

Recenzované výzkumné články

Využití skenovacího elektronového mikroskopu v procesu výroby oceli pro monitoring vývoje nekovových vměstků

Using of Scanning Electron Microscope in the Steel Production Process for Monitoring of Non-Metallic Inclusions

Ing. Tomáš Huczala, PhD.¹; Ing. Petr Kučírek¹; Ing. Jaromír Kaleta¹; Ing. Michal Sniegoň²; doc. Ing. Markéta Tkadlečková, Ph.D.²

¹ TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, 739 61 Třinec, Česká republika

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

V praktických podmínkách je pro zlepšování čistoty oceli důležité identifikovat kritické faktory ovlivňující přítomnost nekovových částic. Vhodným nástrojem pro tyto účely je elektronový skenovací mikroskop, který umožňuje automatické hodnocení plochy vzorků oceli, s následným vyhodnocením distribuce nekovových vměstků a jejich chemického složení. Výsledkem této práce je v praxi využitelný postup vzorkování a analýzy výskytu nekovových vměstků v tekuté i tuhé oceli. S pomocí termodynamického numerického SW FactSage byla vytvořena kritéria pro kategorizaci vměstků do skupin. Postup je vhodný pro identifikaci kritických fází výroby. Rovněž byly analyzovány změny chemického složení nekovových vměstků v průběhu sekundární rafinace a odlévání oceli uklidněné hliníkem. Během zpracování v pánvové peci (LF) se primární produkty desoxidace (hlinitany) transformují na spinely $MgO \cdot Al_2O_3$. S rostoucí délkou zpracování na LF dochází k růstu obsahu CaO ve vměstcích. Během vakuování dochází k výraznému snížení obsahu nekovových vměstků. Během modifikace vápníkem roste obsah CaO ve vměstcích a kolem vměstků se tvoří obálka ze sulfidu vápníku. Obsah síry a teplota během modifikace jsou kritické parametry pro transformaci tuhých vměstků na tekutou formu.

Klíčová slova: SEM-EDS; scanovací elektronový mikroskop; mikročistota

Demands for improving the purity of steel are constantly increasing. The presence of non-metallic particles in steel depends on many factors, especially during the secondary refining and casting of the steel. In practical conditions, it is important to identify the critical factors affecting the presence of non-metallic particles to improve the purity of steel. A suitable tool is an electron scanning microscope with EDS detector, which enables automatic evaluation of the area of a steel sample with an evaluation of the distribution of non-metallic inclusions and their chemical composition. The result of the work is a procedure of sampling and analysing of the occurrence of non-metallic inclusions in liquid and solid steel that is usable in practice. With help of thermodynamic numerical SW FactSage, criteria for categorization of inclusions into groups were created. With a suitably set sampling procedure, the procedure can be used to identify critical stages of production. There were analysed changes in the chemical composition of non-metallic inclusions during secondary refining and casting of the aluminium-killed steel. The schema of changes of non-metallic inclusions during processing was created. During processing in a ladle furnace, the primary products of deoxidation - aluminates, are transformed into spinels $MgO \cdot Al_2O_3$. With increasing processing time at LF, the CaO content in the inclusions increases. During degassing, the contents of non-metallic inclusions are significantly reduced. During modification using calcium, the CaO content increases in the inclusions and a calcium sulphide rim forms around the inclusions. Sulphur content and temperature during modification are critical parameters for the transformation of solid to liquid inclusions.

Key words: SEM-EDS; scanning electron microscope; micro-purity

V celosvětovém měřítku neustále rostou tlaky konečných zpracovatelů oceli na zlepšování kvalitativních parametrů, zejména snižování obsahu nekovových částic v oceli.

V případě použití oceli ve vysoce namáhané součásti, jako např. ložiska, ozubená soukolí, nápravy pro železniční dvojkolí, pružinové oceli, jsou kritéria přípustnosti

velikosti nekovových vměstků v oceli neustále zpřisňována. Nekovové vměstky v oceli se obecně rozdělují z pohledu velikosti do tří kategorií – mikro ($< 20 \mu\text{m}$), semí ($20 - 100 \mu\text{m}$) a makrovměstky ($> 100 \mu\text{m}$). Klíčovým faktorem pro zlepšení procesu výroby oceli jsou metody identifikace nekovových vměstků. V práci [1] byly popsány jednotlivé přímé i nepřímé možnosti hodnocení mikročistoty oceli. V provozní praxi je pro stanovení čistoty oceli důležité zvolit metodu, která nabízí vysokou rychlost analýzy v kombinaci s přesností a významností poskytnutých informací. Mezi základní metody patří stanovení celkového obsahu kyslíku a mikročistoty pomocí optického mikroskopu (OP). Zajímavou alternativou je využití skenovacího elektronového mikroskopu (dále SEM), který výše uvedené metody obohacuje o další důležité informace. V porovnání se stanovením celkového obsahu kyslíku, analyzuje SEM rovněž sulfidické, nitridické a ostatní fáze, které neobsahují kyslík. Oproti optické metalografii přináší SEM díky EDS analyzátoru informaci o konkrétním chemickém složení nekovových částic a vnáší do procesu určitý prvek automatizace, čímž odbourává vliv lidského faktoru. V posledních letech se využití SEM v metalurgii věnuje vysoká pozornost. Použití SEM v praktických podmínkách sebou přináší nutnost vytvoření postupu vzorkování oceli. Softwarové vybavení elektronových mikroskopů většiny výrobců je určeno pro obecné využití. V případě plného využití v metalurgii je vhodné použití vlastních algoritmů pro třídění a vyhodnocování dat získaných pomocí SEM.

