, \Delta G^{0}_{293} = -43,65 \ [kJ/mol]$$
(2).

$$Pb^{+2} + 1.5 Zn + 3CO_3^{-2} + 3H_2O = 1.5Zn(OH)_2 + Pb + 3HCO_3^{-} + e_{-}, \Delta G^{0}_{293} = -273,33 [kJ/mol]$$
(3),

$$Pb^{+2} + AI + 3CO_{3^{-2}} + 3H_{2}O = AI(OH)_{3} + Pb + 3HCO_{3^{-}} + e^{-}, \Delta G^{0}_{293} = -578,00 \ [kJ/mol]$$
(4).

Meď sa môže z výluhu za stanovených podmienok pri teplote 20 °C odstrániť ako Cu alebo CuCO₃, (5-7),

$$Cu^{+2} + AI + 3CO_{3^{-2}} + 3H_{2}O = AI(OH)_{3} + Cu + 3HCO_{3^{-}} + e^{-}, \Delta G^{0}_{293} = -670,50 \ [kJ/moll]$$
(5),

$$Cu^{+2} + 1.5Zn + 3CO_{3^{-2}} + 3H_{2}O = 1.5Zn(OH)_{2} + Cu + 3HCO_{3^{-}} + e_{-}, \Delta G^{0}_{293} = -362, 18 [kJ/mol]$$
(6),

$$6Cu^{+2} + 2AI + 12CO_{3}^{-2} + 3H_{2}O = AI_{2}O_{3} + 6CuCO_{3} + 6HCO_{3}^{-} + 6e^{-}, \Delta G^{0}_{293} = -43,05 \ [kJ/mol]$$
(7).

Termodynamické štúdium potvrdilo pravdepodobnosť cementácie sprievodných kovov pomocou kovového zinku a hliníka, kde ΔG^0 očakávaných reakcií nadobúda zápornú hodnotu, t. z. pri teplote 20 °C by mali prebiehať v smere tvorby produktov.

Pri vyšších teplotách sa proces cementácie môže líšiť, a to aj v dôsledku rozkladu (NH₄)₂CO₃ a prítomnosti iných zlúčenín na báze dusíka, uhlíka a vody, pretože približne pri 50 °C sa začína rozkladať (NH₄)₂CO₃ a uvoľňovať plynný NH₃ a CO₂ podľa reakcie *(8)*

$$(NH_4)_2 CO_3 = 2NH_{3(g)} + CO_{2(g)} + H_2O, \ \Delta G^0_{353} = -6,2 \ [kJ/mol]$$
(8).

Otázkou v praktickom meradle je aj pasivácia práškového Zn a Al a jej vplyv na rýchlosť a účinnosť cementácie a formu cementačných produktov.

3. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Na experimenty cementácie sa použili výluhy po alkalickom lúhovaní EOP úletov so zložením uvedeným v **Tab. 1**, ktoré sa získali nasledovným postupom: 1. Lúhovanie EOP úletu vo vode; 2. Lúhovanie premytého úletu v (NH₄)₂CO₃ s koncentráciou 100 g/l, 50 °C, 2 hodiny, K:P = 10; 3. Opätovné lúhovanie úletu získaným výluhom obohateným o 25 g/l (NH₄)₂CO₃, 50 °C, 30 minút, K:P = 10. Opätovné lúhovanie sa aplikovalo v záujme zvýšenia výťažnosti zinku. Obsah vybraných sledovaných kovov vo výluhoch použitých na cementačné experimenty je uvedený v **Tab. 2.** Chemická analýza úletov, výluhov a získaného produktu sa vykonala metódou atómovej adsorpčnej spektrometrie (AAS) pomocou prístroja Varian AA240+.

