

Maßnahmen zur Verbesserung des oxidischen Reinheitsgrades beim Stranggießen

Measures to improve oxide cleanness in continuous casting

Klaus Wünnenberg und Jürgen Cappel

Der oxidische Reinheitsgrad ist heute eine der wichtigsten Eigenschaften von hochwertigem Stahl. Was ist aber „Clean Steel“ und wie kann man ihn erzeugen? Makroeingüsse führen zu Fehlern im Produkt, Mikroeingüsse sind dagegen meist harmlos. Voraussetzung für verfahrenstechnische Weiterentwicklungen sind reproduzierbare Messmethoden für den Einschlussgehalt. Wegen der Größenverteilung sind nur schwere Proben geeignet, um große Einschlüsse zu finden. Es werden Systeme zur Vermeidung von Reoxidation und Methoden zur Verbesserung der Abscheidung von Einschlüssen in Verteiler und Kokille diskutiert. Dabei spielt die Strömung des Stahls eine besondere Rolle.

Oxide cleanness today is one of the most important items of high-quality steel. But what is "Clean Steel" and how can it be produced? Macro inclusions produce defects in the product, micro inclusions usually are not harmful. A precondition for process technological developments are reproducible methods to measure the inclusion content. Because of the particle size distribution only heavy samples are prone to find large inclusions. Systems to avoid reoxidation and methods to improve separation of inclusions in tundish and mould are discussed. In this context the flow of steel plays an important role.

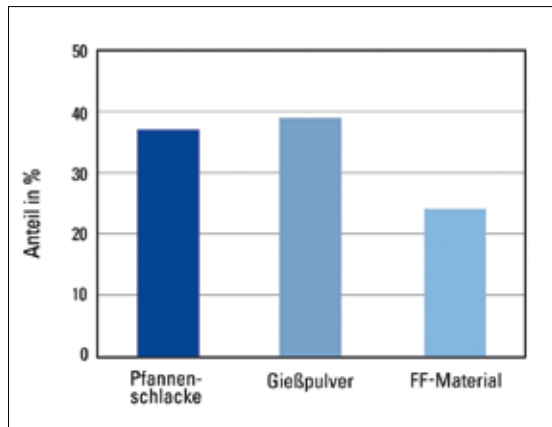
Stähle für höchste Anforderungen an die Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften müssen heute einen ausgezeichneten oxidischen Reinheitsgrad haben. Daher verschärfen die Kunden stetig die Anforderungen zur Verringerung der Einschlussmenge.

Das gilt insbesondere für Karosseriebleche, Rohre für Hydraulikzylinder und Motor- und Motorkomponenten wegen der Anforderungen an die Oberflächenqualität sowie an hochfeste Stähle für Großrohre oder den Offshoreeinsatz zur Verbesserung der Hydrogen-Induced-Cracking (HIC)-Beständigkeit.

Stahlwerke haben weltweit große Anstrengungen unternommen, um die Verfahrenstechnik in der Sekundärmetallurgie und beim Stranggießen zu verbessern. Die Schmelzaggregate wie Konverter und Elektroöfen haben nur einen untergeordneten Einfluss auf den Reinheitsgrad von Stahl. Die Hauptziele sind die Verringerung der Einschlussmenge, die Abscheidung bereits gebildeter Teilchen und die Vermeidung von Reoxidation durch die Atmosphäre, Schlacken und das Feuerfestmaterial.

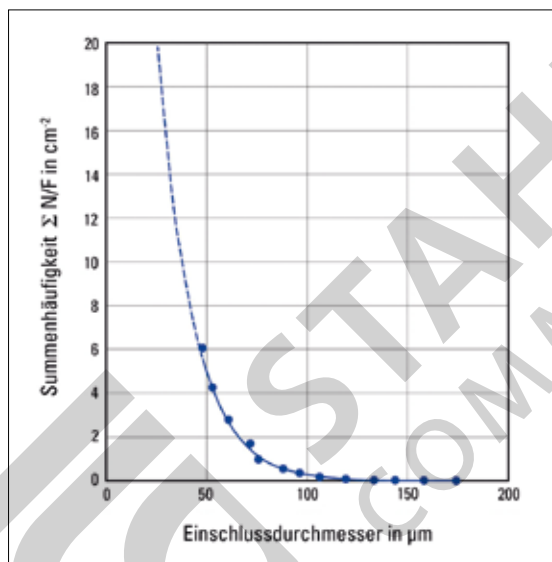


Angießen einer Sequenz beim Stranggießen von Stahl
Start-up phase of continuous casting of steel



1

Herkunft nichtmetallischer Einschlüsse
Source of detrimental inclusions



2

Größenverteilung runder Einschlüsse im Gusszustand
Size distribution of globular inclusions in as-cast condition

Herkunft nichtmetallischer Einschlüsse

Oxidische Einschlüsse werden während des Prozesses bei der Desoxidation, durch Reoxidation und Reaktionen mit Feuerfestmaterial der verschiedenen metallurgischen Gefäße wie Pfanne, Stranggießverteiler und Schutzrohre gebildet. Darüber hinaus kann Gießpulver durch die Strömung am Gießspiegel eingezogen werden. Während des Prozesses werden die meisten „groben“ Partikel abgeschieden, nur wenige verbleiben im

Stahl. Die drei wichtigsten Einschlusstypen können durch ihre chemische Zusammensetzung ihrer Entstehung zugeordnet werden. Tonerde ist entweder ein Desoxidations- oder ein Reoxidationsprodukt, Spinell mit bestimmten Gehalten an Magnesiumoxid entsteht durch Reaktionen von gelöstem Aluminium mit dem Feuerfestmaterial der Gefäßzustellungen, besonders während der Vakuumbehandlung [1]. Typische Bestandteile von Gießpulver sind die Alkalimetalle Natrium und Kalium.