Cílem této práce bylo vytvoření nastavení procesu analýzy vzorku oceli pomocí SEM a algoritmu následné transformace dat pro potřeby identifikace změn množství a chemického složení nekovových vměstků v průběhu rafinace a odlévání oceli uklidněné hliníkem.

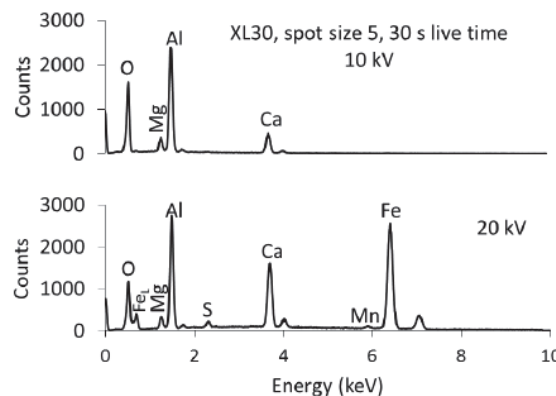
1. Popis experimentu

Scanovací elektronový mikroskop je v podmínkách Třineckých železáren, a.s. používán již od konce 90. let. V roce 2018 nahradil původní mikroskop Hitachi S-3000 nový mikroskop Tescan Vega3 vybavený EDS a WDS detektorem firmy EDAX, konkrétně EDS Octane Elite 30 (obr. 1).



Obr. 1 SEM – Tescan VEGA3
Fig. 1 SEM – Tescan VEGA3

Elektronový mikroskop umožňuje práci v manuálním nebo automatickém režimu. V případě manuálního režimu je možno pracovat v režimu BSE (režim odražených elektronů) nebo SE (sekundární elektrony). Pro automatické hodnocení nekovových vměstků se používá urychlovací napětí 15 kV, které zajišťuje kompromis mezi kvalitou a rychlostí analýzy. Autoři [2] srovnávali výsledky měření nekovových vměstků při urychlovacím napětí 10 a 20 kV. Na obr. 2 je uvedeno srovnání analyzovaných výbojů pro různé hodnoty urychlovacího napětí. Je patrné, že s rostoucím napětím dochází k ovlivňování spekter okolní maticí kovu. Při nižším napětí dochází rovněž ke zlepšení rozlišovací schopnosti částic s velikostí kolem $1 \mu\text{m}$, což se v důsledku projeví delší dobou samotné analýzy.



Obr. 2 Srovnání výbojů pro urychlovací napětí 10 a 20 kV v analýze SEM [2]

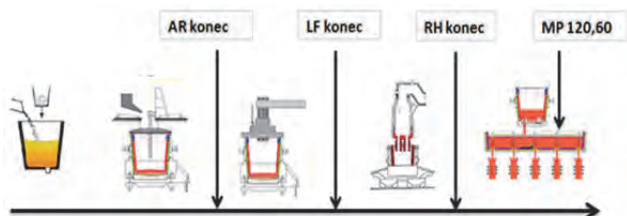
Fig. 2 Comparison of discharges for accelerating voltage of 10 and 20 kV in the analysis by the help of electron scanning microscope [2]

Následně je možno využít mnoha různých funkcí integrovaného EDS detektoru. V automatickém režimu jsou pro hodnocení mikročistoty oceli vytvořena dvě schémata. Postupy jsou nastaveny s ohledem na rychlost analýzy, protože v praktických podmínkách je klíčové maximalizovat množství provedených analýz nutných pro další statistické hodnocení. Schéma A je zaměřeno na hodnocení menší plochy, ale práh citlivosti je $1 \mu\text{m}$.

Hodnocená plocha představuje celkový obsah $5,6 \text{ mm}^2$. Tento algoritmus je používán zejména pro vzorkování z tekuté oceli, protože je méně náchylný na výskyt mikroporovitosti. Schéma B je zaměřeno na větší analyzovanou plochu, ale s podmínkou, že práh detekce nejmenší částice je $5 \mu\text{m}$. Analyzovaná plocha je pak limitována pouze možnostmi přípravy vzorků a velikostí komory mikroskopu.

Po odběru vzorku oceli probíhá standardní proces jeho přípravy pro metalografickou analýzu, tzn. rozřezání, zalísování a vyleštění. Následuje umístění vzorku do komory skenovacího elektronového mikroskopu. Pro hodnocení dle schématu A s menší analyzovanou plochou je možno provést analýzu celkem 12 vzorků najednou. Doba hodnocení je závislá na počtu přítomných nekovových částic. V případě vzorků oceli Třineckých železáren, a.s. (TŽ, a.s.) je hodnocení velice rychlé. Průměrná doba hodnocení jednoho vzorku je přibližně 40 min.

