



Berg Huettenmaenn Monatsh (2023) Vol. 168 (11): 515–520
<https://doi.org/10.1007/s00501-023-01399-4>
© The Author(s) 2023

BHM Berg- und
Hüttenmännische
Monatshefte

Untersuchung der Performance eines fluorfreien Gießpulvers auf einer Pilotanlage

Selina Riedler¹, Nathalie Gruber², Irmtraud Marschall^{2,3}, Viorel-Sergiu Ilie⁴ und Gerald Klösch¹

¹voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Leoben, Österreich

²Chair of Ceramics, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

³K1-MET GmbH, Linz, Österreich

⁴voestalpine Stahl GmbH, Linz, Österreich

Eingegangen 20. Juli 2023; angenommen 10. Oktober 2023; online publiziert 27. Oktober 2023

Zusammenfassung: Herkömmliche Gießpulver für den Strangguss enthalten Netzwerkbildner (SiO_2), Netzwerk-wandler (CaO , MgO , Na_2O , K_2O), Zwischenoxide (Al_2O_3) und Kohlenstoff. Um die Viskosität der Schlacke zu verringern, enthalten Gießpulver normalerweise Fluor. Ein hoher Fluorgehalt führt jedoch zu übermäßigem Verschleiß der Eintauchausgüsse (ETA). Zusätzlich sind Fluoremissionen schädlich für die Umwelt und stellen ein Gesundheitsrisiko dar. Zur Entwicklung neuer fluor(F)-freier Gießpulver wurden daher FactSage®-Berechnungen und Labortests durchgeführt. Bei der Auswahl der am besten geeigneten Zusammensetzung wurden der Schmelzpunkt, die Viskosität und das Kristallisationsverhalten berücksichtigt. Das neu designte F-freie Gießpulver und das Standard-Gießpulver wurden in einer Pilotanlage eingesetzt und bewertet. Die Ergebnisse zeigen eine zufriedenstellende Performance des F-freien Gießpulvers mit einem gleichmäßigen Aufschmelzverhalten, einer ausreichenden Schmierung des Stranges und einem qualitativ hochwertigen Produkt.

Schlüsselwörter: Gießpulver, Schlackenfilm, Fluorfrei, Kristallisation, Verschleiß, Oszillationsmarken

Investigation of the Performance of a Fluorine Free Mold Powder at a Pilot Plant

Abstract: Conventional mold powders for the continuous casting process contain network formers (SiO_2), network modifiers (CaO , MgO , Na_2O , K_2O), intermediate oxides (Al_2O_3), and carbon. To reduce the viscosity of the slag, mold powder normally contains fluorine. However, high

amounts of fluorine cause excessive erosion of the submerged entry nozzle (SEN), and fluorine emissions are detrimental to the environment and pose a health hazard. Thus, for developing new F-free mold powders, FactSage® calculations and laboratory tests were performed. The selection of the most suitable composition considered the melting point, the viscosity, and the crystallization behavior. The new designed mold powder and a standard mold powder were tested and compared at a pilot plant. The results show a satisfactory performance of the F-free mold powder, with a uniform melting behavior, a sufficient lubrication of the strand, and a high-quality product.

Keywords: Mold powder, Slag film, Fluorine free, Crystallization behavior, Wear, Oscillation marks

1. Einleitung

In früheren Studien wurden einige F-freie Schlackenzusammensetzungen und ihre Performance in Stahlwerken veröffentlicht. Tests in einem brasilianischen Stahlwerk ergaben eine zufriedenstellende Oberflächenqualität der Knüppel bei Verwendung eines F-freien Gießpulvers ohne B_2O_3 [1]. Um die Mineralphase Cuspidin ($\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_7\text{F}_2$) in herkömmlichen Schlackenfilmen zu ersetzen, wurde ein weiteres F-freies Gießpulver entwickelt, das Combeit ($\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_9$) als kristalline Hauptphase im Schlackenfilm bildet. Der Guss verlief unauffällig mit einer ausreichenden Schmierung und Wärmeübertragung. Das gegossene Produkt zeigte eine zufriedenstellenden Oberflächenqualität ohne Rissbildung [2]. Beim Gießen peritektischer Stahlsorten ist die Kontrolle des Wärmeübergangs entscheidend für die Minimierung von Oberflächenfehlern. In konventionellen Gießpulvern gilt Cuspidin als bevorzugte Kristallphase zur Steuerung des Wärmestroms. Eine weitere Studie beschreibt, dass die Oberflächenqualität von peritektischen Stahlsorten durch die Verwendung eines F-freien Gießpul-