Bild 1 zeigt verschiedene Einschlusstypen in einem mit Aluminium beruhigten Röhrenstahl. Der Stahl enthält etwa je ein Drittel aller Typen. Hieraus folgt, dass die Desoxidationstechnik gute Abscheidungsbedingungen gewährleistet, der Luftabschluss sehr gut kontrolliert wird, um Reoxidation zu vermeiden, und Feuerfestmaterialien mit geringem Verschleiß verwendet werden. Die Strömung in der Kokille sollte das Emulgieren von Gießpulver vermeiden [2].

Was ist „Clean Steel“ ?

Der Gehalt an unerwünschten Begleitelementen im Stahl liegt in der Größenordnung von ppm. Die Summe solcher Verunreinigungen ist auf 100 ppm begrenzt. Diese niedrigen Konzentrationen an Gesamtsauerstoff, Schwefel, Phosphor und Stickstoff sind das Ergebnis der metallurgischen Extraktionsreaktionen in Konverter, Pfannenmetallurgie und Vakuumprozess. Dieses Niveau muss beim Stranggießen erhalten bleiben.

Trotzdem kann Stahlhalbzeug Verunreinigungen enthalten, die örtlich bei empfindlichen Anwendungen kritisch sind. Wenn man über den Reinheitsgrad von Stahl spricht, sind oxidische Einschlüsse im Fokus der Überlegungen. Der größte Teil der Einschlüsse, die während der Stahlbehandlung gebildet werden, können sich in Pfanne, Verteiler und Kokille aus dem flüssigen Stahl abscheiden und werden in der Schlacke gelöst.

Im Stahl verbleibende oxidische Partikel sind sehr klein und haben Durchmesser von wenigen µm. Dieser Mikroreinheitsgrad wird durch den Gesamtsauerstoffgehalt im Stahl bestimmt. Es ist zu vermuten, dass diese Mikroeingeschlüsse selbst bei höchsten Anforderungen an die Stahlprodukte keine negativen Auswirkungen haben. Trotzdem hat auch der Mikroreinheitsgrad eine wichtige Bedeutung, da er die Basis für Makroeingeschlüsse ist, die durch Koagulation und Agglomeration in turbulenten Strömungsbereichen gebildet werden.

Die Ursache für Fehler in Stahlprodukten, die zu Reklamationen führen, sind im Allgemeinen Makroeingeschlüsse. Diese müssen bei der Stahlherstellung vermieden werden. Eine geringe Anzahl

nichtmetallischer Einschlüsse ist ein Kriterium für Clean Steel, aber nicht das einzige. Clean Steel ist auf das Stahlfertigprodukt und seine besondere Anwendung fokussiert [3]. In dieser Hinsicht kann der notwendige Reinheitsgrad sehr unterschiedlich für Karosseriebleche, Wälzlagerstähle, hochfeste Stähle für Offshoreausrüstung und Großrohre oder kalt gezogenen Draht sein. Es muss aber auch berücksichtigt werden, dass diese Anforderungen mit abnehmender Produktdicke stark verschärft werden.

In diesem Zusammenhang spielen Lage und Verformbarkeit eine wichtige Rolle. Das „Inclusion Engineering“ in der Sekundärmetallurgie ist sehr populär, um die Verformbarkeit der Einschlüsse zu kontrollieren. Die Lage der Einschlüsse im Strangquerschnitt kann beispielsweise durch die Geometrie der Stranggießanlage, die Gießgeschwindigkeit und die Strömung in der Kokille beeinflusst werden.