Tab. 1 Chemické zloženie vstupného úletu z EOP

Zložka	Zn	Fe	Pb	Cd	Cu	Cr	Mn	Ni	Ca	Si
[hm. %]	28,01	26,34	0,73	0,02	0,12	0,31	1,90	0,013	5,25	1,44

Cementácia sa realizovala v sklenenom reaktore, ktorý bol vložený do termostatom kontrolovaného vodného kúpeľa, za nasledovných podmienok: cementátor Zn:Al v pomere 2,5:2,5 g/l, 5:5 g/l výluhu, teplota 20, 40, 60 a 80 °C, čas 30 minút, 300 otáčok/min. Účinnosť cementácie sa vypočítala podľa vzťahu (9):

$$\mu = \frac{c_{(0)} - c_{(1)}}{c_{(0)}} \cdot 100 \ (\%)$$

kde c₍₀₎ je počiatočná koncentrácia kovu vo výluhu, c₍₁₎ je konečná koncentrácia kovu vo výluhu.

Výluhy po cementácii ďalej postupovali na kryštalizáciu medziproduktu na báze hydrátovaného uhličitanu zinočnatého a jeho kalcináciu za účelom získania práškového ZnO. Kryštalizácia zásaditého výluhu prebiehala pri teplote 105 °C v kryštalizačných miskách. Produkt kryštalizácie sa následne kalcinoval pri teplote 900 °C počas 4 hod. Kalcináty sa podrobili analýze AAS, röntgenovej difrakčnej fázovej kvalitatívnej analýze a pozorovaniu pomocou skenovacieho elektrónového mikroskopu (SEM).



3.1. Dosiahnuté výsledky

3.1.1 Cementácia sprievodných kovov

Obsah Zn, Fe, Pb a Cu vo výluhoch pred a po cementácii a účinnosť cementácie sú uvedené v Tab. 2.

		Pred cementáciou/	Zn	Fe	Pb	Cu	рН
t [°C]	Cementátor	Po cementácii			-		
	2,5 g/l Zn	Pred	8250	5,54	21,39	7,59	9,02
20 °C	2,5 g/l Al	Po / <mark>η [%]</mark>	8180	3,39 / <mark>38,8</mark>	0 / 100	0 / 100	9,01
	5 g/l Zn	Pred	8250	5,54	21,39	7,59	9,02
	5 g/l Al	Po / η [%]	9000	2,76 / 50,2	0 / 100	0 / 100	9,02
	2,5 g/l Zn	Pred	11750	2,67	1,51	9,31	8,89
40 °C	2,5 g/l Al	Po / <mark>η [%]</mark>	11180	0,71 / 73,4	0 / 100	0 / 100	8,89
	5 g/l Zn	Pred	11750	2,67	1,51	9,31	8,89
	5 g/l Al	Po / <mark>η [%]</mark>	10560	0 / 100	0 / 100	0 / 100	8,87
	2,5 g/l Zn	Pred	8250	5,54	21,39	7,59	9,02
60 °C	2,5 g/l Al	Po / <mark>η [%]</mark>	9500	1,13 / 79,6	0 / 100	0 / 100	9,00
	5 g/l Zn	Pred	8250	5,54	21,39	7,59	9,02
	5 g/l Al	Po / <mark>η [%]</mark>	9640	0 / 100	0 / 100	0 / 100	9,01
	2,5 g/l Zn	Pred	11750	2,67	1,51	9,31	8,89
80 °C	2,5 g/l Al	Po / η [%]	10600	0 / 100	0 / 100	0 / 100	8,80
	5 g/l Zn	Pred	11750	2,67	1,51	9,31	8,89
	5 g/l Al	Po / <mark>η [%]</mark>	11700	0 / 100	0 / 100	0 / 100	8,88

Tab. 2 Obsah Zn, Fe, Pb a Cu vo výluhoch pred a po cementácii a účinnosť cementácie

3.1.2 Charakterizácia získaného kalcinátu (ZnO)

Koncentrácia zinku vo vstupných výluhoch po cementácii určených na kryštalizáciou, hmotnosti kryštalizátov a kalcinátov, obsah zinku a železa v získanom produkte ZnO a jeho čistota sú uvedené v **Tab. 3.**

Tab. 3 \	Vstupy a	výstupy z kalcinácie,	obsah Zn a Fe v získanom	ZnO a jeho čistota
----------	----------	-----------------------	--------------------------	--------------------