N. Gruber (✉)
Chair of Ceramics,
Montanuniversität Leoben,
Leoben, Österreich
nathalie.gruber@unileoben.ac.at

vers verbessert wurde [3]. Außerdem wurden B_2O_3 und Na_2O als Alternativen für CaF_2 vorgeschlagen. Das neue Gießpulver wurde erfolgreich in einem Versuch getestet, bei dem Knüppel mit einem Durchmesser von 185 mm gegossen wurden [4]. Für das Gießen von Stahlsorten mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,56–0,64 % wurde ein F-freies und B_2O_3 -haltiges Gießpulver entwickelt und in einem Stahlwerk getestet. Die Ergebnisse zeigten eine zufriedenstellende Performance des neu entwickelten Gießpulvers [5]. Mehrere Laboruntersuchungen befassen sich ebenfalls mit F-freien Gießpulvern: Zur Beobachtung des Erstarrungsverhaltens wurden Time-Temperature-Transformation-Diagramme (TTT) von F-freien Gießpulvern mit Hilfe der Single-Hot-Thermocouple-Technik (SHTT) und Hochtemperatur Laser Scanning Konfokalmikroskopie (HT-LSCM) erstellt. Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Kristallmorphologie nicht nur von der chemischen Zusammensetzung, sondern auch von der ausgewählten isothermen Temperatur abhängt [6]. In einer weiteren Arbeit wurden die Viskositäten von B_2O_3 - und TiO_2 -haltigen F-freien Gießpulvern mittels Rotationsviskosimeter gemessen. Es wurde festgestellt, dass die Viskosität dieser F-freien Gießpulver mit der Erhöhung des B_2O_3 - und TiO_2 -Gehalts sowie der Basizität abnimmt [7]. In einer weiteren Arbeit wurde TiO_2 anstelle von F in Gießpulvern eingesetzt und die Wärmeübertragung mit Hilfe einer entwickelten Wärmefluss-Simulationsanlage untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass F-freie und titanhaltige Schlacken den Wärmeübergang gut kontrollieren können, so dass TiO_2 das Fluor in industriellen Gießpulvern voraussichtlich vollständig ersetzen wird [8].

In einer weiteren Studie wurden die Auswirkungen von Na_2O auf das Kristallisationsverhalten und den Wärmeübergang von $CaO-SiO_2-Na_2O-B_2O_3-TiO_2-Al_2O_3-MgO-Li_2O$ -Schlacken untersucht. CCT- und TTT-Diagramme zeigten, dass die Erhöhung des Na_2O -Gehalts die kritische Abkühlungsrate erhöhte und die Inkubationszeit der Schlacken verkürzte, was auf eine zunehmende Kristallisationsstendenz hindeutet. Der gemessene Wärmestrom einer Probe kam den industriellen fluorhaltigen Schlacken sehr nahe [9].

2. Experimentelles

Zur Entwicklung eines neuen F-freien Gießpulvers wurden thermochemische Berechnungen mit der Software FactSage® und Laborversuche durchgeführt. Ziel war es, einen Versuch in der Pilotanlage durchzuführen und die Performance des neu entwickelten F-freien Gießpulvers mit dem standardmäßigen F-haltigen Gießpulver zu vergleichen. Darüber hinaus wurden die Schlackenfilme und die Korrosion der Tauchrohre (ETA) charakterisiert.

2.1 Voruntersuchungen

Das neu entwickelte Gießpulver für das Stranggießen von ULC-Stählen sollte anhand folgender charakteristischer Eigenschaften bewertet werden: Schmelztemperatur (T_s),

Viskosität ($\eta_{1300^\circ C}$) und Erstarrungsverhalten. Der geforderte Wert für die Schmelztemperatur lag bei ca. $1250^\circ C$ und für die Viskosität ($1300^\circ C$) bei 0,3 Pa·s. Außerdem sollte das neu konzipierte Gießpulver hauptsächlich glasartig erstarren.

Um diese Anforderungen zu gewährleisten, wurden FactSage® Berechnungen mit dem Tool FactOptimal durchgeführt. Bei diesen Berechnungen wurden geeignete Oxide ausgewählt und Randbedingungen definiert. Wenn die Ergebnisse nur eine geeignete Schmelztemperatur oder Viskosität zeigten, wurde eine manuelle Änderung der chemischen Zusammensetzung vorgenommen. Zur Beurteilung des Erstarrungsverhaltens wurden 51 Proben mit unterschiedlichen, vielversprechenden chemischen Zusammensetzungen im Labor untersucht.