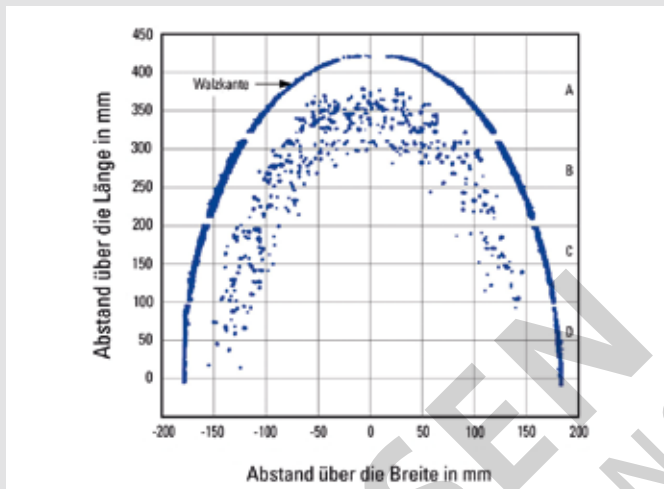
Makro-einschlüsse im Stranggussmaterial sind verantwortlich für Fehler in Fertigprodukten. Im Gegensatz dazu sind Mikro-einschlüsse kleiner als 40 µm normalerweise nicht schädlich. Sie werden in das Gussgefüge integriert und sind nicht der Grund für Risse oder Senken für Wasserstoff. Daher ist der Makroreinheitsgrad von großer Wichtigkeit und der Mikroreinheitsgrad mehr oder weniger zu vernachlässigen. Wäre der Mikroreinheitsgrad für das Produkt schädlich, müssten alle Stahlwerke geschlossen werden.

Makro-einschlüsse im Gussprodukt sind selten. Bild 2 zeigt die Summenhäufigkeit in Abhängigkeit vom Einschlussdurchmesser. Die Anzahl steigt mit abnehmender Größe steil an. „Clean steel is harder to measure than produce“ (Clean Steel ist schwerer zu messen, als zu produzieren) [4].

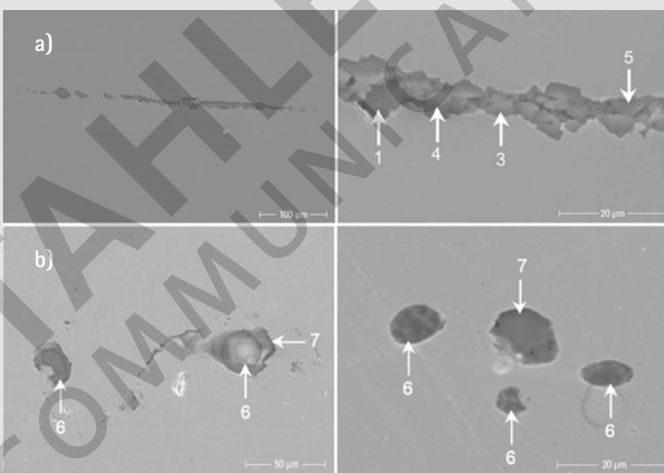
Quantitative Messung des oxidischen Reinheitsgrades

Makro-einschlüsse größer als 50 µm sind schwierig zu finden. Daher ist es notwendig, Inspektionssysteme für große Proben zu entwickeln. Das ist die einzige Möglichkeit, um die „Nadel im Heuhaufen“ zu finden.

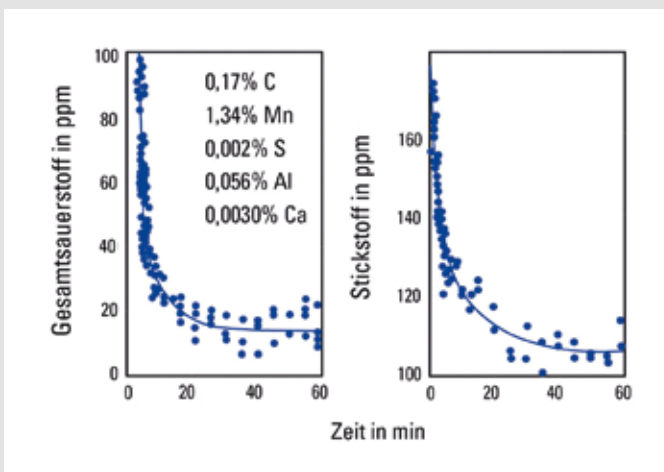
Bei der Mannesmann Inclusion Detection by Analysing Surfboards (Midas) [5] werden große Proben von 130 mm Länge in Gießrichtung entnommen und mit einem Sägeschnitt am Außenradius markiert. In einem Versuchswalzwerk werden sie dann aufrecht zweifach in Querrichtung und fünffach in Richtung des Anlagenradius gestreckt. Durch diese Art der Walzung wird das Einschlussband zusammengedrückt und im oberen Teil des Surfbretts konserviert. Dieser Teil



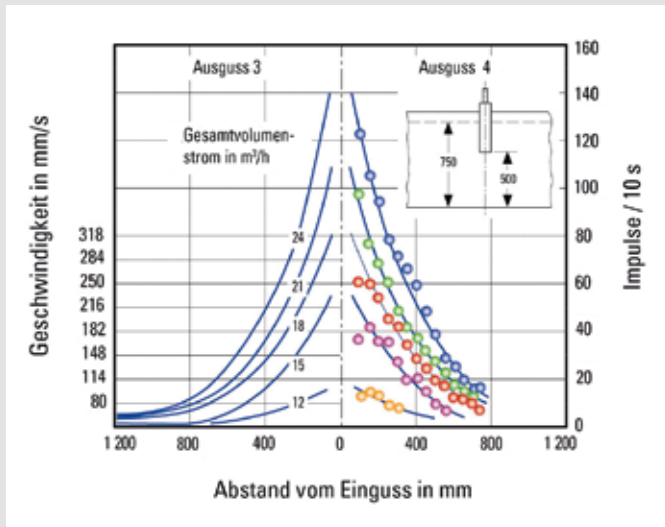
3
Verteilung nichtmetallischer Einschlüsse im Surfbrett (Midas)
Distribution of nonmetallic inclusions in the surfboard (Midas)