Nekovové vměstky jsou kategorizovány podle chemického složení a velikosti. Chemická analýza analyzovaných částic umožňuje rovněž identifikaci nečistot ulpělých na povrchu vzorku nebo pórovitosti vzniklé během tuhnutí vzorku. Po základním rozřídění jsou majoritní fáze vyneseny do ternárního diagramu daného typu. V případě oceli dezoxidovaných hliníkem jsou hlavní částice tvořeny Al_2O_3 , CaO , MgO , CaS a minoritních podílů SiO_2 případně MnO .



Obr. 3 Popis údobí odběru vzorků oceli
Fig. 3 Description of phases of steel sampling

Hlavním cílem je provést mapování vývoje distribuce a fázových změn nekovových vměstků v procesu výroby oceli hlavně sekundárního zpracování a odlévání oceli. V jednotlivých klíčových uzlech výroby byly definovány doby odběrů vzorku z tekuté oceli, které jsou zobrazeny na obr. 3. K experimentu byla zvolena ocel dezoxidovaná hliníkem. Tento druh oceli tvoří 50 % výroby TŽ, a.s. a zároveň tvoří podstatnou část oceli s vysokými užitnými vlastnostmi zmiňovanými v úvodu. Chemické složení pokusné značky oceli je uvedeno v tab. 1. Vzorky byly odebírány pomocí ponorných vzorkovačů a okamžitým zchlazením. Místa odběrů jednotlivých vzorků jsou zobrazena na obr. 3. Následovala příprava vzorků pro metalografickou analýzu a pak proces automatického hodnocení jednotlivých vměstků pomocí SEM.

Tab. 1 Chemické složení oceli 42CrMo4
Tab. 1 Chemical composition of 42CrMo4 steel grade

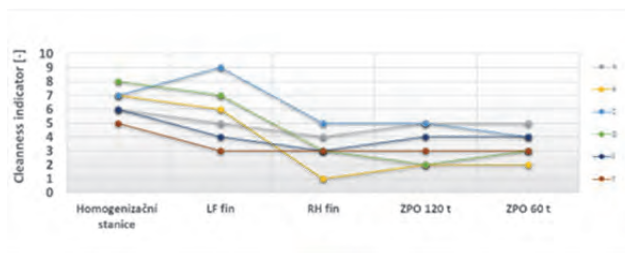
Rozsah	Chemické složení (hm. %)								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Min.	0,38	0,60	xxx	xxx	xxx	0,90	0,15	xxx	0,02
Max	0,45	0,90	0,40	0,025	0,035	1,20	0,30	0,40	0,05

Z jednotlivých vzorků byly získány datové soubory s informacemi o pozicích, geometrii a chemickém složení jednotlivých nekovových detekovaných částic. Následovalo zpracování dat s využitím MS Excel VBA a termodynamický SW FactSage 7.2.

2. Diskuze dosažených výsledků

Získaná data byla analyzována ze dvou pohledů. První byl zaměřen na distribuci nekovových vměstků v jednotlivých fázích odběru vzorků. Výsledné informace jsou v praktických podmínkách užitečné pro identifikaci klíčových fází výroby oceli, ve kterých dochází ke zhoršení mikročistoty oceli.

Na obr. 4 jsou zobrazeny změny čistoty oceli vyjádřené indikátorem čistoty, který vychází z hustoty vměstků na plochu 1 mm^2 . Jedna sekvence se skládala z šesti taveb označených A až F. Zpravidla k největšímu výskytu nekovových vměstků dochází v počáteční fázi mimopecní rafinace oceli, tedy na homogenizační stanici (obr. 4). Zde je ocel ve stavu po desoxidaci a navíc dochází k intenzivnímu míchání lázně, což může podporovat zanášení částec strusky do kovu. Během zpracování na pánvové peci dochází ke zlepšení indikátoru čistoty oceli. U tavy C souvisela hodnota indikátoru čistoty na konci pánvové pece s omezenou propustností dmyšných elementů v půdě pánve. U taveb došlo k výraznému zlepšení mikročistoty na konci zpracování na zařízení RH, kromě jedné tavy (F), kdy nedošlo ani k poklesu, ani nárůstu ukazatele mikročistoty. Během zpracování oceli na vakuovém zařízení typu RH dochází k intenzivnímu promíchávání oceli v komoře i samotné pánvi. Díky tomu je podporována koalescence a koagulace částic, a zlepšuje se tak následné vyplouvání nekovových vměstků. U vzorků odebíraných v mezipánvi lze pozorovat stejnou úroveň mikročistoty. Ve dvou případech došlo k mírnému zlepšení. Podmínky změny čistoty v průběhu odlévání jsou dány zejména charakterem proudění oceli v MP, mírou reoxidace (okolní atmosférou, krycí struskou v MP, torkretační hmotou atd.).



