



SAUBERE STAHLGUSSTEILE BEI EXTREM NIEDRIGEN GIESSTEMPERATUREN FÜR HOCHLEISTUNGSANWENDUNGEN MIT DEM INNOVATIVEN ROTOCLENE-VERFAHREN

Autoren: David Hrabina & Colin Powell, Foseco // Co-Authors: Dalibor Čáp, Milan Turták, Jiří Kolár, UNEX

Dieser Artikel beschreibt eine neue Technik zur Verbesserung der Qualität von Stahlschmelzen in der Pfanne vor dem Gießen.

Das Verfahren umfasst einen Behandlungsprozess, bei dem das Metall in der Pfanne mittels eines Rotors in Drehbewegung versetzt wird. Gleichzeitig werden über den Rotor fein verteilte Argonblasen in das Metall geleitet. Zusammen mit der Zugabe von Flussmittel und einer Drahtbehandlung führt das Verfahren zu einer effektiven Entfernung von Einschlüssen, einer homogenen Temperaturverteilung, der Modifizierung von Einschlüssen und einer Entschwefelung der Stahlschmelze. Die Technik ermöglicht es, den Stahl bei deutlich niedrigeren Temperaturen zu gießen, bis hin zum halbfliessigen Zustand, was zu einem feinen Gussgefüge und weniger Fehlern führt.

EINFÜHRUNG

Geschmolzenes Metall aus dem Schmelzofen wird in Verbindung mit dem Abstich in die Gießpfanne erheblich verunreinigt. [1] Da der Metallabstich nicht gut kontrolliert werden kann, und der der Atmosphäre ausgesetzte Abstichstrahl mit Luftsauerstoff reagiert, werden Oxidschichten gebildet, deren Schmelztemperatur höher ist als die des flüssigen Metalls in der Pfanne. Die gebildeten Oxidschichten können sich daher in der Pfanne nicht auflösen und das Aufschwimmen an die Oberfläche durch ihren Auftrieb würde, aufgrund ihrer großen Oberfläche und ihres vernachlässigbaren Volumens, zu viel Zeit in Anspruch nehmen.

Das Einbringen von Behandlungs- und Desoxidationslegierungen wie Al, SiCa, FeTi und FeZr in den Strahl des abgestochenen Stahls verschlimmert die Situation noch. Massive Mengen an Luft, die in das geschmolzene Metall in der Pfanne eingetragen werden (Abb. 1a und 1b), reagieren sofort mit diesen Elementen mit hoher Sauerstoffaffinität und bilden noch mehr nichtmetallische Einschlüsse und Oxidschichten.



Abb. 1a: Wassermodellierung des Abstichs

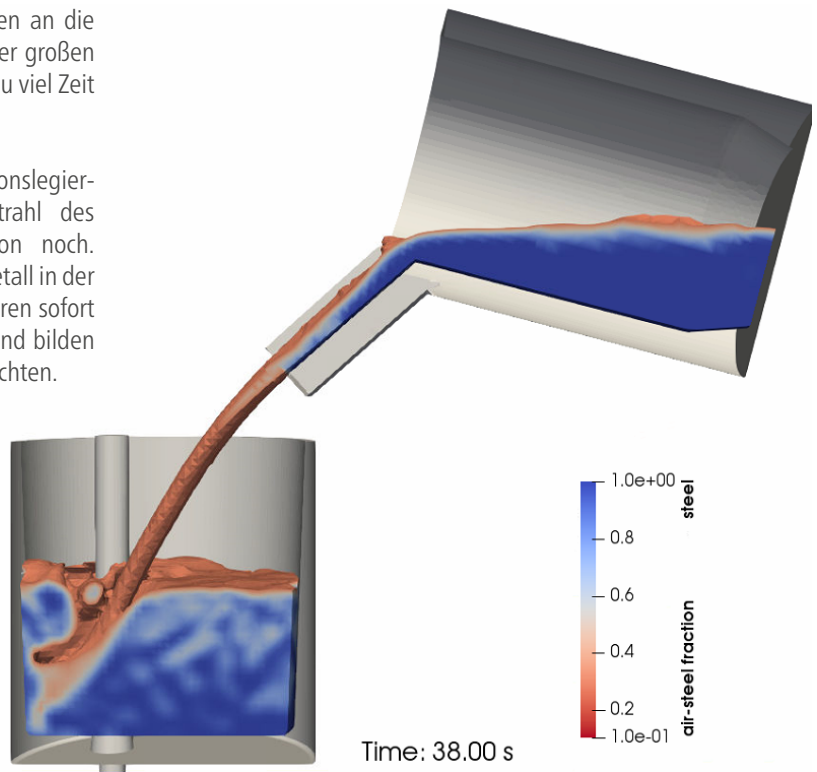


Abb. 1b: CFD-Simulation des Abstichs

Die Schmelztemperatur wird vor Beginn des Gießens mit einer Temperatursonde im oberen Bereich der Pfanne gemessen, was jedoch nicht repräsentativ für die Metalltemperaturen an anderen Stellen der Pfanne ist. Die Metalltemperatur in der Pfanne kann, aufgrund der kühlenden Wirkung der feuerfesten Auskleidung, an verschiedenen Stellen erheblich schwanken. Der Unterschied zwischen den Temperaturen des flüssigen Metalls am Boden und am oberen Ende der Pfanne kann mehrere zehn Grad betragen, bevor der Gießprozess beginnt. (Abb. 2a & 2b) Besonders empfindlich sind kleinere Stopfenpfannen aufgrund der Kühlwirkung von Stopfen und

Ausguss. Das kälteste Metall sinkt in den untersten Bereich um die Stopfen-Nase und ist das erste Metall, das in den Ausguss fließt, wenn der Stopfen angehoben wird.