4
Grobe Einschlüsse a) aus Calciumaluminat und kleine b) aus Calciumsulfid
Large inclusions a) containing Ca aluminate and small ones b) containing CaS



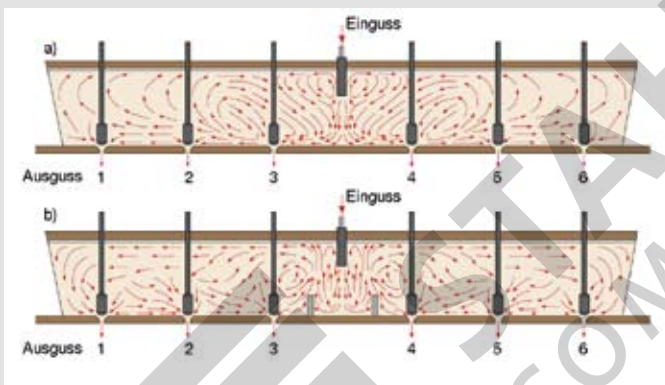
5
Gesamtsauerstoff- und Stickstoffgehalt nach dem Öffnen der Pfanne
Oxygen and nitrogen contents after opening of the ladle



6

Geschwindigkeit und Strömungsverteilung in einem Wassermodell im Maßstab 1:1

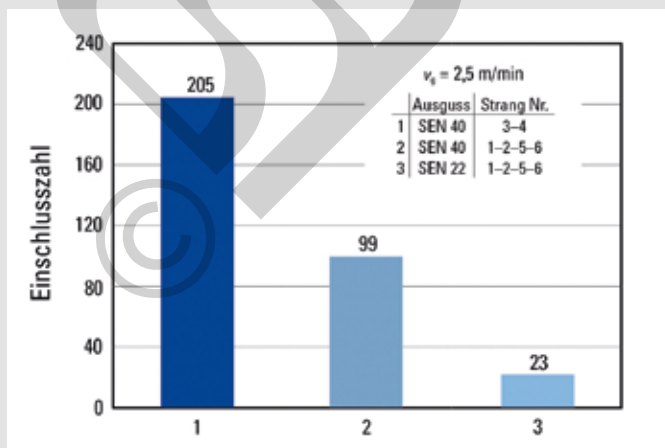
Velocity and distribution of flow in a water model of scale 1 : 1



7

Wassermodell eines Verteilers: a) ohne, b) mit Einbauten

Water model tundish: a) without, b) with furniture



8

Anzahl von Einschlüssen in Innen- und Außensträngen bei unterschiedlichen Tauchausgusstypen

Defects in inner and outer strands using different types of submerged nozzles

der Probe wird mit Ultraschall geprüft und die entdeckten Einschlüsse werden gezählt. Diese quantitative Methode wird für Untersuchungen zur Verbesserung des Reinheitsgrades und zur Kontrolle extrem empfindlicher Stähle eingesetzt. Bild 3 zeigt das Ergebnis der US-Prüfung des oberen Teils eines Surfbretts mit den Abschnitten A-B-C-D.

Wenn nichtmetallische Einschlüsse entweder direkt oder indirekt für schlechtere Herstellungsmöglichkeiten oder Gebrauchseigenschaften oder Qualitätseigenschaften verantwortlich sind, dann ist der Stahl nicht sauber. Wenn aber ein solcher Effekt nicht auftritt, dann kann der Stahl als rein angesehen werden – unabhängig von Anzahl, Typ, Größe oder Verteilung der nichtmetallischen Einschlüsse [6].

Aber weiß der Stahlwerkskunde, was er braucht, um dem Stahlerzeuger zu erklären, was er garantieren soll? Unabhängig davon sind die Systeme zur Qualitätskontrolle nicht für eine vollständige Prüfung geeignet. Stichproben sind nur teilweise repräsentativ. Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass der oxidische Reinheitsgrad nicht allgemein definiert werden kann, sondern auf die speziellen Anwendungen des Stahls ausgerichtet sein muss.

Größe schädlicher Einschlüsse

Wenn Kunden fehlerhafte Produkte zur Reklamation vorlegen, handelt es sich immer um makroskopische Einschlüsse.

Ein interessantes Beispiel für das Verhalten von Einschlüssen zeigt Bild 4. In einem Großrohrstahl X65 wurden grobe Einschlüsse mit mehr als 50 µm (a) im Einschlussband gefunden und kleine Einschlüsse mit weniger als 10 µm (b) waren über einen großen Dickenbereich der Bramme verteilt. Diese Einschlüsse konnten nicht durch die Ultraschallprüfung des Surfbretts erkannt werden [7].