Obr. 4 Změna počtu nekovových vměstků v průběhu sekundární rafinace a odlévání oceli

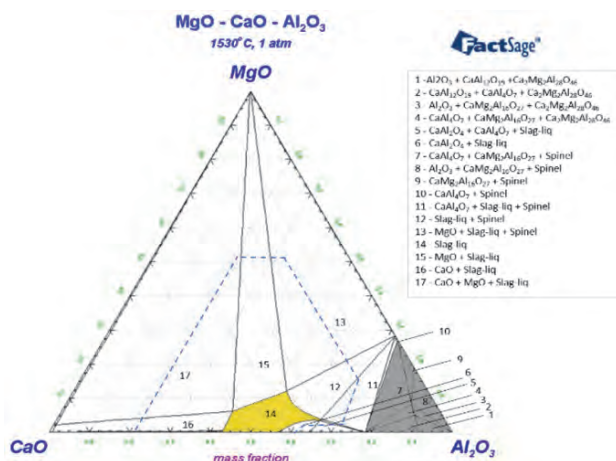
Fig. 4 Change of non-metallic inclusions during secondary refining and casting

Druhým pohledem je změna chemického složení nekovových vměstků v průběhu sekundární rafinace oceli. Díky znalosti dat o chemickém složení jednotlivých nekovových vměstků bylo možné jednotlivé vměstky kategorizovat a porovnat mezi jednotlivými místy odběru vzorků. Pro kategorizaci oxidických vměstků do skupin je vhodné využít zobrazení v ternárních diagramech. U oceli uklidněné hliníkem byly detekovány jako majoritní fáze Al_2O_3 , CaO a MgO . Vměstky na bázi SiO_2 a MnO se v oceli téměř nevyskytovaly, což svědčí o plné desoxidaci a odstranění těchto fází během odpichu i po něm. Pomocí termodynamického SW FactSage byly provedeny numerické simulace daných ternárních diagramů $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, které následně sloužily pro přesnější rozdělení nekovových vměstků do skupin. Na obr. 5 je patrné rozložení jednotlivých fází v závislosti na procentuálním hmotnostním podílu jednotlivých složek. Vypočtené výsledky naznačují přítomnost 17 hlavních sloučenin, které mohou v daném systému za daných podmínek koexistovat.

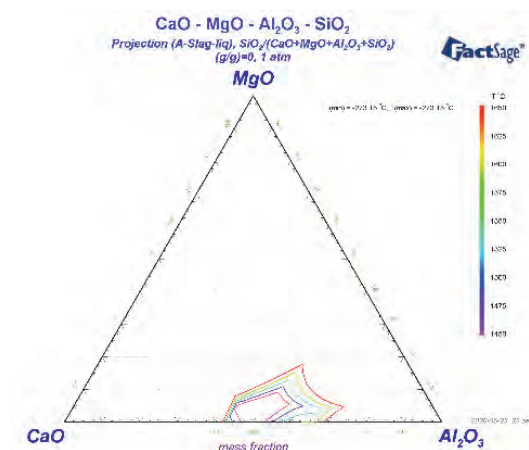
Jednotlivé složky budou vykazovat rozdílné fyzikálně-chemické vlastnosti, které mají vliv na morfologii nekovových vměstků v oceli v hotovém stavu, případně i procesy odlévání či odstraňování nekovových vměstků.

Kromě změny jednotlivých složek z pohledu chemického složení, jsou výsledkem numerických simulací rovněž podíly tekuté složky v jednotlivých fázích. Ve žluté oblasti jsou nekovové vměstky v plně tekutém stavu. Jedná se o sloučeninu $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{MgO}$, kde symbol z

představuje obsah oxidu hořečnatého v rozmezí 0 – 12 %. Obsah MgO v rozsahu 4 – 6 % významně snižuje teplotu tavení nekovových částic. V šedé oblasti jsou naopak znázorněny fáze, které neobsahují žádný podíl tekuté fáze [3]. Majoritní složkou jsou v tomto případě Al_2O_3 , oxid hliníku s nízkým obsahem CaO a MgO, případně spinel $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Významnou je rovněž oblast vyznačená čárkovanou čarou. V této oblasti obsahují sloučeniny více než 50 hm. % tekuté fáze.



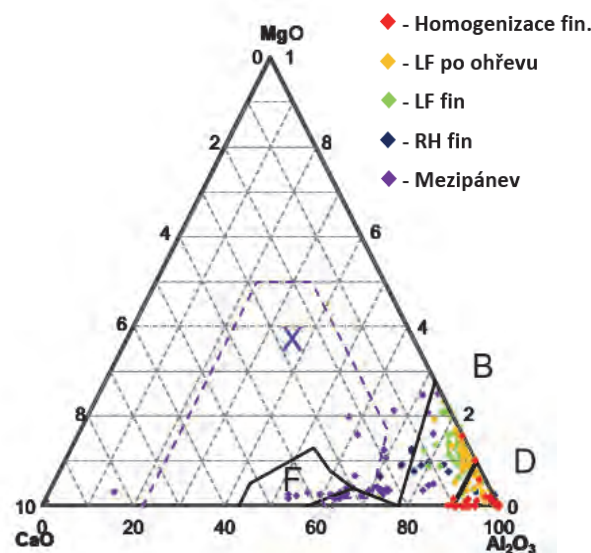
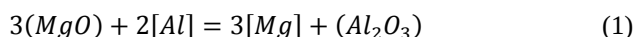
Obr. 5 Ternární diagram CaO-Al₂O₃-MgO pro teplotu 1530 °C
Fig. 5 Ternary diagram CaO-Al₂O₃-MgO for 1530 °C



Obr. 6 Oblast 100% tekutosti nekovových vměstků pro teplotní rozsah 1450 – 1650 °C s teplotním krokem 50 °C
Fig. 6 Area of 100% liquid non-metallic inclusions for the temperature range of 1450 – 1650 °C with a temperature step 50 °C