Dieses Metall kühlt beim Durchlaufen des unbeheizten Gießsystems noch weiter ab und kann zu Kaltlauferscheinungen an der Gussteiloberfläche bis hin zum Einfrieren des Metalls führen.

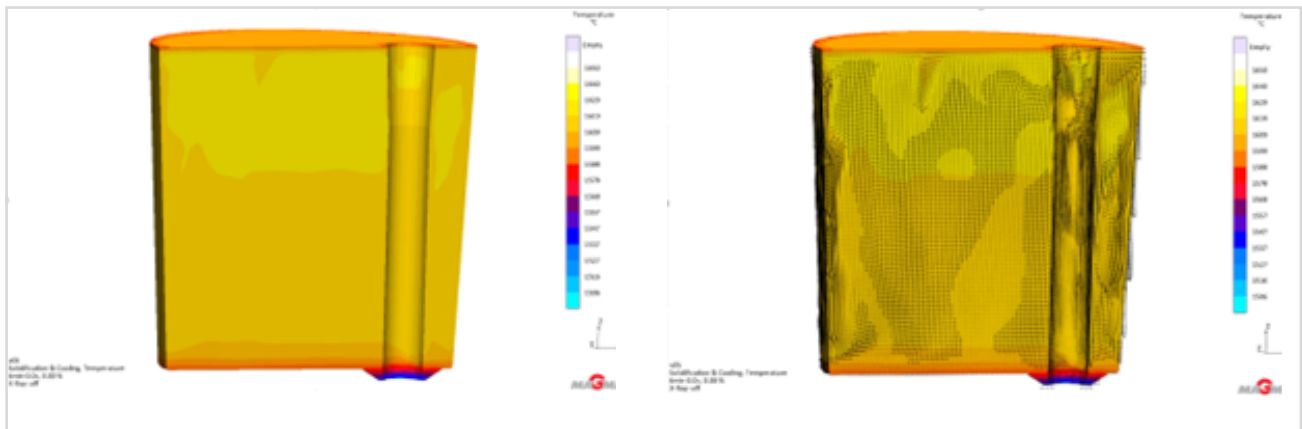


Abb. 2: MAGMA-Simulation der Temperaturverteilung in der Pfanne 6 Minuten nach dem Abstich

Das ROTOCLENE-Verfahren wurde entwickelt, um geschmolzenes Metall in der Pfanne effektiv zu behandeln. Zur Verringerung der Wasserstoff- und Stickstoffaufnahme wird die Schmelze idealerweise vor oder während der Rotationsbehandlung mit einem Fülldraht desoxidiert und nicht während des Metallabstichs aus dem Lichtbogen- oder Induktionsschmelzofen im Abstichstrahl. Ein Keramikrotor mit hohlem Schaft rührt das geschmolzene Metall, während Argon durch ihn hindurchgespült wird und sich durch die Wirkung des Rotors in Wolken aus sehr feinen Blasen verteilt. (Abb. 3a) Diese schweben langsam in einer spiralförmigen Bahn zur Schmelzeoberfläche. Zusätzlich wird ihr Weg, durch das um die vertikale Achse der Pfanne rotierende Metallverlängert. An der Oberfläche der Argon-Mikroblasen haften sich Einschlüsse von Schlacketeilchen und Oxidschichten an und schwimmen in die

Schlackenschicht auf der Schmelzeoberfläche auf. Die geringe Größe der Argonblasen führt zu einer langen Verweildauer in der Schmelze und bedeutet zusammen mit der verlängerten Schwebebahn, dass eine sehr effektive Metallreinigung erreicht wird (Abb. 3b). Durch die Rotation der Schmelze wird auch die Metalltemperatur effektiv homogenisiert und kritische kalte Stellen am Boden eliminiert (Abb. 4a). Das geschmolzene Metall in der Pfanne rotiert aufgrund seines Trägheitsmoments auch noch mehrere Minuten nach dem Ende der Behandlung durch den Rotor weiter. Die Metalltemperatur bleibt dadurch an jeder Stelle der Pfanne konstant, ohne dass es zu kalten Stellen kommt (Abb. 4b), und die Gießtemperatur kann im Vergleich zur herkömmlichen Praxis erheblich gesenkt werden.