Die Voruntersuchungen zeigten schon bei geringen B_2O_3 -Anteilen eine zunehmende Glasbildungstendenz. Gießpulverzusammensetzungen mit $TiO_2 < 10 \text{ Gew}\%$ führten nach dem Abschrecken ebenfalls zu einer vollständig glasartigen Erstarrung. Die Labortests zeigten, dass Zusammensetzungen mit $\frac{CaO+MgO}{Al_2O_3+SiO_2} < 0,9$ kombiniert mit $CaO + MgO < 30 \text{ Gew}\%$ nach dem Abschrecken eine glasartige Erstarrung aufweisen. Zur Verringerung der Viskosität wird ein hoher Alkaligehalt ($Na_2O + K_2O > 17 \text{ Gew}\%$) benötigt. Labortests ergaben, dass die Kristallisationsneigung mit Al_2O_3 zunimmt. Auch wenn $Ti_2O > 15 \text{ Gew}\%$ ist, steigt die Kristallisationsneigung deutlich [10]. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde die in Tab. 1 beschriebene chemische Zusammensetzung für den Pilotversuch gewählt. Die Rohstoffmischung wurde zur Homogenisierung vorgeschmolzen und zur Einstellung des Aufschmelzverhaltens wurde der Kohlenstoffgehalt durch Messung der Aufschmelzzeit (t_M) verschiedener Kohlenstoff-Gießpulvergemische bestimmt.

Die chemische Zusammensetzung des Standardgießpulvers ist ebenfalls in Tab. 1 angegeben. Mit einem CaO/SiO_2 (C/S)-Verhältnis von 0,85 ist eine glasige Erstarrung zu erwarten. Die Viskosität des Standardgießpulvers bei $1300^\circ C$ beträgt 0,32 Pa·s.

TABELLE 1
Chemische Zusammensetzung, Break Temperature und Viskosität bei $1300^\circ C$ der Gießpulver

	Einheit	F-haltig	F-frei
SiO_2	Gew%	35,4	33,7
CaO	Gew%	30,0	24,6
MgO	Gew%	2,8	4,7
Al_2O_3	Gew%	4,5	4,0
TiO_2	Gew%	–	10,8
FeO	Gew%	1,5	1,1
MnO_2	Gew%	–	0,5
Na_2O	Gew%	8,1	13,6
K_2O	Gew%	–	7,0
F	Gew%	6,9	–
C_{frei}	Gew%	3,5	2,9
C/S	–	0,85	0,74
Break Temp	$^\circ C$	1027	1226
η_{1300}	Pa·s	0,32	0,32

TABELLE 2 Chemische Zusammensetzung ULC-Stahl		
	Einheit	ULC-Stahl
C	%	0,03–0,06
Si	%	0,1
Mn	%	0,17–0,30
P	ppm	150
S	ppm	Max. 200
Al	%	0,025–0,05
N	ppm	70

2.2 Pilotanlage

Die Versuche wurden in einem Forschungsstahlwerk der voestalpine Stahl Donawitz GmbH (VASD), dem Technical Center of Metallurgy, kurz TECHMET, durchgeführt. Das TECHMET besteht aus einem 5t-Induktionsofen, einem Pfannenbehandlungsstand, einer Vakuumanlage und einer Senkrechtstranggießanlage. Als Einsatzmaterial werden ausgewählte Schopfstücke der laufenden Produktion aus dem Knüppelwalzwerk mittels Einsatzmulden chargiert. Zur Einstellung der chemischen Zusammensetzung des Stahls erfolgt die Zugabe der erforderlichen Legierungselemente auf der Grundlage der ermittelten chemischen Analysen. In der Vakuumanlage wird der Stahlreinheitsgrad durch Entgasung verbessert. Im Zuge der Pilotversuche wurde ein ULC-Stahl mit der in Tab. 2 angegebenen chemischen Zusammensetzung gegossen.