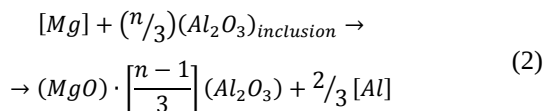
Jedna z funkcí SW FactSage je rovněž simulace teplotní projekce tekuté fáze v určitém teplotním rozsahu a určitém teplotním kroku. Na obr. 6 je zobrazena oblast plně tekuté fáze v ternárním diagramu CaO-Al₂O₃-MgO v teplotním rozsahu 1450 – 1650 °C. Z výsledků je patrné, že s klesající teplotou se zmenšuje oblast plně tekuté fáze. To v praxi znamená, že s klesající teplotou může během odlévání docházet k tvorbě pevných fází a zhoršení odlévání. Pro rozčlenění vměstků v ternárním diagramu v rámci provedeného experimentu byla zvolena teplota 1530 °C. Je to průměrná teplota během odlévání značky oceli použité v experimentu.

Nekovové vměstky z jednotlivých vzorků byly vyneseny do výše definovaných ternárních diagramů. Výsledky pro tavbu C jsou zobrazeny na obr. 7. Z ternárních diagramů je patrné, že na počátku zpracování, tj. těsně po ukončení homogenizace a odpichu, se většina nekovových vměstků nachází ve formě čistých hlinitanů. Po ohřevu dochází k postupnému nárůstu obsahu MgO ve vměstcích. Proces tvorby spinelu během rafinace oceli je popisován v pracích [4 – 7]. Jedná se o reakci vyskytující se při použití žárovzdorné vyzdívky na bázi MgO během zpracování oceli v pánvové peci. V případě, že jsou vhodné podmínky pro průběh reakce podle rov. (1), dochází k transportu hořčíku zejména ze strusky do objemu kovu.



Obr. 7 Vývoj chemického složení nekovových vměstků během sekundární rafinace uklidněné oceli hliníkem
Fig. 7 Transformation of the chemical composition of non-metallic inclusions during secondary refining of aluminium-killed steel

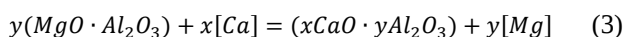
Následně dochází k transformaci původních nebo nově vzniklých hlinitanů na spinely dle schématu uvedeného v rov. (2).



Kritickými faktory jsou obsahy snadno redukovatelných oxidů, složení pánvové strusky a zejména stupeň saturace MgO ve strusce. Nasycení MgO ve strusce má souvislost s bazicitou strusky CaO/SiO_2 a poměrem CaO/Al_2O_3 .

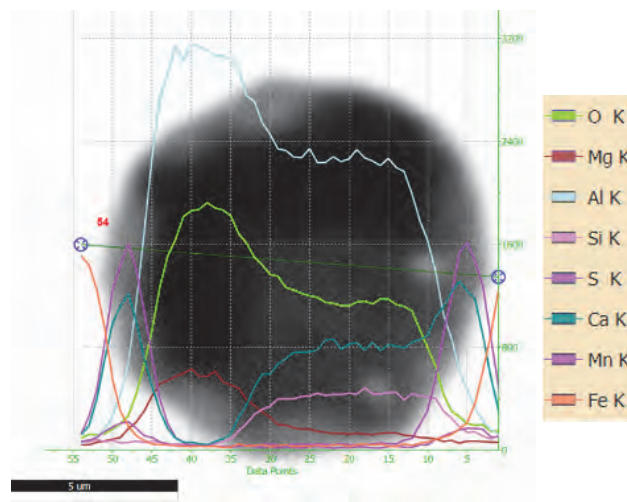
V dalším kroku zpracování následuje vakuování oceli na zařízení typu RH (Ruhrstahl Heraeus). Princip vakuování RH je odlišný od způsobu zpracování typu VD (Vacuum Degassing). V případě zařízení RH dochází k většímu podílu turbulentního proudění oceli v objemu kovu a minimální emulgaci strusky do objemu kovu. Reakční plocha na rozhraní struska-kov je tak oproti způsobu VD mnohem menší. Z pohledu odstraňování nekovových vměstků je tato situace výhodnější. Důkazem jsou obr. 4 a obr. 7, kdy je patrný výrazný pokles výskytu nekovových vměstků po vakuování oceli. Z pohledu chemického složení je patrné, že po vakuování došlo k odstranění téměř všech nekovových vměstků na bázi Al_2O_3 a spinelu. V oceli bylo detekováno pouze malé množství vměstků s vyšším obsahem CaO. Nicméně část vměstků se v ternárním diagramu nacházela v poli s obsahem 20 – 50 % tekuté fáze. Z toho vyplývá, že pevné vměsky se během vakuování na zařízení typu RH odstraňují efektivněji než vměsky s vyšším obsahem tekuté fáze, což je v souladu s prací [8].

