

Erstarrungsdesign beim horizontalen Stranggießen

Riedel, S.; Ricken, H. (1)

Das Stranggießen in Gleitkokillen aus Graphit ist derzeit das dominante Verfahren zur Produktion von Halbzeugen aus Kupferlegierungen.

Diese Werkstoffe werden zu meist auf horizontalen Stranggießanlagen mit häufigen Format- und Legierungswechseln gegossen. Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau einer horizontalen Stranggießanlage.

Den Vorteilen hinsichtlich der Produktionskosten stehen aber auch verfahrensbedingte Nachteile gegenüber. Nach der Erstarrung verringert sich durch die weitere Abkühlung der Querschnitt des Gussstranges. Durch den Einfluss der Schwerkraft liegt der Strang auf der Unterseite der Kokille auf. An der Oberseite bildet sich ein Luftspalt zwischen Strang und Kokille aus. Dieses sogenannte Strangabheben von der Kokille verringert die Wärmeleitung zum Kühler.

Bei Bandformaten ist die Kokille üblicherweise zwischen einer oberen und einer unteren Kühlerplatte geklemmt. Während des Gießbetriebes liegt an der Innenseite der Kokille die Schmelze an. Die Oberfläche der Kokille erreicht in diesem Bereich Temperaturen von bis zu 1000 °C. Die Außenseite der Kokille ist mit dem Kühler verschraubt. Dort werden Temperaturen von maximal 200 °C erreicht.

Damit unterliegt die Kokillenplatte einem Temperaturgradienten von bis zu 800 °C.

Aufgrund der thermischen Längenänderung dehnt sich die Innenseite der Kokille stärker als die Außenseite. Als Folge wölbt sich die Kokillenplatte vom Kühler weg zum Strang hin. Hierdurch bildet sich ein Spalt zwischen der Kokille und dem Kühler. Die Wärmeleitung von der Kokille zum Kühler wird durch diesen Spalt unterbrochen. Durch den Wärmestau erhöht sich die Temperatur an der Außenseite der Kokille. Mit der Temperaturerhöhung dehnt sich auch die Außenseite der Kokille aus und die Wölbung der Platte geht zurück. Die Kokille liegt nun in diesem Bereich wieder am Kühler an, und die aufgestaute Wärme kann an den Kühler abfließen. Die Kokillenaußenseite wird wieder kühler. Dadurch beginnt sich die Kokille erneut zu wölben. Dieser zyklische Vorgang wird als Kokillenatmen bezeichnet.

Durch das Strangabheben wird mehr Wärme an die untere als an die obere Kokillenplatte abgeführt. Dadurch wachsen die Kristalle auf der Unterseite des Stranges schneller in die Schmelze als auf der Oberseite. Die beiden Erstarrungsfronten treffen oberhalb der geometrischen Mitte

aufeinander. Der Ort, an dem die Erstarrungsfronten von der Ober- und Unterseite des Bandes aufeinander treffen wird als thermische Mitte bezeichnet.

Durch das Kokillenatmen ändern sich die Erstarrungsbedingungen zusätzlich über die Länge des Gussbandes. Das so entstandene ungleichmäßige Gefüge beeinträchtigt unter Umständen die Weiterverarbeitbarkeit der Gussbänder.

Zielsetzung

Zur Verbesserung der Produktqualität sollen die Erstarrungsbedingungen über die Länge des Bandes konstant gehalten werden. Für eine gute Weiterverarbeitbarkeit sollen die Erstarrungsfronten von oben und unten möglichst in der Mitte des Gussbandes aufeinander treffen.

Lösungsansatz

Am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der TU München wurde eine Lösung zur Beseitigung des Kokillenatmens entwickelt. Dabei wird eine Flüssigmetallschicht als Wärmeleitmedium zwischen Kokille und Kühler eingebracht. Durch das Flüssigmetall wird die Wärmeleitung von der Schmelze bis zum Kühlwasser auch dann aufrecht erhalten, wenn sich die Kokille verzieht (siehe Bild 3).

Zunächst sollen die Auswirkungen dieser Verfahrensänderung auf den Erstarrungsverlauf untersucht werden. Durch zusätzliche konstruktive Maßnahmen soll die thermische Mitte in die geometrische Mitte verschoben werden.

Eine Möglichkeit, dieses Ziel zu erreichen ist, die Schichtdicke des Flüssigmetalls oben und unten zu variieren. Eine andere Möglichkeit ist, die Kühlflächen oben und unten unterschiedlich zu gestalten.