Abb. 3a: Sehr feine, spiralförmig verteilte Ar-Blasen

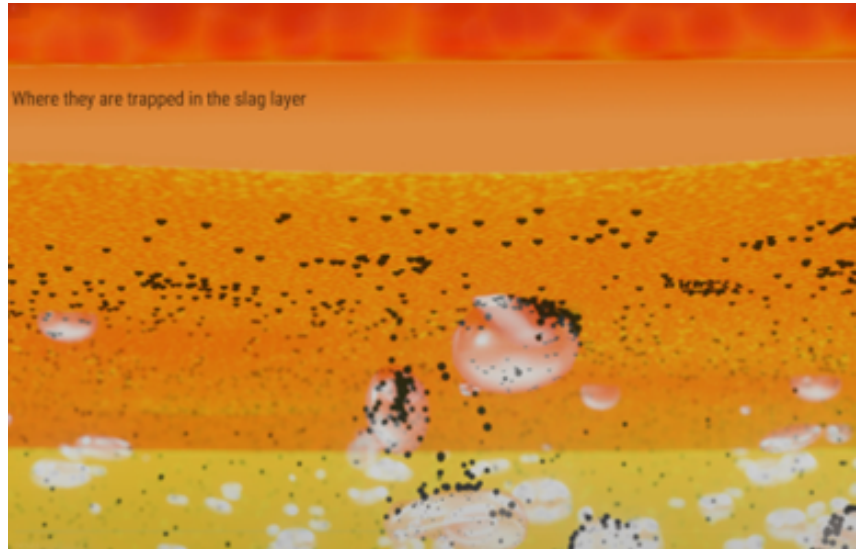


Abb. 3b: Effektive Entfernung von Bi-Filmen und Einschlüssen durch Ar-Blasen

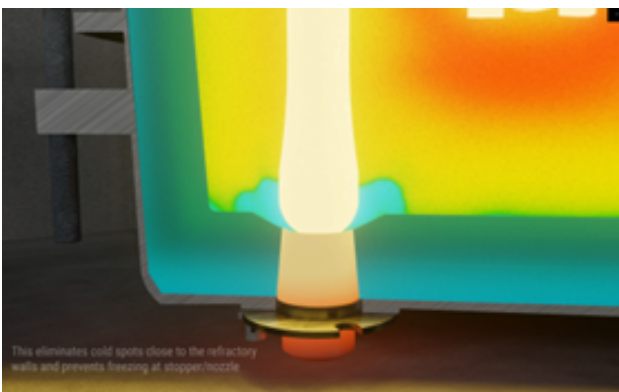


Abb. 4a: Kalte Stellen des Metalls nach dem Abstich

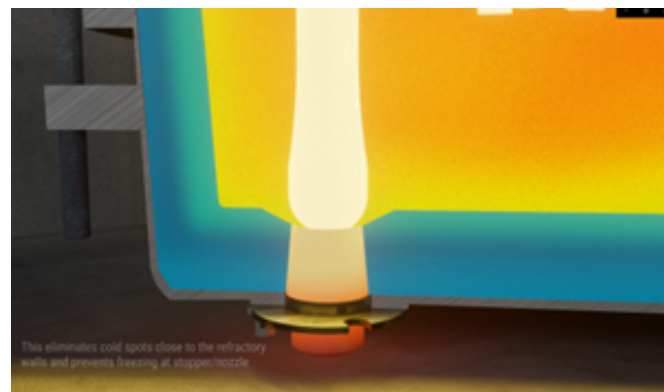


Abbildung 4b: Homogenisierung der Metalltemperatur durch ROTOCLENE – Rotationsbehandlung



ANIMATION
ANSEHEN

Unsere Animation zeigt alle Schritte und Vorteile des ROTOCLENE-Verfahrens, einschließlich der Reinigung des geschmolzenen Metalls in der Pfanne um dadurch die Gussqualität zu verbessern.

Synthetische Schlacke kann ebenfalls in die Metallschmelze eingebracht werden, um nichtmetallische Einschlüsse teilweise aufzulösen und eine Tiefentschwefelung (Tabelle 1) in einer neutralen oder basischen Pfanne durchzuführen, ähnlich wie in einem Pfannenofen in der Sekundärmetallurgie [2]. Das Rühren ermöglicht auch eine intensivere Desoxidation durch reinen Ca-Draht, um Aluminiumoxideinschlüsse in eine mehr nodulare Form zu überführen (Abb. 5).

Dies ist deutlich effektiver als der Einsatz von SiCa [3]. Reines Ca reagiert normalerweise zu heftig mit Stahl und kann nicht in Gießereipfannen verwendet werden. Wird das Ca jedoch in einen sich bewegenden Schmelzestrom eingebracht, löst es sich auf, bevor es die kritische Dampfkonzentration erreicht. Reines Ca trägt auch nicht zu einer vorzeitigen Filterblockade bei, wie es bei SiCa der Fall sein kann.

Test Nr.	Zeit	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Al	Al löslich
1	12:40	0.67	0.85	0.18	0.016	0.017	0.30	0.20	0.22	0.01	0.05	*0.234	*0.220
2	13:08	0.31	0.16	0.00	0.002	0.012	0.09	0.27	0.20	0.00	0.05	*0.150	*0.143
3	13:45	0.40	0.42	0.42	0.006	0.007	0.89	0.26	0.19	0.01	0.05	0.027	0.023
4	14:37	0.45	0.82	0.52	0.008	0.002	1.13	0.26	0.19	0.01	0.05	0.033	0.031

Test Nr. 1 – Elektrolichtofenbogen, kurz nach Erschmelzen (6800 kg)

Test Nr. 2 – Elektrolichtbogenofen nach Oxidation

Test Nr. 3 – Elektrolichtbogenofen vor Abstrich → Zugabe von 1% synthetischer Schlacke SULFAMIN 70 in die Gießpfanne während des Abstiches

Test Nr. 4 – Probe entnommen aus der Pfanne nach der ROTOCLENE Behandlung gegen Ende des Gießprozesses. Schwefelreduzierung von 70 auf 20 ppm.

Tabelle 1: Entschwefelung in der Pfanne durch synthetische Schlacke im Rahmen der ROTOCLENE-Behandlung

Die Erstarrung von Metallen ist ein sehr komplexer Prozess der Umwandlung von der flüssigen in die feste Phase, der die Bildung von Dendriten und die Abscheidung schwerlöslicher Elemente an den Korngrenzen beinhaltet. Die Atome werden von der flüssigen, ungeordneten Phase in die feste, geordnete Phase umgewandelt, wobei erhebliche Mengen latenter Wärme freigesetzt wird, die von einer volumetrischen Schrumpfung begleitet wird. [4, 5, 6]. Die Liquidustemperatur kann durch die ursprüngliche chemische Zusammensetzung des gegossenen Metalls zuverlässig bestimmt werden, während die Solidustemperatur durch die tatsächliche lokale Zusammensetzung des Metalls und durch die kontinuierliche Segregation von Element variieren kann.