Die groben Einschlüsse entstanden bei der Desoxidation und der Pfannenbehandlung in der Standentgasungsanlage, die kleinen Einschlüsse wurden beim Einspulen von Calciumdraht nach der Vakuumbehandlung gebildet. Die kleinen Einschlüsse aus Calciumaluminat und Calciumsulfid waren nicht in der Lage, sich zur Erstarrungsfront des Innenradius abzuscheiden. Sie wirkten sich nicht ungünstig auf das Produkt aus.

Desoxidation und Maßnahmen zur Vermeidung der Reoxidation

Konverter und Elektrolichtbogenöfen haben nur einen geringen Einfluss auf den oxidischen Reinheitsgrad von Stahlfertigprodukten. Die Zugabe von Aluminium verringert den in weiten Grenzen streuenden Sauerstoffgehalt bei Blasende fast vollständig. Die gebildete Tonerde koaguliert in

der turbulenten Strömung von Abstichstrahl und Bodengas zu groben Partikeln, die in der Pfannenschlacke gelöst werden. Abstichtemperatur, Sauerstoffgehalt im Stahl und Eisengehalt in der Schlacke sollten stabil und reproduzierbar sein.

Der in der Pfanne sorgfältig behandelte Stahl hat einen sehr niedrigen Einschlussgehalt, der während des weiteren Prozesses auf dem niedrigen Niveau gehalten werden sollte. Hierzu werden heute feuerfeste Schutzrohre oder Gießkammern verwendet. Schattenrohre sind mit dem Pfannenausguss verbunden und werden mit Argongas gegen Luftzutritt abgedichtet. Diese Lösung bedingt eine sehr hohe Pfannenöffnungsrate und genug Freiraum für den Manipulator zum Einführen des Rohres. Der kurze Abstand zum Boden des Verteilers erlaubt die frühzeitige Zugabe von Abdeckmasse kurz nach Gießbeginn.

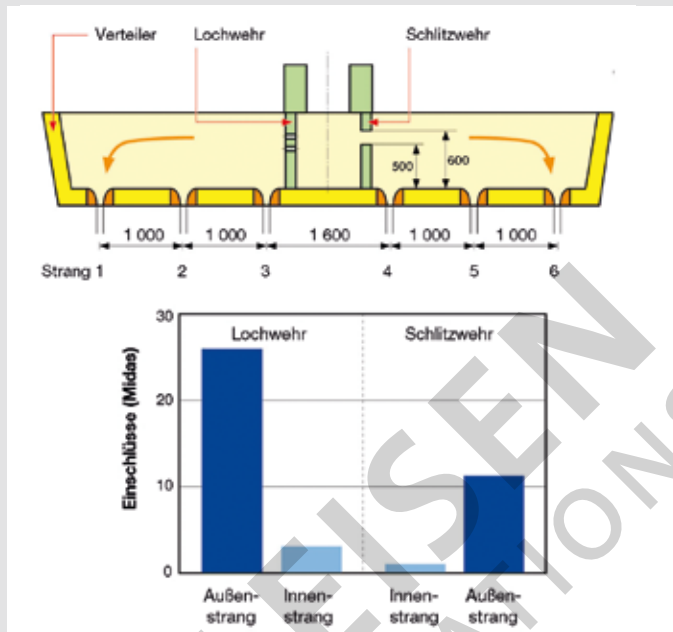
Bild 5 zeigt beispielsweise die Gehalte an Gesamtsauerstoff und Stickstoff im Verteiler mit Gießkammer in Abhängigkeit von der Zeit. Bei Gießbeginn ist der Luftabschlussystem noch nicht geschlossen. Deshalb werden Sauerstoff und Stickstoff aus der Umgebungsluft aufgenommen. Bei der Gießkammer wird der vollständige Schutz vor Reoxidation erst dann erreicht, wenn die Pfanne in die Gießposition abgesenkt ist, der Stahlbadspiegel die Wehre der Gießkammer erreicht hat und Abdeckpulver zugegeben worden ist.

Die niedrigsten Gesamtsauerstoff- und Stickstoffgehalte werden nach etwa 20 bis 30 min Gießzeit erreicht. Dies hängt mit dem Verteilerfüllstand und der Gießgeschwindigkeit zusammen [8]. Die Reoxidation kann durch ein möglichst schnelles Schließen des Gießstrahlschutzes nach Gießbeginn verringert werden. Durch die Anwendung eines automatischen Schlackenerkennungssystems (Amepa) kann die Pfanne fast bis zum vollständigen Leeren in Gießstellung bleiben, so dass die Reoxidation bei einem Minimum bleibt.

Wassermodellversuche zur Verbesserung der Abscheidung

Ein Wassermodell im Maßstab 1:1 wurde für grundsätzliche Untersuchungen der Strömung benutzt, um die Möglichkeiten zur Verbesserung der Abscheidung von Einschlüssen aus dem flüssigen Stahl im Verteiler zu untersuchen. Die Idee war, die Strömung nahe an der Stahlbadoberfläche entlangzuführen und die Verweilzeit zu verlängern.