Zn v cementovanom výluhu [µg/ml]	Kryštalizát - vstup na kalcináciu [g]	Kalcinát [g]	Zn [%]	Fe [%]	Čistota ZnO [%]
8180	4,30	2,60	75,67	0,05	94,31
9000	3,00	1,86	76,33	0,04	95,00
11180	4,68	2,94	75,36	0,06	93,80
10560	5,60	3,79	77,61	0,04	96,60
9640	2,80	1,28	77,21	0,00	96,10
9500	3,00	1,80	77,67	0,04	96,67
10600	5,82	3,74	76,35	0,03	95,19
11700	3,64	2,44	74,47	0,03	93,03



Výsledky rtg difrakčnej fázovej kvalitatívnej analýzy získaného ZnO s najvyššou čistotou (96,67 %) a jeho morfológia sú zobrazené na **Obr. 2.**



Obr. 2 Rtg záznam kalcinátu ZnO s obsahom Zn 96,67 % a jeho morfológia

Na základe tohto štúdia a získaných výsledkov sa navrhol postup spracovania a rafinácie výluhov s obsahom Zn po alkalickom lúhovaní EOP úletov a na **Obr. 3** je uvedená bloková schéma navrhovaného postupu s aplikáciou pre elektrotechnický priemysel.



Obr. 3 Navrhovaný postup rafinácie a spracovania alkalických Zn výluhov



4. DISKUSIA A ZÁVER

Tento príspevok popisuje postup rafinácie alkalického výluhu, ktorý môže byť jedným z krokov komplexného spracovania úletov z EOP s cieľom získať zinok vo forme ZnO a prípadne aj ďalšie kovy. Cementácia je jednoduchá, lacná a spoľahlivá rafinačná metóda a navyše v prípade zinku ako cementačného činidla je cementovaný výluh obohatený o zinok z vylúhovaného cementátora. Hliník je zase vhodným cementátorom v prípadoch, ak výluh obsahuje kovy, ktoré majú nízky elektródový potenciál, ako je napr. železo. Výhodou tiež je, že hliník neznečisťuje výluh a koncový produkt, nakoľko v danom prostredí, rozmedzí pH a elektrochemických potenciálov je prítomný v tuhom stave.

Výsledky experimentov cementácie ukazujú, že kovy ako Pb a Cu možno s maximálnou účinnosťou odstrániť už pri teplote 20 °C aj pri nižšej navážke cementátorov. Avšak za daných podmienok sa vycementuje iba 38, 8 % Fe. Na odstraňovanie Fe má vplyv teplota, kedy so stúpajúcou teplotou vzrástla účinnosť cementácie železa z 38,8 % pri 20 °C na 80 % pri 60 °C pri použití Zn:Al = 2,5:2,5 g/l výluhu. K úplnému odstráneniu železa pri nižšej navážke cementátorov došlo pri teplote 80 °C. Za postačujúcu teplotu na odstránenie 100 % Fe, Pb, Cu možno označiť teplotu 40-60 °C, ale s použitím vyššej navážky cementátora (Zn:Al = 5:5 g/l výluhu). Výhodou navrhovaného postupu cementácie s použitím kombinácie cementátorov Zn a Al je aj skutočnosť, že pri cementácii nedošlo k prechodu hliníka do výluhu. Za daných podmienok pH a elektrochemického potenciálu je pravdepodobná jeho pasivácia vo forme nerozpustného Al₂O₃ alebo jeho vyzrážanie z výluhu napríklad vo forme Al(OH)₃, keďže hliník môže pôsobiť ako donor elektrónov s následným vyzrážaním z výluhu [13].