Die Temperatur des Liquidus ist an jedem Gussteil und an jeder Stelle identisch.

Die Solidustemperatur in dünnen Abschnitten desselben Gussteils ist jedoch höher als die Solidustemperatur in dicken Abschnitten. Die verlängerte Erstarrungszeit in den dicken Gussabschnitten ermöglicht es den Dendriten, sich stärker zu entwickeln, und die Entmischung an ihren Korngrenzen verändert ihre chemische Zusammensetzung aufgrund der höheren Konzentrationen. Dieses Phänomen führt dazu, dass der Erstarrungsbereich in dünnen Abschnitten schmaler und in dicken Abschnitten desselben Gussstücks breiter ist. Die Erstarrungszeit hat großen Einfluss auf das Gefüge und damit auf die endgültigen mechanischen Eigenschaften von Stahlgussstücken. Längere Erstarrungszeiten lassen die Dendriten größer werden und die interdendritische Seigerung ist höher (Abb. 6, 7a, 7b, 7c, 8) [7, 8].

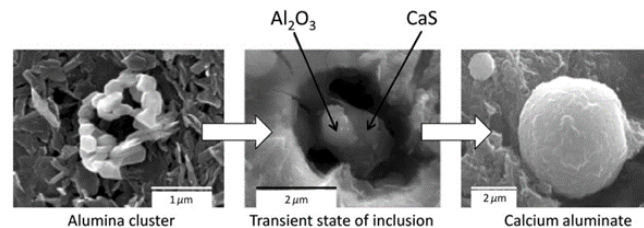


Abb. 5: Veränderung der Aluminiumoxideinschlüsse durch Ca in eine kugelförmige Form, die weniger schädlich für die Kerbschlagzähigkeitsprüfung bei niedrigen Temperaturen und die Ermüdungsfestigkeit ist

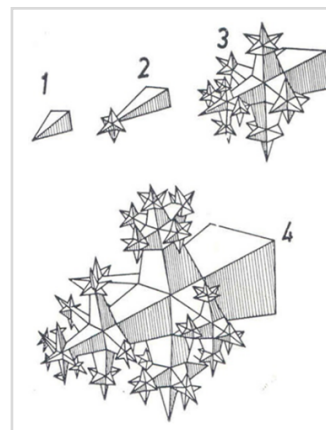


Abb. 6: Dendritisches Wachstum von primären, sekundären, tertiären bis zu quaternären Dimensionen in Abhängigkeit von der Erstarrungszeit nach Robert Wlodawer [7]

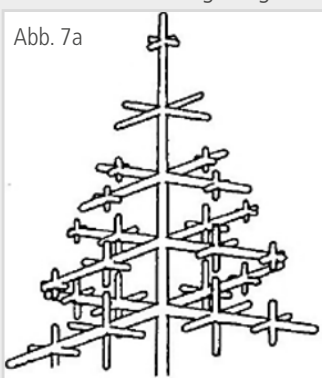


Abb. 7a



Abb. 7b

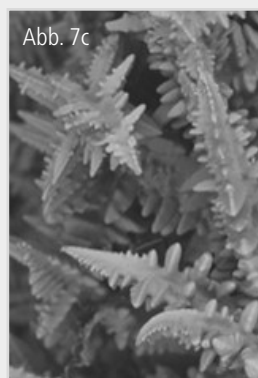


Abb. 7c

Abb. 7a: Modell der Dendritenstruktur mit Primär-, Sekundär- und Tertiärachse [5]

Abb. 7b: Schnitt durch die Struktur eines Stahldendriten [6]

Abb. 7c: Dendritenwachstum bei der Schrumpfung [6]

Dies wirkt sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften aus. Die Erstarrungszeit hängt von vielen Parametern ab, vor allem aber vom Modul des Gussteils und der Gießtemperatur. Der Modul wird hauptsächlich durch die Gussstückgeometrie bestimmt, während die Gießtemperatur von der angewendeten Gießereipraxis abhängt. Die Überhitzung (die Differenz zwischen der Gießtemperatur und der Liquidustemperatur) wird angewendet, um sicherzustellen, dass das Gussteil gefüllt ist, bevor die Erstarrung beginnt. Die Form nimmt Überhitzungsenergie aus dem flüssigen Stahl auf und wird aufgeheizt, bevor die Temperatur des geschmolzenen Metalls unter die Liquidustemperatur fällt, und der Erstarrungsprozess startet. Eine höhere Gießtemperatur führt zu einer größeren Energieaufnahme durch die Form, bevor die Erstarrung beginnt, und verringert die Fähigkeit der Form, Wärme aus dem erstarrenden Gussteil aufzunehmen. (Abb. 9)

Um die Reduzierung der Gießtemperatur und die Erstarrungszeit zu maximieren, wird das geschmolzene Metall in der Pfanne durch einen leistungsstarken Keramikrotor gerührt. Dies verhindert die Agglomeration der in der Schmelze entstehenden embryonalen Kristalle und begrenzt das Wachstum von Dendriten und die Entmischung, wenn die Temperatur in der Pfanne unter Liquidus fällt. Die latente Wärme, die durch die Bildung der festen Phase freigesetzt wird, verlangsamt die Abkühlung des Metalls in der Pfanne und ermöglicht ausreichend Zeit, um den Stopfen, die Düse und die Auskleidung der Pfanne bis nahe an die Temperatur des geschmolzenen Metalls aufzuheizen.