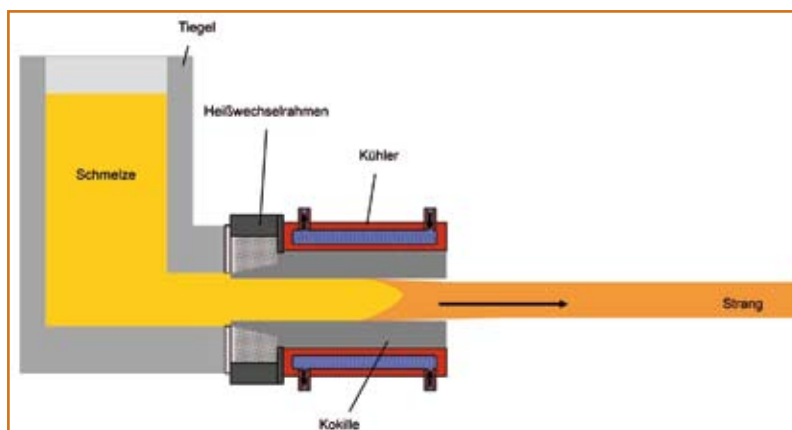


Bild 1: Aufbau einer horizontalen Stranggießanlage

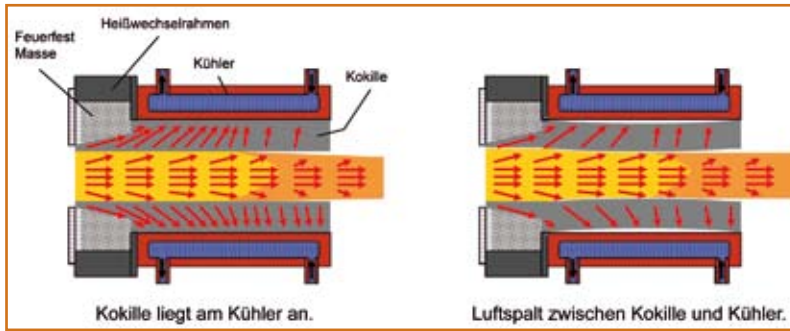


Bild 2: Kokillennatmen

**Versuchsergebnisse:
Gusswerkstoffe**

Zink

Aufgrund seiner geringen Schmelztemperatur von 420 °C wurden die ersten Versuche mit dem neuen Kokillen-Kühler Aufbau mit Zink durchgeführt. Hierbei wurden die grundlegenden Änderungen des Erstarrungsverhaltens bei Verwendung von Flüssigmetall als Wärmeleitmedium zwischen Kokille und Kühler im Vergleich zu einer geklemmten Kokille untersucht.

Die Gießtemperatur betrug 520 °C und die maximal zulässige Bandaustrittstemperatur wurde mit 390 °C auf 30 °C unter Erstarrungstemperatur festgelegt.

Mit einer geklemmten Kokille verläuft die Erstarrungsfront parabelförmig über die Breite des Gussbandes. Dieser Effekt wird dadurch verursacht, dass nachdem die Kokille durch thermischen Verzug in der Bandmitte den Kontakt zum Kühler verloren hat, die Wärme fast nur noch über die Seitenbereiche an den Kühler abgeführt werden kann. Die Wärme aus der Bandmitte muss einen

längeren Weg durch die Kokille bis zum Kühler zurücklegen. Als Folge des höheren Wärmewiderstandes wird weniger Wärme pro Zeiteinheit abgeführt und die Erstarrung erfolgt weiter vom Gießofen entfernt als in den Randbereichen, in denen die Wärme den direkten Weg zum Kühler nehmen kann.

Es zeigte sich, dass die Erstarrungsfront mit der Flüssigmetallschicht deutlich gleichmäßiger über das Gussband verläuft, als bei der Verwendung einer geklemmten Kokille. In den Randbereichen des Bandes erfolgt die Erstarrung aufgrund des Kanteneffektes weiterhin näher am Ofen als in der Bandmitte. In der Mitte des Bandes verläuft die Erstarrungsfront nun jedoch waagrecht über das Band und senkrecht zur Gießrichtung. Hieraus kann geschlossen werden, dass die Wärmeleitung an den Kühler nun über den gesamten Bereich der Kokille konstant ist. Hinzu kommt, dass mit der Flüssigmetallfüllung zwischen Kokille und Kühler die Gießgeschwindigkeit im Vergleich zu einem konventionellen Aufbau bei gleicher Bandaustrittstemperatur auf das 2,14-fache gesteigert werden konnte.

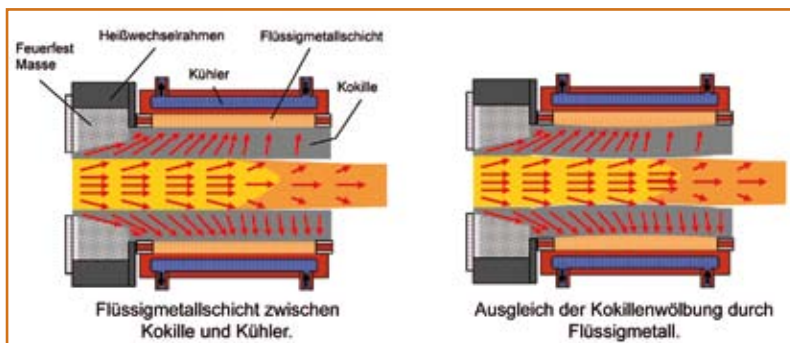


Bild 2: Kokillenaufbau mit Flüssigmetallschicht

Zinnbronze

Mit einer Zinnbronze CuSn6 konnten ähnliche Beobachtungen gemacht werden, wie mit dem Werkstoff Zink. Die Veränderung der Erstarrungsfront ist beim Stranggießen von Zinnbronze jedoch deutlich ausgeprägter als beim Gießen von Zink.