Z výsledkov dosiahnutých spracovaním rafinovaného výluhu kryštalizáciou a kalcináciou (**Tab. 3**) vyplýva, že obsah zinku v ZnO sa pohybuje od 74,47 % do 77,67 %, čo zodpovedá 93,03-96,67 %-nému obsahu ZnO. ZnO s najvyššou čistotu sa získal z výluhu po cementácii s navážkou Zn:Al = 5:5 g/l pri teplote 60 °C. Prítomnosť ZnO potvrdila aj fázová analýza (rtg difrakčný záznam tohto kalcinátu, **Obr. 2**). Medzi pravdepodobné kontaminanty patrí napríklad dikalciumferit $Ca_2Fe_2O_5$, čo zodpovedá obsahu vápnika v spracovávanom výluhu (cca 60 µg/ml). Potvrdila sa aj prítomnosť willemitu - Zn₂SiO₄, pričom kremík možno považovať za stabilný kontaminant bez významného vplyvu na kvalitu a použiteľnosť konečného produktu. Častice získaného ZnO, **Obr. 2**, majú väčšinou podlhovastý skôr nepravidelný tvar s dĺžkou od 5 µm a priemerom cca 1 µm. Jednotlivé častice vytvárajú väčšie zhluky s priemerom približne 100 µm, čo poukazuje na ich spekanie v dôsledku vyššej použitej teploty kalcinácie. Teplotou a dobou kalcinácie však možno do istej miery regulovať aj veľkosť a tvar zŕn alebo agregátov ZnO s ohľadom na požiadavky danej aplikácie. V prípade potreby dosiahnutia špecifického tvaru častíc (zŕn), je vhodné kontrolovať a upraviť tiež podmienky procesu kryštalizácie medziproduktu.

Získaný ZnO možno teoreticky využiť v gumárenskom priemysle. Minimálna čistota ZnO na použitie v gumárenskom priemysle by mala byť 93 %, pričom obsah Pb a Cd by nemal presiahnuť 3 a 2 ppm [14]. Popisovaný konečný produkt ZnO spĺňa požadovanú čistotu, keďže obsah kadmia bol už vo vstupnom výluhu na cementáciu nulový a cementáciou sa odstránilo 100 % prítomného olova. Určitým obmedzením pre uplatnenie ZnO v gumárenskom priemysle by mohol byť podlhovastý tvar častíc ZnO, keďže podľa [15] gumárenský priemysel uprednostňuje sférický tvar. Námetom na ďalší výskum je preto modifikácia tvaru častíc ZnO zmenou parametrov kryštalizačného a kalcinačného procesu. Ďalšie možné využitie získaného ZnO s takouto čistotou je v polovodičovej technike pri výrobe varistorov bez ohľadu na tvar častíc [16]. Nečistoty v podobe Si, Ca a Fe navyše neznižujú kvalitu súčiastky z hľadiska elektrických vlastností, naopak môžu pôsobiť ako potrebný dopant. Z toho dôvodu sa tento spôsob využitia získaného ZnO javí ako vysoko perspektívny. Výsledky publikované v tomto príspevku sú súčasťou vedeckej publikácie: Takáčová, Z. a kol.: Removal of impurities from EAFD ammonium carbonate leachate and upgrading the purity of prepared ZnO, Materials, 2023, 16, 14, 1-20.



POĎAKOVANIE

Práca vznikla v rámci riešenia grantu VEGA MŠ SR 1/0678/23 a za jeho finančnej podpory.