In der Senkrechtstranggießanlage wird der Stahl vom flüssigen in den festen Zustand überführt: Der flüssige Stahl fließt in den Verteiler, der als Puffergefäß dient. Mit der Elektro-Plasma-Heizanlage kann die exakte Gießtemperatur eingestellt werden. Der Guss erfolgt über oszillierende Kupferkokillen, wobei zwei Formate gegossen werden können: Rundformat (\varnothing 230 mm) und Rechteckformat ($360 \times 270 \text{ mm}^2$). Für den Versuch wurde das Rechteckformat (Bloomlänge von 6 m) gewählt. In Tab. 3 sind die Gießgeschwindigkeit (v_c) und die Oszillationsparameter (Oszillationsfrequenz (f) und der Oszillationshub (h)) angegeben. Die Wärmeabfuhr des gegossenen Produkts erfolgt über die Primär- bzw. Sekundärkühlung. Zur Verbesserung des makroskopischen Reinheitsgrads wird in der Kokille und am Strang elektromagnetisch gerührt. Der Schwenkrollengang ermöglicht das Herausgeben des Blockes aus der Anlage in die horizontale Position und den Transport zu der Brennschneidevorrichtung.

TABELLE 3 Prozessparameter		
Parameter	Einheit	Wert
v_c	m/min	0,3
f	min^{-1}	58
h	mm	3

TABELLE 4 Chemische Zusammensetzung ETA in Gew-%		
	Grundmaterial	Beschichtung
SiO_2	15	17
Al_2O_3	84	53
ZrO_2	–	28
C	30	1,8

2.3 Probenahme und weitere Untersuchungen

Die Gießbedingungen wurden während des Gießvorgangs dokumentiert. Schlackenfilme und Schlackenkränze wurden am Ende der jeweiligen Gießsequenz entnommen. Für weitere Untersuchungen wurden Anschliffe aus Schlacken- und ETA-Proben mit dem Auflichtmikroskop (Olympus AX70) und dem Rasterelektronenmikroskop (SEM, Carl Zeiss EVO MA15) in Kombination mit einer energiedispersiven Röntgenanalyse (EDX, Dry Cool Oxford Instruments) untersucht. Die metallurgischen Untersuchungen des Blooms wurden mittels Baumann- und Makrostrukturätzung durchgeführt, und die Oberflächenqualität wurde durch Messung der Oszillationsmarkentiefe bewertet. Ebenso wurde die Korrosion des Tauchrohrs untersucht. Für den Gießprozess wurde ein Einloch-ETA mit der in Tab. 4 angegebenen chemischen Zusammensetzung verwendet.

3. Ergebnisse

3.1 Gießbedingungen

Bei Vergleich der Gießbedingungen für das F-freie und das F-haltige Gießpulver sind keine Anomalien erkennbar. Prozessparameter wie der Gießpulververbrauch (Q) und die Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasserein- und -auslass (ΔT) wiesen übliche Werte auf. Während des gesamten Gießprozesses verhielten sich beide Pulver unauffällig. In Tab. 5 sind die Gießbedingungen zusammengefasst.

3.2 Mineralogische Untersuchung der Schlacke

Die mineralogische Untersuchung der gesammelten Schlackenfilme zeigt Unterschiede im Kristallisationsverhalten, in der Anzahl der Poren und in der Schlackenfilmdicke (Abb. 1). Der Schlackenfilm für das F-freie Gießpulver ist im Vergleich zu dem F-haltigen Gießpulver dicker: die Schlackenfilmdicke (SF) für den F-freien Schlackenfilm beträgt $1625 \mu\text{m}$ und für den F-haltigen Schlackenfilm $1337 \mu\text{m}$. Der bereits beim Gießen erstarrte Teil des Schlackenfilms (SL)

TABELLE 5 Gießbedingungen			
Parameter	Einheit	F-haltig	F-frei
Q	$\text{kg/t}_{\text{steel}}$	2,2	2,0
ΔT	$^{\circ}\text{C}$	2,8	2,8

Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Darstellung der Schlackenfilme (a) F-haltiger Schlackenfilm und (b) F-freier Schlackenfilm

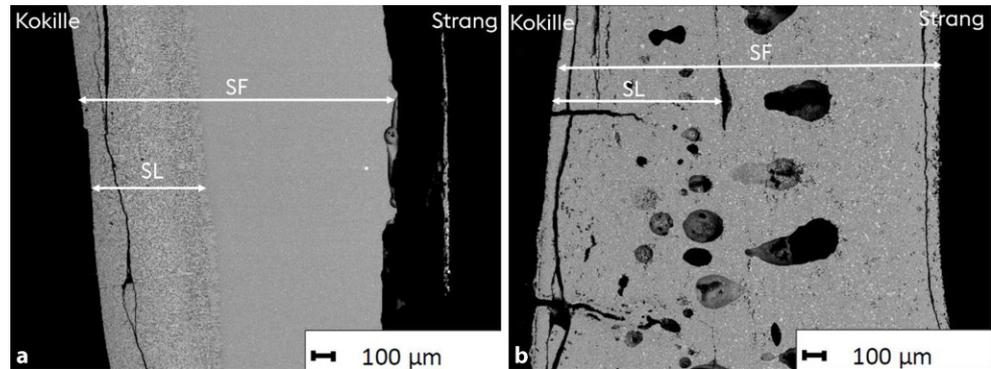


Abb. 2: Rasterelektronenmikroskopische Darstellung der Schlackenfilme des (a) F-haltigen Schlackenfilms mit der kristallinen Phase Cuspidin und (b) F-freien Schlackenfilms mit komplexer Kristallstruktur; 1-Cuspidin $\text{Ca}_8(\text{Si}_2\text{O}_7)_3\text{F}_4$