Die Notwendigkeit, den Stahl für das Gießen zu überhitzen, entfällt durch diese Bedingungen, und die extrem niedrige Gießtemperatur, die bereits im Bereich zwischen Liquidus und Solidus liegt, sorgt dafür, dass die Wärmeenergie schnell von der kalten Form aufgenommen werden kann. Dies führt zu einer sofortigen Erstarrung mit einer sehr feinen Korngröße und minimaler Seigerung an den Korngrenzen. Metall, das bei einer extrem niedrigen Gießtemperatur gegossen wird, muss wirksam vor Reoxidation und Lufteintrag geschützt werden, am besten durch einen Shroud (auch als Schattenrohr bekannt). Halbflüssiges Metall ist noch ausreichend flüssig, um den Formhohlraum zu füllen, aber die Gießzeit muss sehr kurz sein, um Kaltlauf oder ein Einfrieren des Metalls zu vermeiden. Oxidschichten und mitgerissene Luftblasen können durch den halbflüssigen Stahl nicht an die Gussoberfläche aufschwimmen. Es ist vielleicht nicht möglich, jedes Gussstück bei extrem tiefer Gießtemperatur herzustellen, aber massive, dickwandige Gussstücke, die von einem schnellen Erstarrungsprozess profitieren, sind für diese Technologie außerordentlich gut geeignet. Die Grenze, wie weit unterhalb des Liquidus das geschmolzene Metall flüssig genug bleibt, um durch die Schwerkraft gegossen zu werden, wird durch die chemische Zusammensetzung des zu gießenden Stahls bestimmt. Kohlenstoffstähle und hochfeste, niedrig legierte Stähle mit einem engen Erstarrungsbereich und hoher Wärmeleitfähigkeit reagieren empfindlicher auf extrem tiefe Gießtemperaturen als mittel- und hochlegierte Stähle mit einem viel breiteren Erstarrungsbereich und geringerer Wärmeleitfähigkeit. Die Durchführbarkeit des Gießens bei extrem niedrigen Gießtemperaturen muss auf der Grundlage der Gussstückgröße und -form sowie der individuellen Erfahrung der Gießerei geprüft werden. Dennoch reduziert jede Herabsetzung der Überhitzungstemperatur die Primärkorngröße und Seigerung und verbessert somit die mechanischen Eigenschaften. Gussfehler, die bei der Ultraschall-, Röntgen- oder Magnetpulverprüfung (MPI) festgestellt werden, werden erheblich reduziert, und die Gussteile erreichen die von den Endkunden geforderten höheren Qualitätsstandards.

Mehr als eintausend Stahlschmelzen im Bereich von 3 bis 20 Tonnen wurden bereits mit dem ROTOCLENE-Verfahren behandelt. Die Gesamtergebnisse des Gießens zeigen eine deutliche Verbesserung der Gussoberfläche, der inneren Homogenität und der Metallreinheit, gefolgt von höheren mechanischen Eigenschaften im Vergleich zur konventionellen Technologie. (Tabelle 2. Abb. 10a & 10b)

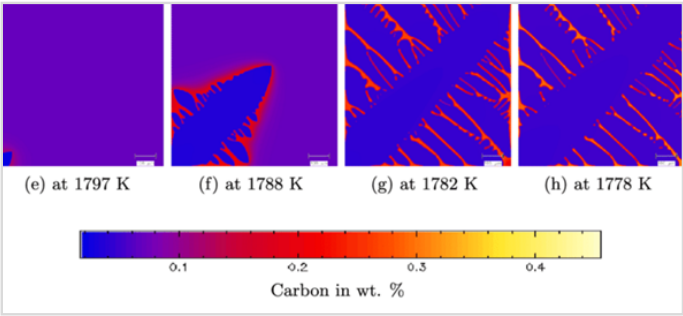


Abb. 8: Dendritenwachstum und interdendritische Entmischung im Kohlenstoffmodell [9]

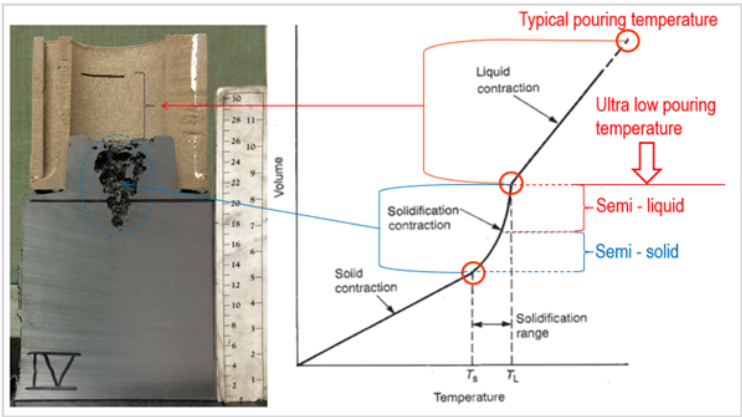


Abb. 9: Verlängerte Erstarrungszeit durch Überhitzung des Stahls über die Liquidustemperatur. Die Volumenkontraktion beginnt ab der Gießtemperatur, aber ein Lunker kann sich erst bilden, wenn die Temperatur unter die Liquidustemperatur fällt und der Erstarrungsprozess beginnt.