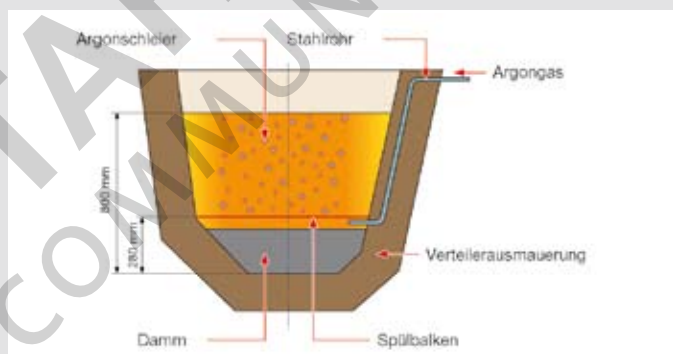
In Bild 6 steigt die Geschwindigkeit des Strahls mit dem Volumenstrom an. Die Strömungsverteilung ist auf beiden Seiten des Verteilers symmetrisch. Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt von der Eingsussstelle in Richtung der Seitenwände



9

Anzahl von Einschlüssen in Außen- und Innensträngen beim Einsatz von Loch- und Schlitzwehren

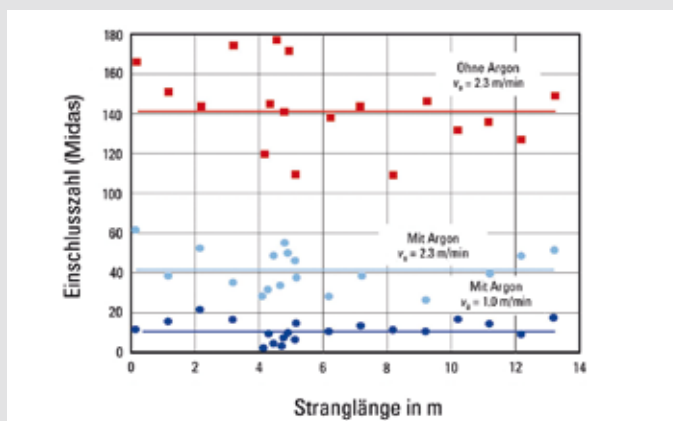
Inclusions in outer and inner strands using baffle or slit weir



10

Verteiler mit Argonspülbalken

Tundish with argon rinsing block



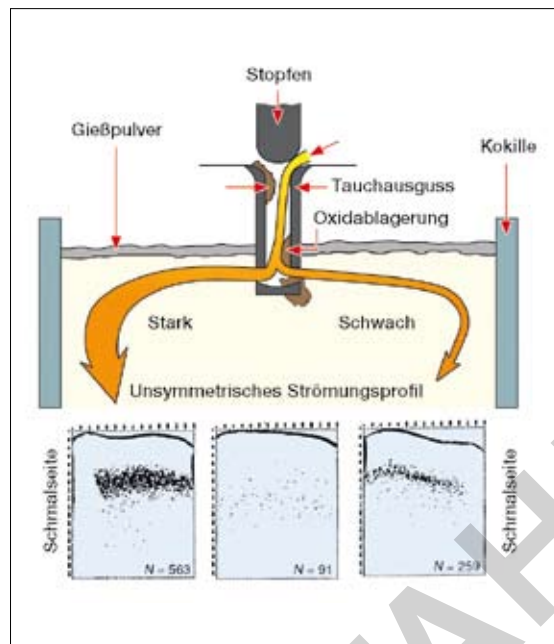
11

Einfluss von Argonspülen und Gießgeschwindigkeit auf die Einschlusszahl

Influence of argon rinsing and casting speed on the number of inclusions

steil ab. Wenn Dämme oder Wehre eingebaut werden sollen, müssen diese nahe am Eingussbereich platziert werden [9].

Bild 7 zeigt ein Beispiel. Im Teilbild a) ohne Einbauten bewegt sich der Stahl entlang des Vertei-



12

Einfluss von Ablagerungen im Tauchausguss auf die Einschlussverteilung im Strang

Influence of depositions in the submerged nozzle on the flow of steel and distribution of inclusions

lerbodens und strömt an der Oberfläche zurück. An den Innensträngen können Kurzschlussströmungen zu verschmutzten Strängen führen, wohingegen die Außenstränge sauberer sein sollten. Im Diagramm b) leiten Dämme die Strömung nach oben, die Strömungsrichtung wird umgekehrt. Die Verweilzeit wird insbesondere für die Innenstränge verlängert.

Ergebnisse von Betriebsversuchen

Mithilfe der Midas-Prüftechnik kann der Einschlussgehalt reproduzierbar gemessen werden. Dabei war von großem Interesse, zu überprüfen, ob der Reinheitsgrad durch die Stahlströmung beeinflusst werden kann. Hierfür wurde der Verteiler mit unterschiedlichen Einbauten ausgerüstet und der Einfluss auf den Reinheitsgrad an Parallelsträngen unter konstanten Bedingungen bewertet [10; 11]. Zunächst wurde als Referenz ein rechteckiger Verteiler ohne Einbauten untersucht.