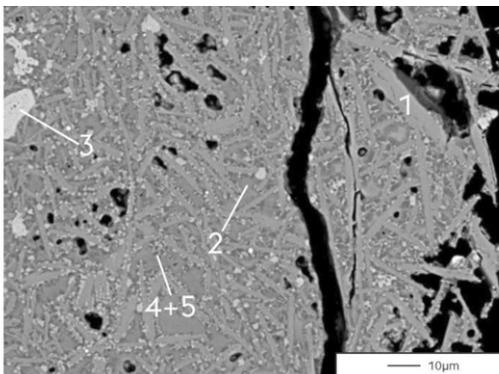
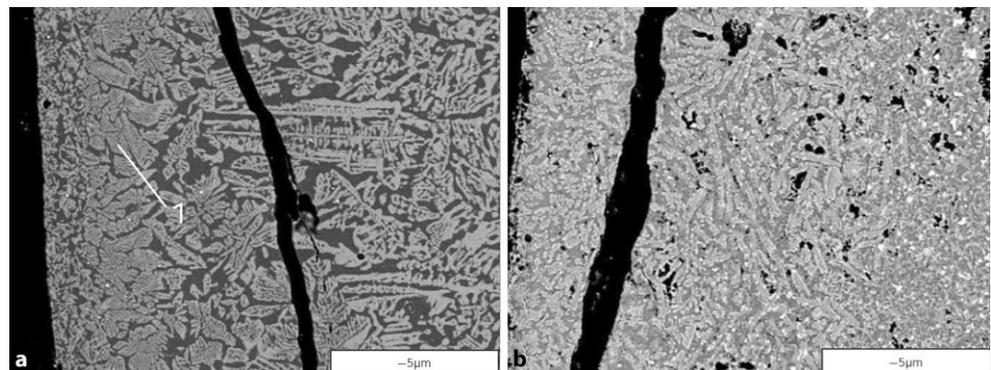


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Darstellung des F-freien Schlackenfilms; 1-Natrium-Calcium-Silikat, 2-Combeit $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_9$, 3-Perovskit CaTiO_3 , 4-Kalsilit $(\text{KNa})\text{AlSiO}_4$ (kaliumreich), 5-Kalsilit $(\text{KNa})\text{AlSiO}_4$ (natriumreich)

weist auch für den F-freien Schlackenfilm höhere Werte auf: $\text{SL}_{\text{F-frei}} = 716 \mu\text{m}$ und $\text{SL}_{\text{F-haltig}} = 456 \mu\text{m}$. Außerdem sind am F-freien Schlackenfilm große Poren zu erkennen, die auf Ausgasung von Alkalien hinweisen.

Der F-haltige Schlackenfilm weist neben einer beträchtlichen Menge an glasig erstarrter Schmelzphase Cuspidin als einzige kristalline Phase auf. Im Gegensatz dazu ist die Kristallisationsfähigkeit der F-freien Schlacke viel höher. Der Schlackenfilm hat ein komplexeres Gefüge und die Kristallgröße ist im Vergleich zum Standardpulver deutlich geringer (Abb. 2). Das Gefüge besteht aus einem Natrium-Calcium-Silikat, das für eine genaue Identifizierung zu klein war, Combeit ($\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_9$), Perovskit (CaTiO_3) und zwei Arten von Kalsilit $(\text{KNa})\text{AlSiO}_4$, eine mit einem höheren Ka-

lium- und eine mit einem höheren Natriumanteil (Abb. 3). Darüber hinaus zeigt die F-freie Schlacke eine Konzentrationsabnahme von Na_2O und K_2O von der Strangoberfläche zur Kokille, was zur Ausbildung einer Na_2O -, K_2O - und Al_2O_3 -reichen und pastösen Schicht an der Kokille führte.