LITERATÚRA

- [1] AL-HARAHSHEH, M.; AL-NUAIRAT, J.; AL-OTOOM, A.; AL-HAMMOURI, I.; AL-JABALI, H.; AL-ZOUBI, M.; ALASAI, S. A. Treatments of electric arc furnace dust and halogenated plastic wastes. *J. Environ. Chem. Eng.* 2019, 7, e102856.
- [2] ANTUNANO, N.; CAMBRA, J.F.; ARIAS, P.L. Hydrometallurgical processes for Waelz oxide valorisation. Process Saf. Environ. Prot. 2019, 129, 308–320.
- [3] PALIMAKA, P.; PIETRZYK, S.; STEPIEN, M.; CIECKO, K.; NEJMAN, I. Zinc Recovery from Steelmaking Dust by Hydrometallurgical Methods. *Metals* 2018, *8*, 1-13.
- [4] KAYA, M.; HUSSAINI, S. KURSUNOGLU, S. Critical review on secondary zinc resources and their recycling Technologies. *Hydromet.* 2020, *195*, e105362.
- [5] HAZAVEHA, P. K.; KARIMIA, S.; RASHCHIA, F.; SHEIBANIA, S. Purification of the leaching solution of recycling zinc from the hazardous electric arc furnace dust through an as-bearing jarosite. *Ecotox. And Environ. Safety* 2020, 202, 110893.
- [6] XANTHOPOULOS, P.; AGATZINI-LEONARDOU, S.; OUSTADAKIS, P.; TSAKIRIDIS P. E. Zinc recovery from purified electric arc furnace dust leach liquors by chemical precipitation. *J. Environ. Chem. Eng.* 2017, 5, 3550– 3559.
- [7] HUAN, Y.; LI-YUAN, Ch.; BING, P.; MI, L.; NING, P.; DONG-KE, H. A novel method to recover zinc and iron from zinc leaching residue. *Miner. Eng.* 2014, *55*, 103–110.
- [8] LAUBERTOVA, M.; HAVLIK, T.; PARILAK L.; DERIN, B.; TRPCEVSKA, J. The Effects of Microwave-assisted leaching on the treatment of electric arc furnace dusts (EAFD), *Arch. Metall. Mater.* 2020, *65*, 1, 321-328.
- [9] YAO, Y.T.; HWANG, S.L. Improved hydrometallurgical extraction of zinc and iron from electric arc furnace (EAF) dust waste using hydrochloric acid. *AIP Conference Proceedings* 2019, *2157*, 020017.
- [10] HUI-GANG, W.; JIAN-MING, G.; WENWU, L.; MEI, Z.; MIN, G. Recovery of metal-doped zinc ferrite from zinccontaining electric arc furnace dust: Process development and examination of elemental migration. *Hydrometall*. 2016, *166* 1–8.
- [11] BINNEMANS, K., JONES, P. T., FERNANDEZ, A. M., TORRES, V. M., Hydrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from Steel Industry By-Products. *J. Sustain. Metall.* 2020, *6*, 505–540.
- [12] HAVLIK, T.; MARUSKINOVA, G.; MISKUFOVA, A. Determination of ZnO amount in electric arc furnace dust and temperature dependence of leaching in ammonium carbonate by using of x-ray diffraction. *Arch. Metall. Mater.* 2018, 63, 653-658.
- [13] CHOI, S.; JEON, S.; PARK, I.; ITO, M.; HIROYOSHI, N. Enhanced Cementation of Co²⁺ and Ni²⁺ from Sulfate and Chloride Solutions Using Aluminum as an Electron Donor and Conductive Particles as an Electron Pathway. *Metals* 2021, 248, 1-11.
- [14] RheinChemie Additives. Specialty Rubber Products. <u>https://rch.lanxess.com/product/zinkoxyd-aktiv-2?lang=en</u> (citované 13.03.2024).
- [15] ANAND KRISHNAMOORTHY, K.; VARGHESE, S. Review The Importance of Zinc Oxide (ZnO) in Rubber Technology. *Raw Materials and Applications* 2018, *10*, 33-39.
- [16] LIPTAI, P.; DOLNIK, B.; BRIANCIN, J.; HAVLIK T. Hydrometallurgical Recycling of Electric Arc Furnace Dust. *Waste Biomass Valor* 2020, *11*, 4419–4428.



PRAKTICKÉ DOPADY ENVIRONMENTÁLNÍ SLOŽKY ESG REPORTINGU NA PROVOZ ZPRACOVÁNÍ OCELI

PYTLOUN Martin

TRITEM s.r.o., Ivančická 484, 672 01 Moravský Krumlov, Česká republika

Environmentální složka ESG reportingu dle směrnice o reportingu udržitelnosti podniku (směrnice CSRD) obsahuje 5 vzájemně propojených témat (Změna klimatu, Znečištění, Vodní a mořské zdroje, Biologická rozmanitost a ekosystémy, Využívání zdrojů a oběhové hospodářství), u kterých musí vybrané podniky vyhodnotit své dopady, rizika a příležitosti. Na základě tohoto hodnocení poté mají připravit svůj obchodní model, strategii a politiku do roku 2030 a 2050. Pro každé téma přitom existuje samostatný standard (ESRS standard), který říká, jakým otázkám se musí podnik v dané oblasti věnovat, resp. na které věci musí ve své zprávě o udržitelnosti reagovat.