Po vakuování následuje proces modifikace nekovových vměstků pomocí sloučeniny na bázi Ca. Modifikátorem je většinou CaSi, CaFe nebo čistý vápník. Cílem modifikace je transformovat chemické složení nekovových vměstků, aby se nacházely v tekutém stavu – fáze č. 14, žlutě vyznačená oblast na obr. 5. Celá řada odborných prací byla věnována popisu a tvorbě modelu procesu modifikace. Např. autoři [9] vytvořili model průběhu modifikace s postupnou transformační řadou $Al_2O_3 \rightarrow CA_6 \rightarrow CA_2 \rightarrow CA_2 \rightarrow CA_{x(liquid)}$. Nevýhodou navrženého modelu je, že látkou vstupující do reakce, je hlinitan Al_2O_3 . V praxi, jak je znázorněno na obr. 7, je výchozí látkou pro modifikaci spinel. Oxid hořčíku výrazně mění průběh modifikace nejen ovlivňováním tekutosti roztoku, ale i změnou průběhu reakce podle rov. (3). Jak popisují autoři v práci [10], v reakci je klíčová difuze hořčíku z roztoku $MgO \cdot CaO \cdot Al_2O_3$. Při určité tloušťce vzniklé vrstvy $CaO \cdot Al_2O_3$ je difuze hořčíku z nekovového vměstku směrem do oceli klíčovým článkem reakce [11]. Důsledkem jsou nezreagovaná jádra spinelu ve středu nekovového vměstku – viz rov. (3)



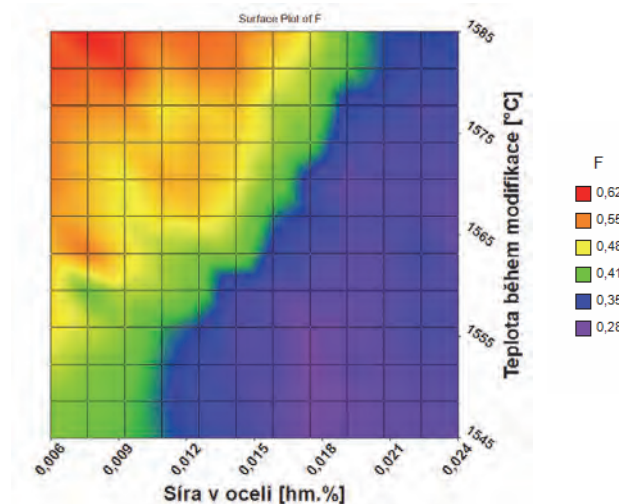
Jakmile je během modifikace na povrchu vměstku dosaženo kritické aktivity CaO, dochází ke vzniku obálky kolem nekovového vměstku na bázi CaS, což potvrzují výsledky provozních experimentů. Liniová spektrální

analýza nekovového vměstku se sulfidickou obálkou je znázorněna na obr. 8.



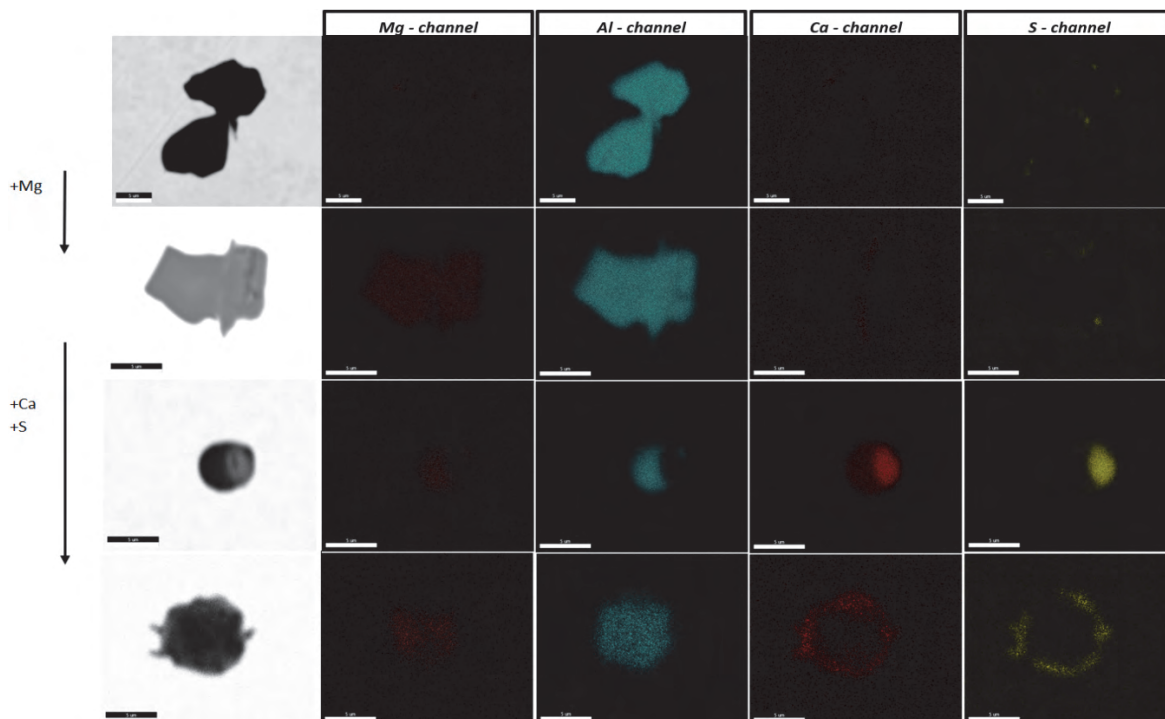
Obr. 8 Liniová spektrální analýza nekovového vměstku po modifikaci
Fig. 8 Spectral line analysis of non-metallic inclusion after modification

Pro jednotlivé vzorky bylo vyhodnoceno procentuální zastoupení nekovových vměstků v plně tekuté fázi, ve fázi obsahující > 50 % tekuté složky a v pevné fázi. Následně byly hledány kritické parametry ovlivňující proces modifikace a změny chemického složení nekovových vměstků po modifikaci. Jak je patrné z obr. 9, významným parametrem pro proces modifikace nekovových vměstků je obsah síry a teplota oceli. Obsah síry v oceli je přitom kritickým parametrem. Při teplotě 1545 °C je kritický obsah síry 0,011 hm. %. Při vyšším obsahu síry než 0,011 hm. % dochází k tvorbě výše popisované sulfidické obálky na povrchu vměstků.