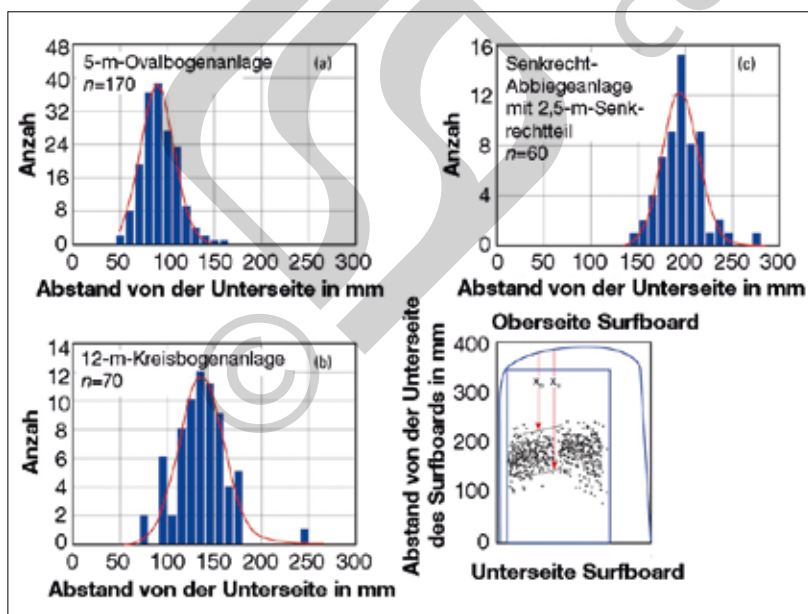
Bild 8 zeigt die Midas-Ergebnisse für die Innenstränge Nr. 3 und 4 und im Vergleich die Außenstränge Nr. 1 und 2 sowie Nr. 5 und 6. Die Tauchausgüsse (SEN) hatten Innendurchmesser von 22 und 40 mm. Wie zu erwarten, sind die Reinheitsgradergebnisse der Außenstränge besser als die der Innenstränge. Wenn man die Anzahl der Einschlüsse auf den Außensträngen vergleicht, zeigen die engeren SEN 22 bessere Ergebnisse als die weiteren SEN 40.

Bild 9 zeigt Ergebnisse von Betriebsversuchen mit einem Loch- oder Schlitzwehr in dem Sechstrangverteiler [12]. Die Strömung des flüssigen Stahls sollte entlang der Badoberfläche zu den Seitenwänden des Verteilers gelenkt werden. Diese Verlängerung der Verweilzeit verbessert die Abscheidung von nichtmetallischen Einschlüssen. Bei einem deutlich niedrigeren Einschlussgehalt zeigen die Innenstränge bessere Ergebnisse als die Außenstränge.

Die Auswertung zahlreicher Proben bestätigt, dass die Anzahl von Einschlüssen beim Einsatz von engen Tauchausgüssen SEN22 um den Faktor 5 verringert wird.

Argonspülen ist eine weit verbreitete Maßnahme zur Verbesserung der Abscheidung von nichtmetallischen Einschlüssen in der Pfanne. Die Möglichkeiten dieser Technologie sollten in der Stranggießanlage geprüft werden. Bild 10 zeigt die Anordnung mit einem Spülbalken auf dem Boden eines Verteilers. Das Zuleitungsrohr für Argon ist durch das Feuerfestmaterial der Seitenwand geschützt und mit dem Spülbalken verbunden.

Vor Strang Nr. 4 entsteht eine Wand aus Argonblasen. Die Ergebnisse in Bild 11 zeigen die gute Reproduzierbarkeit fortlaufender Proben. Die Ver-



13

Einfluss der Anlagengeometrie auf die Lage des Einschlussbandes im Surfboard

Influence of the caster design on the position of the inclusion band in the surfboard

besserung durch das Argonspülen ist offensichtlich und kann durch eine verringerte Gießgeschwindigkeit noch weiter verbessert werden [13].

Strömung in der Kokille

Die Verteilung von Einschlüssen im Strang ist eng mit der Stahlströmung aus dem Tauchausguss verbunden. Ablagerungen am Stopfsitz und an den Austrittskanälen des Tauchrohres rufen eine ungleichmäßige Strömungsverteilung hervor.

Bild 12 zeigt die unsymmetrische Strömung in der Kokille. Dieses wirkt sich in einer ungleichmäßigen Verteilung der Einschlüsse im Strang aus. Im unteren Teilbild werden sehr viel mehr Einschlüsse auf der linken Seite mit hohem als auf der rechten Seite mit niedrigem Volumenstrom gemessen. Große Stahlmengen transportieren sehr viel mehr Einschlüsse zu den Schmalseiten der Bramme als kleine Volumina.

Lage des Einschlussbandes

Für viele Stahlanwendungen sollte das Einschlussband nicht zu nahe an der Strangoberfläche liegen. Beim Walzen dünner Abmessungen für Getränkedosen oder Karosseriebleche können die nichtmetallischen Einschlüsse an die Oberfläche gelangen und Schwierigkeiten bei der Lackierung verursachen.