Protože se často setkávám s názorem "Mně se ESG reporting netýká" nebo "Je to další finanční a administrativní zátěž, ze které se podniku nic nevrátí", je zpracovaná prezentace postavena na příkladech, kdy z každého z pěti environmentálních témat je vybrána jedna z mnoha povinností a ta je použita jako důkaz toho, že se tito lidé mýlí. Pro ukázku do tohoto sborníku byl vybrán příklad týkající se druhého environmentálního standardu E2 Znečištění.

Standard E2 Znečištění

Tento standard obecně řeší znečištění ovzduší, vody, půdy a látky vzbuzující obavy a látky vzbuzující mimořádné obavy (SVHC). V rámci vybraného příkladu se zaměříme na látky vzbuzující obavy a mimořádné obavy.

Na tyto látky se vztahuje Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1907/2006 ze dne 18. prosince 2006 o registraci, hodnocení, povolování a omezování chemických látek, neboli nařízení REACH. Jde o látky, které mohou mít závažné a často nezvratné účinky na lidské zdraví a životní prostředí. Mohou to být látky karcinogenní, mutagenní nebo toxické, perzistentní, bioakumulativní, atd.

REACH je znám a řešen od roku 2006 a je tak možné předpokládat, že jeho zavedení a monitoring je již běžnou praxí podniků. Určitě tak nebude problém splnit například podmínku vyplývající z požadavků ESG reportingu, že podnik musí s ohledem na své vlastní činnosti a hodnotový řetězec uvést:

- celkové množství látek vzbuzujících obavy, které vznikají nebo se používají při výrobě nebo které jsou pořizovány,
- a celkové množství látek vzbuzujících obavy, které opouštějí jeho zařízení jako emise, jako produkty nebo jako součást produktů nebo služeb,

v rozdělení podle hlavních tříd nebezpečnosti látek vzbuzujících obavy.

Co bude však možná pro podniky novinkou, bude nahlížení na tyto látky v rámci environmentální politiky s výhledem do roku 2030 a 2050. Podnik musí totiž uvést, jak se jeho politiky týkají nahrazování a minimalizace používání těchto látek a jejich postupné vyřazování. Současně může podnik za účelem posouzení významných rizik a příležitostí, provést jejich identifikaci souvisejících s přechodem od těchto látek v rámci vlastních provozních činností a v rámci hodnotového řetězce.



<u>Přínos</u>

Zde není nutné asi přínos vyplývající z omezování uvedených látek příliš popisovat. Tyto látky v procesu výroby nezmizí a zůstávají tak ve výrobcích nebo odpadech. Jejich přítomnost může poté omezovat použitelnost výrobku nebo možnosti nakládání s odpady. Stejně tak asi není nutné uvádět negativní vlivy těchto látek na zdraví lidí a obecně kvalitu životního prostředí.

Dopady na činnost zaměstnanců

Jak již bylo uvedeno, látky vzbuzující obavy a mimořádné obavy jsou v rámci nařízení REACH řešeny od roku 2006. Kdo je tedy v současné době za tyto látky v provozu ocelárny odpovědný, asi nebude složité definovat. Dokážeme ale definovat toho, kdo bude odpovědný za nastavení politiky jejich snižování? Když se podíváme do pískového hospodářství ocelárny, je to zřejmě největší část provozu, kde se pracuje s chemickými látkami (např. diisokianáty). Kdo je zde schopen definovat, jaké látky je možné a není možné v rámci výroby forem a jader nahradit a za co nahradit? Asi je možné se shodnout, že to bezpečák, ekolog nebo finanční ředitel nebude. Rozhodnout o jejich nahrazení tedy bude muset pískař s technologem. Stejnou situaci a stejné řešení pak najdeme i v dalších provozech ocelárny, například přímo v rámci výroby oceli. Zde bude množství a případnou náhradu chemických látek řešit metalurg.