3.3 Mineralogische Untersuchung ETA

In Abb. 4 ist die Korrosion des ETA-Materials dargestellt. Das weiße Rechteck markiert den Bereich des maximalen Verschleißes, der die Kontaktfläche zwischen flüssigem Stahl, Gießpulver und Feuerfestmaterial darstellt. Der Vergleich der ETA-Proben zeigt, dass der Feuerfestverschleiß durch das F-haltige Gießpulver im Vergleich zum F-freien Gießpulver wesentlich höher ist.

Zur mineralogischen Bewertung wurde der Bereich mit dem höchsten Verschleiß untersucht. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen sind in Abb. 5 dargestellt.

Bei der Verwendung des F-haltigen Gießpulvers wird der Graphitanteil im ETA in der Kontaktzone mit der Schlacke erheblich reduziert (Abb. 5a). Es ist eine Reaktion zwischen der Schlacke und dem feuerfesten Material zu erkennen. Das Gießpulver reagiert mit den Feinanteilen des Feuerfestmaterials und bildet an der Oberfläche Mullit mit einem an Tonerde angereicherten Schlackenfilm. Damit einhergehend, findet eine Auflösung von Aluminiumoxidkörnern statt. Eine Infiltration der Schlacke in das Feuerfestmaterial ist nicht zu beobachten.

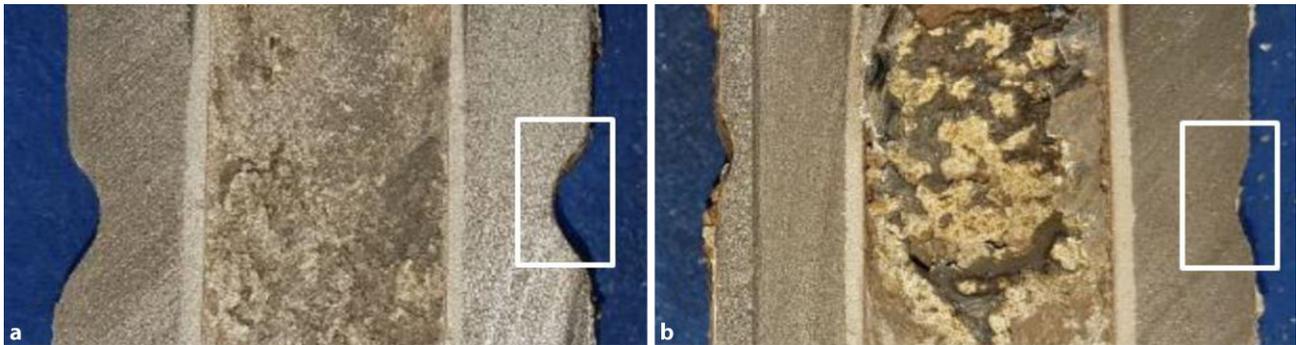
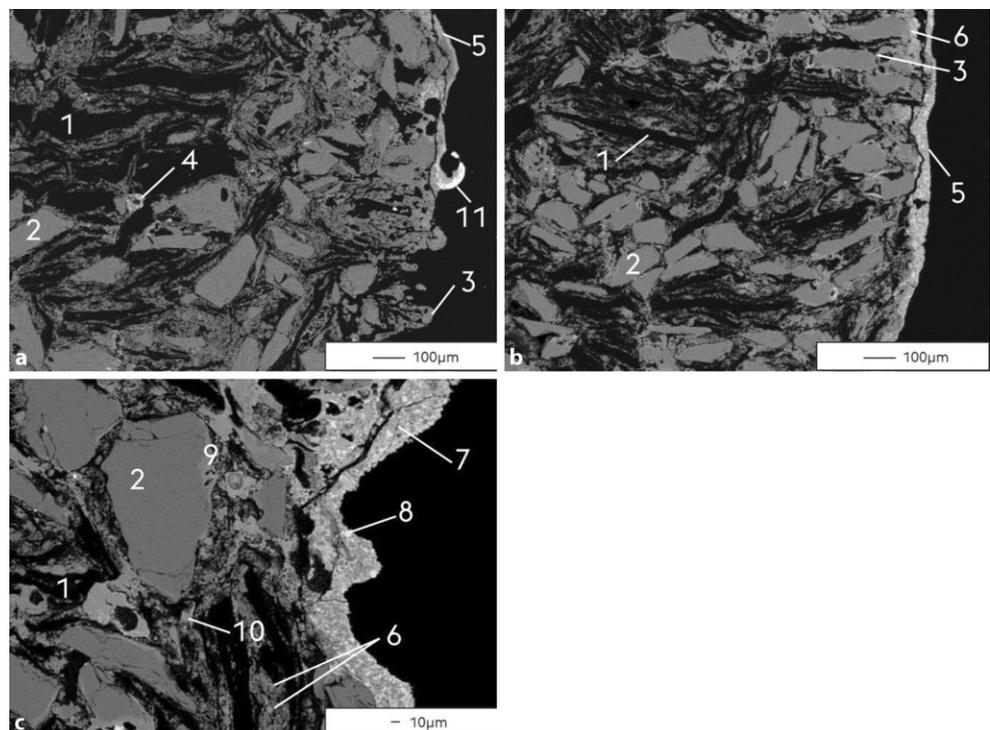