Obr. 9 Vliv obsahu síry a teploty oceli při modifikaci tekutých nekovových vměstků na jejich procentuální podíl

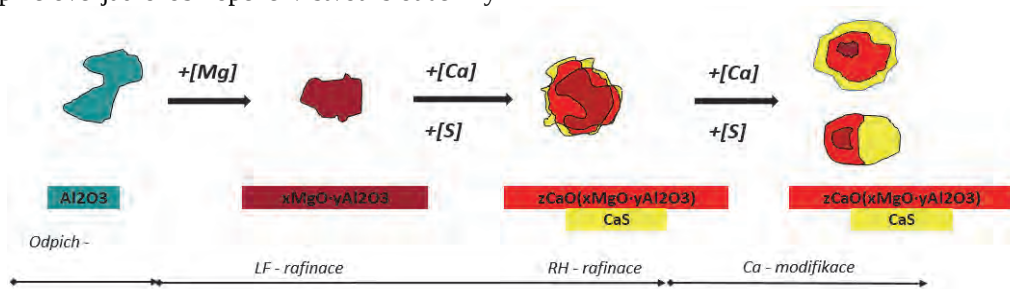
Fig. 9 Influence of the content of sulphur and temperature of steel during modification of non-metallic inclusions on their percentage portion



Obr. 10 Spektrální mapy obsahu jednotlivých prvků ve vměstcích během procesu
Fig. 10 Element mapping of typical inclusions in steel samples during the process

S rostoucí teplotou dochází k posunu kritického obsahu síry k vyšším hodnotám. Jak je zobrazeno na obr. 8, při teplotě 1585 °C je kritický obsah síry 0,020 hm.%. Pro jednotlivé vzorky bylo provedeno spektrální mapování nekovových vměstků s cílem zjištění nerovnoměrnosti v rozložení jednotlivých fází v nekovových částicích. Hlinitany a spinely většinou představují homogenní fázi s rovnoměrným obsahem Al_2O_3 a MgO ve svém objemu. Na vzorcích po modifikaci lze však pozorovat výraznou heterogenitu. Ve středové části nekovových vměstků se vyskytuje spinelové jádro obklopené vrstvou sloučeniny

$\text{CaO} \cdot (x\text{MgO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3)$ s různou tloušťkou. V případě obsahu CaS se vyskytovaly dvě schémata. První představovala obálka CaS kolem celého vměstku. Druhé pak samostatný ostrůvek CaS přilepený na vměstek. Většina detekovaných vměstků se po modifikaci nacházela v obou těchto fázích. Grafické znázornění celkové transformace nekovových vměstků v průběhu sekundárního zpracování ukazuje obr. 11. Jednotlivé fáze nekovových vměstků po modifikaci budou vykazovat rozdílné vlastnosti při následném tváření materiálu.



Obr. 11 Vývoj nekovového vměstku během rafinace oceli ukladné hliníkem
Fig.11 Development of non-metallic inclusion during the refining of steel aluminium-killed

Závěr

Nový mikroskop Tescan VEGA3, umožňující analýzu SEM-EDS, nahradil původní mikroskop SEM v Třineckých železárnách, a.s. Analýza chemického složení nekovových vměstků rozšířila využití metalografické analýzy pro hodnocení vývoje vměstků v procesu mimo-

pecního zpracování oceli i stanovení mikročistoty hotových výrobků. Hlavním cílem práce bylo nastavení vhodných okrajových podmínek samotné analýzy a úpravy SW pro následnou kategorizaci nekovových vměstků. Výsledkem práce je úspěšné začlenění metodiky do procesu metalografického hodnocení čistoty oceli, nastavení okrajových podmínek detekce a následné využití pro

stanovení kritických parametrů rafinace a odlévání oceli. Z výše uvedených výsledků vyplývá následující:

- Podmínky a způsob desoxidace oceli významným faktorem ovlivňují množství i chemické složení nekovových vměstků.
- Během procesu zpracování v pánvové peci dochází vlivem dějů probíhajících na rozhraní struska-kov k transformaci chemického složení nekovových vměstků směrem od hlinitanu ke spinelu.
- Vakuování na zařízení RH má významný vliv na průběh snížení množství nekovových vměstků.
- Analýzou vzorků z tekuté oceli lze identifikovat kritické parametry procesu. V případě pokusné sekvence se např. jednalo o omezenou propustnost dmyšného elementu umístěného v pánvi.
- Modifikace vápníkem významným způsobem mění charakter nekovových vměstků.
- Pro průběh modifikace je klíčový obsah síry 0,011 hm. %. Při tomto obsahu dochází k tvorbě sulfidických obálek kolem nekovových vměstků. S rostoucí teplotou při modifikaci dochází k růstu kritického obsahu síry.
- Termodynamický SW FactSage je vhodný pro zpřesnění algoritmu kategorizace detekovaných nekovových vměstků pomocí elektronového mikroskopu.
- Významným článkem výroby kontinuálně odléváných ocelí je mezipánev, která může významně ovlivnit finální čistotu oceli.