ZÁVĚR

Připravená prezentace obsahuje mnoho dalších příkladů, kde jsou uvedeny možné přínosy nové legislativy a pracovní pozice lidí, kterých se nové požadavky vyplývající z ESG reportingu dotýkají. Pořád však jde jen o malou ukázku toho, co a kdo bude muset obecně v průmyslovém podniku řešit. Prezentace například vůbec neřeší složky "S" (Social) a "G" (Governance).

Je zajímavé, že výše uvedený příklad ke standardu E2 Znečištění a i několik dalších příkladů z jiných standardů, poukazuje na jednu věc. Zpracování zprávy o udržitelnosti a tím pádem i politiky ocelárny se neobejde bez přímého zapojení technických odborníků jako je pískař, metalurg nebo energetik. Když se mně proto lidé ptají, kolik lidí může být v rámci podniku do příprav a zpracování reportingu zapojeno, nemohou uvěřit, že to může být třeba 20, ale i 80 lidí. Spousta z nich si totiž stále myslí, že stačí jeden ekolog, jeden finanční a jeden obchodní ředitel. Proto doufám, že připravená prezentace, a i zde uvedený příklad dokáže, sice už za 2 minuty 12, probrat vrcholový management podniků a začít pracovat a uvažovat jinak, než bylo dosud běžné.

REJSTŘÍK AUTORŮ

AMBROŽ Ondřej59
В
BABA M
BALCAR Martin
BERAXA Pavol
C
CIBULKA Jiří
CUPEK Jiří
Č
ČERMÁK Jan
D
DEMČÁKOVÁ M
DRUZHKO Alexander
F
FILA Pavel
н
HIRJAK R
HUCZALA Tomáš
L HUCZALA Tomáš
HUCZALA Tomáš 59, 75 Ch 102 CHUDÓKOVÁ D
Ch Ch CHUDÍKOVÁ D

м

MACKOVÁ JURÁSKOVÁ Petra	17
MARUŠKINOVÁ Gréta	41
MAŠLEJOVÁ A	102
MEHRABAN Zaeim	51

MERDER Tomasz	
MIKMEKOVÁ Šárka	59
MIKULA Pavol	60
MIŠANEKOVÁ V	
MIŠKUFOVÁ Andrea	110

0

ODEHNALOVÁ Adéla	23, 64
OMETTO Marco	31
ORÁČ Dušan	41

Ρ

PIEPRZYCA Jacek	34, 89, 95
PINDOR Jaroslav	
PINDUR Tomas	51
PIROŠKO M	
PIROŠKOVÁ Jana	
PLAZZOGNA Enrico	
PYTLOUN Martin	117

S

05
, 55
23
, 49
49
60

т

TAKÁČOVÁ Zita	110
TENG Lidong	51
TKADLEČKOVÁ Markéta	75
TUROŇ Rostislav	59

v

VINDT Tomáš	41
VLČEK Jozef	5
VRÁNA František	23, 64

w

WALEK Josef	23
WENDE Robert	
WITEK Jerzy	
Υ	

YANG Hongliang	51
z	

ZAWADA Ondřej	59



Wellness Resort ENERGETIC****, Rožnov pod Radhoštěm, Česká republika, EU

ZAMĚŘENÍ KONFERENCE

Konference se bude zabývat novými teoretickými i praktickými poznatky v oblasti žárovzdorných a tepelně izolačních materiálů, novými technologiemi přípravy a údržby vyzdívek pecí. Účastníci budou mít také možnost seznámit se s výrobky jednotlivých firem.