Die Lage des Einschlussbandes wurde für verschiedene Stranganlagen bestimmt. Surfbrettproben wurden von Kreisbogenanlagen mit Radien von 5 und 12 m und von einer Senkrechtabbiegeanlage mit 2,8 m Senkrechtheil und 9 m Radius genommen. Für die obere und untere Begrenzung des Einschlussbandes wurde der Abstand zur Strangoberfläche gemessen. Die angegebenen Werte müssen durch den Faktor 4,8 geteilt werden, was der Streckung der Proben beim Walzen entspricht.

Bild 13 zeigt die Auswertung für alle Stahlsorten vom Kaltband bis zum Großrohrstahl, für alle Brammenbreiten von 950 bis 2 070 mm und alle Gießgeschwindigkeiten [13]. Diese Einflussgrößen sind für einen Teil der Streuung verantwortlich. Das Einschlussband wird mit zunehmendem Anlagenradius von außen nach innen verschoben.

Fazit

Der oxidische Reinheitsgrad ist eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale von Stahl. Makroskopische Einschlüsse von mehr als 50 µm Durchmesser verursachen Fehler im Fertigprodukt. Sie werden bei Desoxidation, Reoxidation, Reaktionen mit dem Feuerfestmaterial und Emulgierung von Gießpulver gebildet und müssen während der Stahlbehandlung abgeschieden werden.

Makroeingüsse sind selten und schwer zu entdecken. Eine spezielle Walztechnik zur Vorbereitung großer Proben und anschließender Ultraschallprüfung helfen dabei, die „Nadel im Heuhaufen“ zu finden.

Die Reoxidation kann durch zuverlässige Luftabschlussysteme beherrscht werden. Verbleibende Einschlüsse müssen durch geeignete strömungstechnische Maßnahmen im Verteiler abgeschieden werden. Wassermmodellversuche helfen, neue Ideen zu entwickeln, die in Betriebsversuchen geprüft werden können. Argonspülen unterstützt die Abscheidung von Einschlüssen aus dem Stahl im Verteiler.

Die Lage des Einschlussbandes im Strang kann durch den Anlagenradius und die Länge des Senkrechtheils beeinflusst werden.

juergen.cappel@rhi-ag.com

Literatur

- [1] Löscher, W.; Fix, W.: Proc. Internat. Symp. Phys. Chem. Iron Steelmaking, Toronto, Kanada, 1982, IV, S. 20/25K.
- [2] Wünnenberg, K.: Oxide cleanliness – a strong challenge for high quality steel products, Proc. 2008 Internat. Sympos. on Clean Steel, Anshan Iron and Steel Group Corp., The Chinese Society for Metals, 17.-19. Sept. 2008, Anshan, China, S. 10/17.
- [3] State of the art and process technology in clean steelmaking: IISI Study on Clean Steel, IISI Committee on Technology (Tech-co); dort auch weitere umfangreiche Literatur zum oxidischen Reinheitsgrad von Stahl.
- [4] International News – A Letter from Europe: Iron Steelmak. 16 June 1989, S. 5.
- [5] Jacobi, H.; Balthmann, J.; Grönsfeld, J.: stahl u. eisen 108 (1988) Nr. 20, S. 646/58.
- [6] Millman, S.: Clean steel – basic features and operating practices, [in:] IISI Study on Clean Steel, Internat. Iron and Steel Inst., Brüssel, Belgien, 2004, S. 39.
- [7] Cappel, J.; Flender, R.; Höffken, R.; Kemper, G.; Wünnenberg, K.: Centre segregation, soft reduction and oxide cleanliness for large diameter line pipe with highest demands on HIC, Proc. 1st Chinese-German Seminar on Fundamentals of Iron and Steelmaking, Peking, China, 18.-19. Okt. 2004; steel res. int. 76 (2005) Nr. 8, S. 588/94.
- [8] Wünnenberg, K.; Jacobi, H.; Ehrenberg, H.-J.; Glaser, J.; Wiemer, H.-E.: Operational measures to improve oxide purity in round strads, Proc. Conf. on Continuous Casting of Steel in Developing Countries, 14.-18. Sept. 1993, Peking, China, S. 253/60.
- [9] Wünnenberg, K.; Förster, H.: stahl u. eisen 104 (1984) Nr. 13, S. 581/85.
- [10] Jacobi, H.; Ehrenberg, H.-J.; Wünnenberg, K.: stahl u. eisen 118 (1998) Nr. 11, S. 87/95.
- [11] Jacobi, H.; Wünnenberg, K.: Ironmak. Steelmak. 30 (2003) Nr. 2, S. 130/41.
- [12] Jacobi, H.; Nilsson, H.; Ehrenberg, H.-J.; Wünnenberg, K.: Process technological and metallurgical measures to improve the oxide cleanliness of CC strands and their evaluation by the Midas method, Proc. METEC Congress 1994, 2. Europ. Continuous Casting Conf., 20.-22. Juni 1994, Düsseldorf, Vol. 1, S. 46/54.
- [13] Hoh, B.; Jacobi, H.; Wiemer, H.-E.; Wünnenberg, K.: stahl u. eisen 109 (1989) Nr. 2, S. 69/76.