	047 - Metall, das in der Pfanne mit einem Spülstein behandelt wurde	092 - Durch Rotationsbehandlung behandeltes Metall
Analysierte Gesamtfläche (mm ²)	116.64	116.64
Gesamtzahl der klassifizierten Merkmale	4709	2142
Gesamte analysierte Fläche Merkmale ohne nicht klassifizierte (Mikrometer ²)	49576	34942
Si>70	143	81
Al>70	208	107
70>Al>50	407	298
Mn>25 and S>10	2373	1426
Mg>25	1	0
Ca>50	2	7
50>Ca>10	1471	141
Rest	104	82

Tabelle 2: Vergleich von Einschlüssen und Metallreinheit: Spülsteinverfahren (047) im Vergleich zu ROTOCLENE (092) Proben aus dem Testblock, der beim Gießen mitgegossen wurde

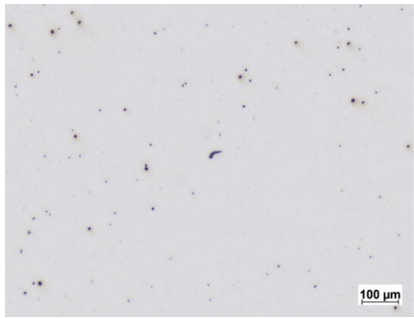


Abbildung 10a: Spülstein-Behandlung 20' Metallographie



Abbildung 10b: ROTOCLENE-Behandlung 7'

Geschmolzenes Metall kann unter Einwirkung von Luftsauerstoff jederzeit Oxidschichten bilden. (Abb. 11a & 11b). Superreines Metall mit einer homogenen Temperaturverteilung in der Gießpfanne, das während des Gießprozesses verunreinigt wird, kann dennoch zu Gussfehlern beitragen [9, 10, 11]. Die HOLLOTEX*-Shroud wird dringend empfohlen, um flüssigen Stahl vor Lufteintrag und Metallreoxidation während des Gießprozesses zu schützen, insbesondere in Kombination mit ROTOCLENE behandelter Schmelze in der Gießpfanne.

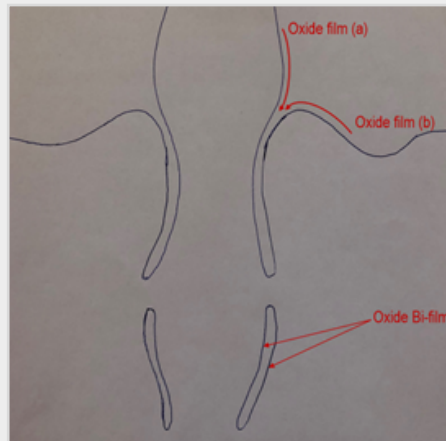


Abb. 11a: Lufteintrag und Bifilmbildung

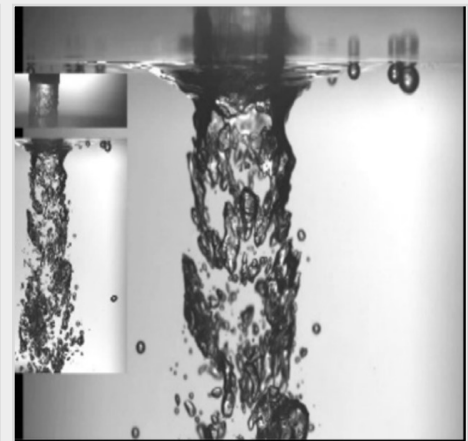


Abb. 11b: Bildung von Luftblasen im Gießprozess

FALLSTUDIE: KOLBEN

Dieser dickwandige Kolben aus Kohlenstoffstahl (GS-70) wurde in den letzten 10 Jahren regelmäßig hergestellt und hat die Inspektion nie ohne übermäßiges Schweißen bestanden. Die Form ist scheinbar einfach (Abb. 12a), aber die Erstarrungszeit von etwa 15 Stunden (Abb. 12b) führt zu übermäßigem Dendritenwachstum, und die starke Seigerung erschwert die Speisung in der letzten Erstarrungsphase.



Abbildung 12a: Gestrahltes Gussteil

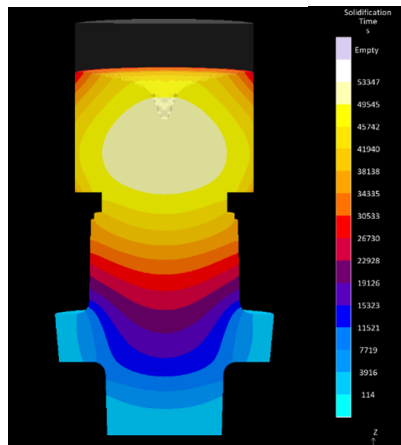


Abbildung 12b: Simulation der Erstarrungszeit



Abbildung 13a: Porosität in der unteren Nabe



Abbildung 13b: Porosität unter dem Speiser

Eine primäre Schrumpfung war nie vorhanden, aber das Ultraschallsignal ging bei der Inspektion des unteren Teils der Nabe und des oberen Bereichs unter dem Speiser immer verloren. Durch wiederholte Wärmebehandlungen wurde versucht, die Korngröße zu verfeinern und eine Ultraschallprüfung zu ermöglichen, jedoch ohne Erfolg. Teile mit Defekten im Unterteil (Abb. 13a) und unter dem Speiser (Abb. 13b) wurden mit bis zu einer Tiefe von 135 mm bearbeitet, bis die durch Eindringungsprüfung festgestellte Porosität entfernt war. Dies erfolgte auf einem Durchmesser von 300 mm im Unterteil und 400 mm unter dem Speiser. Die bei der Penetrationsprüfung festgestellte Porosität war schließlich viel größer als die durch Ultraschallprüfung ermittelte. Nach dem Schweißen musste eine zusätzliche Glüh- /Wärmebehandlung durchgeführt werden.