-

HUTEL ENERGETIL

100

111

TEMATICKÉ OKRUHY

- Použití žárovzdorných materiálů ve vyzdívkách průmyslových agregátů
- Provozní zkušenosti se spotřebou a opotřebením staviv
- Tepelně izolační materiály
- Nové materiály pro zařízení mimopecní rafinace a plynulého odlévání
- Materiály pro ohřívací pece a pece pro tepelné zpracování

KONTAKTY, DOTAZY

TANGER, spol. s r. o. Pavlovova 2644/6 704 00 Ostrava - Zábřeh Česká Republika, EU Keramické materiály pro slévárenství, cementářství a další průmyslové obory

Hutní HK

FAKULTA MATERIÁLOVĒ

TEPELNÉ

TECHNOLOGICKÁ | TECHNIKY

VSB TECHNICKÁ

UNIVERZITA

- Keramika v energetickém průmyslu
- Suroviny pro výrobu žárovzdorných materiálů
- Přestup tepelné energie v konstrukcích hutní keramiky
- Využití druhotných surovin při výrobě hutní keramiky
- Zpracování odpadů z výroby a aplikace hutní keramiky

tel: +420 595 227 121 mobil: +420 774 435 816 e-mail: info@hutnikeramika.cz Web: www.hutnikeramika.cz

TEMATICKÉ OKRUHY, TERMÍNY, VLOŽNÉ, DOPRAVA, HOTEL, OKOLÍ, INSTRUKCE PRO AUTORY, REGISTRACE, VLOŽENÍ ABSTRAKTŮ, PŘEDNÁŠEK A PREZENTACÍ, PLATBY atp:

www.HUTNIKERAMIKA.cz



51. konference PROJEKTOVÁNÍ A PROVOZ POVRCHOVÝCH ÚPRAV

březen 2025, Praha

(termín bude v předstihu uveden na webu konference)

POZVÁNKA

51 let tradice – záruka spolehlivosti a kvality

Konference se uskuteční ve spolupráci s Asociací korozních inženýrů, Českou společností povrchových úprav, Asociací českých a slovenských zinkoven, AVNH ČR, vědecko-výzkumnými ústavy, vysokoškolskými pracovišti, státními orgány, českými i zahraničními firmami, mediálními partnery.

Konference se koná již několik let pod záštitou Hospodářské komory ČR.

Konference je určena pro široký okruh posluchačů a slouží jako ŠKOLENÍ.

Na programu konference:

informace o pokroku technologií, zařízení pro povrchové úpravy, o právních předpisech tak, aby se zvýšila kvalita výrobků a zlepšila jejich konkurenceschopnost:

- aktuální právní předpisy včetně chystaných změn,
- progresivní technologie a zařízení povrchových i předpovrchových úprav v lakovnách, galvanovnách, žárových zinkovnách, včetně informací o nátěrových hmotách apod.,
- problematika provozů povrchových úprav,
- opatření týkající se ochrany životního prostředí a/nebo zdraví lidí,
- projektování povrchových úprav,
- exkurze na pracoviště povrchových úprav a diskuzní večer.

Možnost prezentace pro firmy:

- vystoupení zástupce firmy v programu konference včetně informace ve sborníku,
- stůl k provádění obchodní, propagační a konzultační činnosti,
- banner v předsálí,
- stránková inzerce v elektronickém sborníku.

Těšíme se na Vás

více informací najdete na:

www.konferencepppu.cz





Od roku 2022 nové pracoviště terciární metalurgie

Výroba speciálních ocelí technologií ESR

ŽĎAS, a.s.

patří ke špičce českého strojírenství a metalurgie. Je moderním a spolehlivým výrobcem tvářecích strojů, zařízení pro zpracování válcovaných výrobků, produktů metalurgie a lisovacích nástrojů.

ŽĎAS, a.s. Strojírenská 675/6 591 01 Žďár nad Sázavou Česká republika

www.zdas.com



STROJÍRNY

- zařízení pro volné a zápustkové kování,
- zpracování šrotu,
- rovnání materiálu,
- válcovny a další

METALURGIE

- odlitky,
- ingoty,
- výkovky,
- modely