Abb. 4: Darstellung der Korrosion vom ETA-Material durch die (a) F-haltige Schlacke und (b) F-freie Schlacke. Das weiße Rechteck markiert den Bereich des maximalen Verschleißes

Abb. 5: Rasterelektronenmikroskopische Darstellung des ETA-Materials nach dem Guss mit dem (a) F-haltigen, (b) und (c) F-freien Gießpulver: 1-Graphit C; 2-Alumina Al_2O_3 ; 3-Mullit Al-Si-Oxid; 4-Rutil TiO_2 ; 5-Alumina-haltige Schlacke; 6-Kalsilit $(\text{KNa})\text{AlSiO}_4$; 7-Restschlacke; 8-Perovskit CaTiO_3 ; 9-an Kalium und Kieselerde angereicherte Reaktionsgrenze; 10-Natrium-Aluminium-Silikat; 11-Stahl



Im Vergleich dazu ist bei Verwendung des F-freien Gießpulvers keine Abnahme des Kohlenstoffgehalts im Kontakt mit der Schlacke zu erkennen (Abb. 5b). Während des Betriebs bildete sich auf der Oberfläche des Feuerfestmaterials eine Schlackenfilmschicht, die aufgrund der Auflösung von Tonerdepartikeln in der Schlacke mit Tonerde angereichert ist. Aufgrund des hohen Alkaligehalts dieses Flussmittels kommt es zu einer geringfügigen Infiltration von Kalium und Siliziumdioxid. Das führt zur Ausbildung einer an SiO_2 - und K_2O -angereicherten Reaktionsgrenze an der Oberfläche der Aluminiumoxidkörner. In direktem Kontakt mit der Schlacke bildet sich Kalsilit. Aufgrund der Kalsilitbildung und der Reaktionsgrenze an den Aluminiumoxidkörnern findet keine weitere Alkalidiffusion in das ETA-Material über die Gasphase statt. Folglich wird Clogging nicht beeinflusst.

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass die neu entwickelte F-freie Kokillenschlacke zu einem geringeren Verschleiß des Feuerfestmaterials führt, was die Lebensdauer der ETA beim Gießen erhöht.

3.4 Metallurgische Untersuchung

Die metallurgischen Untersuchungen des Vorblocks (Baumann- und Makrostrukturätzung) lassen keine Anomalien erkennen, d.h. die Schwefelverteilung im Stahl ist gleichmäßig und es sind keine Lunker sichtbar.

Um eine ausreichende Oberflächenqualität zu erreichen, ist es wichtig, Produkte mit geringer Oszillationsmarkentiefe (T_{OM}) herzustellen. Zu tiefe Oszillationsmarken können zu unerwünschten Gießpulvereinschlüssen führen. Die Ergebnisse der Oszillationsmarkentiefenmessungen sind in

Abb. 6: Darstellung der Oszillationsmarken bei Verwendung des (a) F-haltigen und (b) F-freien Gießpulvers



Abb. 6 dargestellt. Das F-freie Gießpulver führt zu einer fast 50 % geringeren Oszillationsmarkentiefe, was eine erhebliche Verbesserung der Produktqualität darstellt.

4. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die Performance eines neu entwickelten F-freien Gießpulvers im Vergleich zu einem F-haltigen Gießpulver untersucht. Hinsichtlich der Laboruntersuchungen und des Pilotversuchs im TECHMET können folgende Ergebnisse zusammengefasst werden:

1. Über thermochemische Berechnungen und Laborversuche wurde ein F-freies Gießpulver entwickelt, wobei die Viskosität und die Kristallisationsneigung an das Standard-Gießpulver angepasst wurden. Die Viskosität bei 1300 °C betrug bei beiden Gießpulvermischungen 0,32 Pa·s und mit einem C/S-Verhältnis <1 war eine glasige Erstarrung zu erwarten.
2. Die Ergebnisse der Versuche in der Pilotanlage zeigen eine zufriedenstellende Performance in Bezug auf das neu entwickelte Gießpulver mit einem gleichmäßigen Schmelzverhalten und einer ausreichenden Schmierung des Stranges. Diese Punkte in Verbindung mit dem gleichmäßigen vertikalen Wärmeübergang führten zu einem qualitativ hochwertigen Produkt.
3. Anschließende Untersuchungen der Schlackenfilme ergaben, dass das F-freie Gießpulver einen dickeren Schlackenfilm mit einer unerwartet höheren Kristallisationsfähigkeit und einer komplexeren Kristallstruktur aufweist. Ein geringerer Verschleiß des ETA-Materials bei Verwendung des F-freien Gießpulvers wird positiv bewertet. Darüber hinaus zeigen die metallurgischen Untersuchungen keine Auffälligkeiten in Bezug auf Lunken und Schwefelverteilung. Geringere Oszillationsmarken stellen eine erhebliche Verbesserung der Produktqualität dar, da sie mit einer geringeren Einziehung von Gießpulver in die Strangoberfläche verbunden sind.

Förderung. Das Forschungsprogramm des Competence Center for Excellent Technologies in „Advanced Metallurgical and Environmental Process Development“ (K1-MET) wird im Rahmen des österreichischen Kompetenzzentren-Programms COMET (Competence Center for Excellent Technologies) mit Mitteln des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, des Bundesministeriums für Arbeit und Wirtschaft, der Länder Oberösterreich, Steiermark und Tirol sowie der steirischen Wirtschaftsförderungsgesellschaft m.b.H. und der Standortagentur Tirol gefördert. Außerdem wird K1-MET von der Upper Austrian Research GmbH unterstützt. Neben der Finanzierung durch das COMET Programm kommen die weiteren finanziellen Mittel von der Montanuniversität Leoben und den Industriepartnern RHI Magnesita GmbH, voestalpine Stahl GmbH und voestalpine Stahl Donawitz GmbH.

Funding. Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Klug, J., Silva, D.R., Freitas, S.L., Pereira, M.M.S.M., Heck, C.N., Vilela, A.C.F., Jung, D.: Fluorine-free mould powders for billet casting—technological parameters and industrial tests. *Steel Res. Int* **83**(8), 791–799 (2012)
2. Takahira, N., Hanao, M., Tsukaguchi, Y.: Viscosity and solidification temperature of $\text{SiO}_2\text{-CaO-n}\alpha\text{2O}$ melts for fluorine free mould flux. *ISIJ Int.* **53**(5), 818–822 (2013)
3. Hunt, A., Stewart, B.: Techniques for controlling heat transfer in the mould-strand gap in order to use fluorine free mould powder for continuous casting of peritectic steel grades. In: 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (MOLTEN16), S. 349–355. (2016)
4. Fox, A.B., Mills, K.C., Lever, D., Bezerra, C., Valadares, C., Unamuno, I., Laraudogoitia, J.J., Gibsy, J.: Development of Fluorine-Free Fluxes for Billet Casting. *ISIJ Int.* **45**(7), 1051–1058 (2005)
5. Bezerra, M.C., Valadares, C., Rocha, I.P., Bolota, M., Carboni, M., Mattos Scipnic, I.L., Santos, C., Mills, K.I.: Impact of fluorine free mould flux use on continuous casting process. In: International Porto Alegre—RS Brazil. (2006)
6. Zhang, T.-T., Wen, G.-H., Zhang, Y.-Y.: Crystallization behavior of F-free mold fluxes. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* **18**, 150–158 (2011)
7. Wang, Z., Shu, Q., Chou, K.: Viscosity of fluorine-free mold fluxes containing B_2O_3 and TiO_2 . *Steel Res. Int* **84**(8), 766–776 (2013)
8. Qi, X., Wen, G.-H., Tang, P.: Investigation on heat transfer performance of fluoride-free and titanium-bearing mold fluxes. *J. Non-Cryst. Solids* **354**, 5444–5452 (2008)
9. Yang, J., Zhang, J., Sasaki, Y., Ostrovski, O., Zhang, C., Cai, D., Kashiwaya, Y.: Effect of Na_2O on crystallization behavior and heat transfer of fluorine-free mould fluxes. In: 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (MOLTEN16), S. 335–342. (2016)
10. Kölbl, N.: New mold slag compositions for the continuous casting of soft steel. *Steel Res. Int.* **93**(3), 2100165 (2022). <https://doi.org/10.1002/srin.202100165>

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.