Durch die Anwendung des ROTOCLENE-Verfahrens wurde das geschmolzene Metall gereinigt und die Gießtemperatur auf Liquidusniveau gesenkt. 7400 kg Stahl aus einem Lichtbogenofen wurden in einer Pfanne mit einem Fassungsvermögen von 8,5 Tonnen 32 Minuten lang behandelt, bis die Temperatur auf 1495 °C sank. Anschließend wurde die Pfanne für den Abguss in die Gießerei gebracht. Dieser Vorgang war 7 Minuten nach dem Ende der Rotationsbehandlung abgeschlossen. Die Gießtemperatur betrug 1480°C, was als Liquidustemperatur dieser Schmelze berechnet wurde. Das Gießen erfolgte über die HOLLOTEX-Shroud, um den Stahl vor Reoxidation und Bi-Film-Bildung zu schützen. Die Form wurde innerhalb von 44 Sekunden gefüllt. Das Gießgewicht betrug 6400 kg und das Gewicht des Gussteils 3700 kg. Es gab keine Anzeichen für das Einfrieren von Metall in der Pfanne. Das Gussteil hat die Ultraschallprüfung ohne Schweißen erfolgreich bestanden (Abb. 15).

Die Anwendung des ROTOCLENE-Verfahrens auch unterhalb der Liquidustemperatur wurde für andere Gussstücke erprobt. Die Herausforderung besteht darin, die Metalltemperatur zu messen, wenn sie unter 1500°C fällt. Bei Temperatursonden für Stahl gefriert die Schlacke an der Metallschale, die das Thermoelement schützt, und die Temperatur wird dann meist nicht aufgezeichnet. Das Metall wurde vor dem Gießen so lange behandelt, bis die Temperatur unter 1480 °C fiel. Im Pfannenboden waren einige Metallreste eingefroren, die jedoch beim Entleeren der Pfanne mit einer Sauerstofflanze entfernt werden konnten. Der Abguss von einer Form aus der Pfanne kann bei solch extrem niedrigen Gießtemperaturen deutlich unter dem Liquidus erfolgen, aber das Gussstück muss dick und unempfindlich gegen Kaltlauf oder Einfrieren des Metalls sein. Das Gießen von mehr als einer Form aus einer Pfanne könnte problematisch sein, da das Metall an der Verbindung zwischen Ausguss und Shroud zu erstarren beginnen könnte.

ZUSAMMENFASSUNG

ROTOCLENE - Die Rotationsbehandlung von geschmolzenem Stahl ist eine innovative Technologie, die einen höheren Grad an Metallreinigung und Temperaturhomogenisierung in der Gießpfanne ermöglicht. Durch die Rotation der Stahlschmelze werden die Pfannenauskleidung und der Stopfen erwärmt, wodurch ein vorzeitiges Erstarren des Metalls in der Pfanne und das Risiko des Einfrierens des Stopfens vermieden wird. Die Behandlung kann fortgesetzt werden, bis die Metalltemperatur auf die gewünschte Gießtemperatur abgekühlt ist, unabhängig von der Verweilzeit des Metalls. Der Stahl kann durch die synthetischen Schlacken weiter entschwefelt und die Aluminiumoxideinschlüsse durch reines Ca in eine weniger problematische Kugelform überführt werden. In Kombination mit der HOLLOTEX Shroud kann die Gießtemperatur erheblich gesenkt und sauberere Gussteile mit einer feineren Korngröße und höherer Homogenität hergestellt werden.



Abbildung 14a: Defekter Bereich bis zu 135 mm abgetragen



Abbildung 14b: Defekte am Durchmesser sind immer noch vorhanden und müssen nachbearbeitet werden

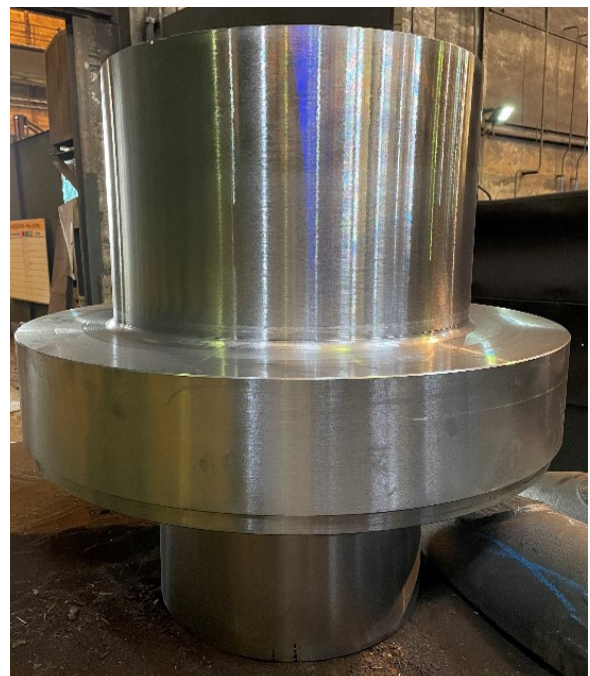


Abbildung 15: Fehlerfreies Gussstück

ZU DEN WICHTIGSTEN VORTEILEN VON ROTOCLENE GEHÖREN:

- Homogenisierung der Temperatur des geschmolzenen Metalls in der Pfanne
- Entfernung von Einschlüssen und Bi-Filmen durch Metallreinigung
- Erhöhte Filtrationskapazität und geringeres Risiko von Filterblockaden oder -bruch
- Entschwefelung durch synthetische Schlacke
- Modifizierung von Einschlüssen durch reines Ca
- Verringeres Risiko des Stopfeneinfrierens am Ausguss
- Absenkung der Gießtemperatur
- Weniger Fehlstellen bei der Röntgen- und Magnetpartikeluntersuchung die ohne Reparatur akzeptiert werden
- Verbesserung der mechanischen Eigenschaften

REFERENZEN

- [1] J CAMPBELL. (2015). Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design (2nd ed.). Oxford, UK: Elsevier
- [2] CHAO FAN, ALEXIS GOSA, LIFENG ZHANG, QINGCAI LIU and DAYONG CHEN. The Minerals, Metals & Materials Society (2018) Mathematical Modeling on the Fluid Flow and Desulfurization During KR Hot Metal Treatment
- [3] N. VERMA, PETRUS C. PISTORIUS, RICHARD J. FRUEHAN, MICHAEL POTTER, MINNA LIND, and SCOTT R. STORY, Transient Inclusion Evolution During Modification of Alumina Inclusions by Calcium in Liquid Steel: The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International (2011)
- [4] UPENDRA KUMAR MOHANTY, HRUSHIKESH SARANGI, Solidification of Metals and Alloys (2020)
- [5] M. STROUHALOVA, Studium Fazovych Zmen v Oceli Behem Jejiho Tuhnuti – VSB TU Ostrava – Doctor Thesis (2018)
- [6] E. Munsterova, Obecne Udaje o Fazovych Premenach Behem Tuhnuti, Brno (2005)
- [7] R. WLODAWER, Directional Solidification of Steel Casting book. (1966)
- [8] M. Amirthalingam, E. M. van der Aa, C. Kwakernaak, M. J. M. Hermans, I. M. Richardson, Elemental Segregation During Resistance Spot Welding of Boron Containing Advanced High Strength Steels (2015)
- [9] D. HRABINA, P. FILIP. Foundry Practice 267, ADVANCES IN THE POURING OF STEEL CASTINGS WITH A SHROUDED METAL STREAM (2019)
- [10] CH. BECKERMANN & S. H. MAJIDI, University of Iowa – Simulation of Air Entrainment during Mold Filling: Comparison with Water Modeling Experiments, Steel Foundries Society of America, Chicago IL, USA 2017
- [11] K.T.KIGER & J.H.DUNCAN – Air Entrainment Mechanism in Plunging Jets and Breaking Waves (2012)

ÜBER DEN AUTOR

David Hrabina ist seit 2005 als internationaler Projektleiter bei Foseco tätig. Zu seinen Hauptaufgaben gehört die Implementierung innovativer Technologien in Gießereiprozesse, um dort neue Meilensteine zu erreichen. Es macht ihm Spaß, neue Technologien zu entwickeln und die Grenzen der Fähigkeiten in Bezug auf die Qualität der Gussteile zu verschieben. In seiner Freizeit unternimmt er gerne Wanderungen an abgelegenen Orten im Nirgendwo.

NEHMEN SIE KONTAKT MIT DAVID AUF



Klicken Sie auf das LinkedIn-Symbol, um zu seinem Profil zu gelangen



david.hrabina@vesuvius.com



DAVID HRABINA
International Project Manager

ÜBER DEN AUTOR

Colin Powell ist der internationale Marketingleiter für den Gießerei-Schmelzbetrieb bei Foseco International Limited. Er ist für das Marketing und die Verwaltung aller im Schmelzbereich verwendeten Produkte verantwortlich und arbeitet seit 34 Jahren für Foseco. Sein Lieblingsaspekt seiner Arbeit ist es, Kunden dabei zu helfen, das Beste aus ihren Prozessen herauszuholen. In seiner Freizeit renoviert er gerne sein Haus.

NEHMEN SIE KONTAKT MIT COLIN AUF



Klicken Sie auf das LinkedIn-Symbol, um zu seinem Profil zu gelangen



colin.powell@vesuvius.com



COLIN POWELL
International Marketing Manager
Foundry Melt Shop

CO-AUTOREN



UNEX®



JIŘÍ KOLÁR
Spezialist für
Gießtechnik



DALIBOR ČÁP
Metallurge



MILAN TURTÁK
Leiter der Gießerei-Schmelzerei

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature or transmitted in any form or by any means, including photocopying and recording, without the written permission of the copyright holder.

All statements, information and data contained herein are published as a guide and although believed to be accurate and reliable (having regard to the manufacturer's practical experience) neither the manufacturer, licensor, seller nor publisher represents or warrants, expressly or impliedly:

- (1) their accuracy/reliability
- (2) that the use of the product(s) will not infringe third party rights
- (3) that no further safety measures are required to meet local legislation

The seller is not authorised to make representations nor contract on behalf of the manufacturer/licensor.

All sales by the manufacturer/seller are based on their respective conditions of sale available on request.

*Foseco, the logo, ROTOCLENE and HOLLOTEX are Trade Marks of the Vesuvius Group, unregistered and registered in certain countries, used under licence.

©Foseco International Ltd. 2023

COMMENT

Editorial policy is to highlight the latest Foseco products and technical developments. However, because of their newness, some developments may not be immediately available in your area.

Your local Foseco company or agent will be pleased to advise.

VESUVIUS
A VESUVIUS GROUP COMPANY