Poděkování

Tento článek byl vytvořen díky projektu č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008399 z finančních fondů EU a ČR poskytovaných "Operačním programem Výzkum, vývoj

a vzdělávání, Výzvy 02_17_049 Dlouhodobá mezisektorová spolupráce pro ITI, řídicí orgán: Česká Republika - Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy".

Literatura

- [1] THOMAS, B. G., ZHANG, L. Evaluation and Control of Steel Cleanlines – Review. In: *The 85th Steelmaking Conference*, ISS-AIME, Warrendale, PA, 2002, pp. 431-452.
- [2] PISTORIUS, P. C., TANG, D., FERRIERA, M. E.: Consistency in Automated Inclusion Microanalysis. In *The 9th International Conference and Exhibition on Clean Steel*, Budapest, Hungary, 2015.
- [3] VERMA, N., PISTORIUS, P., FRUEHAL, J., POTTER, S., OLTMANN, H., PRETORIUS, E. Calcium Modification of Spinel Inclusions in Aluminum-Killed Steel: Reaction Steps. *Metallurgical and Materials Trans.*, 43B (2012) 830-840.
- [4] LIU, Ch., HUANG, F., SUO, J., WANG, X. Effect of Magnesia-Carbon Refractory on the Kinetics of MgO-Al₂O₃ Spinel Inclusion Generation in Extra-low Oxygen Steels. *Metallurgical and Materials Trans.*, 47B (2016) 989-998.
- [5] HARADA, A., MIYANO, G., MARUOKA, N., SHOBATA, H., KITAMURA, S. Y. Dissolution Behavior of Mg from MgO into Molten Steel Deoxidized by Al. *ISIJ Int.*, 54 (2014) 10, 2230-2238.
- [6] HARADA, A., MABUOKA, N., SHIBATA, H., ZEZE, M., ASAHARA, N., HUANG, F., KITAMURA, S. Y. Kinetic Analysis of Compositional Changes in Inclusions during Ladle Refining. *ISIJ Int.*, 54 (2014) 11, 54.
- [7] HUCZALA, T., KALETA, J., BOCEK, D., PILKA, V., KUČÍREK, P., SOCHA, L. Evolution of Non-metallic Inclusion in Aluminium Killed Steel during Ladle Furnace Process. In: *Conf. Iron and Steelmaking*, 4.-6.10.2017, Horní Bečva, Česká republika.
- [8] YOSHIOKA, T., KARASEV, A., OHBA, Y., JÖNSSON, G. The Formation and Behavior of CaO-containing Inclusions in a Steel Melt during an LF-RH-TD Process in a Case-hardening Steel. In: *The 10th International Conference on Clean Steel*, Budapest, Hungary, 2018.
- [9] YE, G., JÖNSSON, P., LUND, T. Thermodynamics and Kinetics of the Modification of Al₂O₃ Inclusions. *ISIJ Int.*, 36 (1996) 2, 105-108.
- [10] YANG, S., WANG, Q., ZHANG, L., LI, J., PEASLEE, K.: Formation and Modification of MgO-Al₂O₃-based Inclusion in Alloy Steels. *Metallurgical and Materials Trans.*, 43B (2012) 731-750.

V Prostějově začínají vyrábět šroubové pružiny pro metro v Indii

www.trz.cz, Třinec, Tisková zpráva 17.7.2020

Metro v indické Bombaji bude brzy jezdit na pružinách z Prostějova. Dceřiná firma Třineckých železáren HŽP v Prostějově získala společně s indicko-japonskou firmou Hitachi High-Tech (HHT) zakázku na více než 4000 sad pružin pro vozy bombajského metra.

Podle ředitele společnosti HŽP Petra Vaňka se podařilo přesvědčit finálního zákazníka o kvalitě českých výrobků, ale také o schopnosti navrhnout, vyvinout a vyrobit nové řešení odpružení vozů na míru. Nyní už v Prostějově pracují na prvních objednávkách.

Uspěš na indickém trhu s jeho specifiky není snadné. Tendr vypsal společnost BEML, jeden z největších výrobců železničních a jiných vozů v Indii, pro šroubové pružiny pro 504 nových vozů metra pro tři linky v Bombaji. Jednání poté zkomplikovala pandemie nového typu koronaviru. Nicméně ve třetím kole tendru se týmu HŽP podařilo navrhnout zcela nové řešení pružin včetně požadovaných výpočtů, dokladů technické způsobilosti a v rekordním čase vyrobených a otestovaných vzorků.

HŽP a.s. vyrábí podvozkové pružiny pro železniční a automobilový průmysl tvářením za tepla. Hlavními produkty jsou pružiny šroubové, listové a parabolické. Více než 80 % produkce putuje na export zejména do zemí EU. Mezi největší odběratele patří globální společnosti jako Scania, DAF, Iveco, Alstom nebo Tatravagonka. Firma zaměstnává přibližně 280 lidí zejména z Prostějova a jeho okolí.