Die Steigerung der Gießgeschwindigkeit stößt bei der Zinnbronze allerdings an Grenzen, da die Legierung bei hohen Gießgeschwindigkeiten während des Durchlaufens des Zweiphasengebietes sehr spannungsempfindlich ist. Durch die Dynamik des Gießprozesses kann es zum Aufreißen des Bandes an der Gussoberfläche kommen.



Bild 4: Gießbetrieb mit Einsatz der Flüssigmetallkühlung

Von besonderem Interesse ist die Veränderung der Gefügestruktur der Bronzebänder im Hinblick auf die Weiterverarbeitung zu Walzbändern. Eine besondere Schwachstelle im Gefüge von Bronzebändern ist die thermische Mitte. Verunreinigungen, die die Erstarrungsfront vor sich herschiebt, sammeln sich in dieser Zone. Für das Walzen eines Bandes ist es daher vorteilhaft, wenn sich die thermische Mitte beim Walzen in einer spannungsarmen Zone befindet. Die am wenigsten belastete Zone beim Walzen ist die geometrische Mitte des Bandes.

Die Problematik der Außermittigkeit der thermischen Mitte beim horizontalen Stranggießen wird in zahlreichen Arbeiten mehrfach beschrieben.

Bei Verwendung des Flüssigmetalls als Wärmeleitmedium zwischen

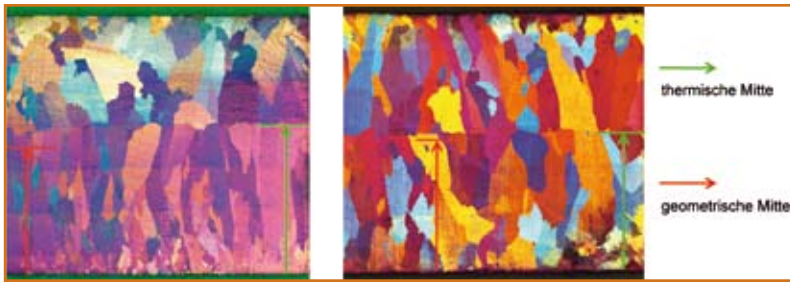


Bild 5: Längsschliffe Bronze, links: geklemmte Kokille, 80 % Gießgeschwindigkeit; rechts: 3 mm Flüssigmetallschicht, 232 % Gießgeschwindigkeit

Kokille und Kühler kann die Außer-mittigkeit ohne weitere konstruktive Maßnahmen deutlich beeinflusst werden. Die Lage der thermischen Mitte ist jedoch immer oberhalb der geometrischen Mitte.

Bild 6 zeigt den Zusammenhang von Gießgeschwindigkeit und der Lage der thermischen Mitte im Gussband. Die thermische Mitte im Gussband nähert sich bei steigender Gießgeschwindigkeit der geometrischen Mitte. Die Steigerung der Gießgeschwindigkeit gegenüber der klassischen geklemmten Kokille wurde durch die bessere Wärmeübertragung mit der Flüssigmetallfüllung zwischen Kokille und Kühler erreicht.

Messing

Zur Validierung des konstruktiven Aufbaus mit Flüssigmetallschicht wurden weiterführende Versuche mit

dem Gusswerkstoff Messing durchgeführt. Als Referenz für die erzeugbare Qualität sowie die Produktivität wurde zunächst ein Versuch mit einem konventionellen geklemmten Aufbau durchgeführt. Die mit diesem Versuch max. erzielbare Gießgeschwindigkeit wird zu 100 % Gießgeschwindigkeit festgelegt.

Auf diesem Versuch aufbauend wurde als nächster Schritt das Verhalten des Gusswerkstoffes mit einem Kokille-Kühler-Aufbau mit Flüssigmetallschicht untersucht. Als signifikanter Unterschied zur Bronze lässt sich mit Messing die Gießgeschwindigkeit durch diesen Aufbau nur auf bis zu 160 % steigern.

Bild 7 zeigt eine Schliffprobe des Bandes in Längsrichtung, das bei 100 % Gießgeschwindigkeit produziert wurde. Deutlich zu erkennen ist die Lage der thermischen Mitte über der geometrischen Mitte.

Versuchsergebnisse: Beeinflussung der Lage der thermischen Mitte

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse soll durch weitergehende Versuche mit konstruktiven Anpassungen die Lage der Erstarrung unabhängig von der Gießgeschwindigkeit beeinflusst werden.

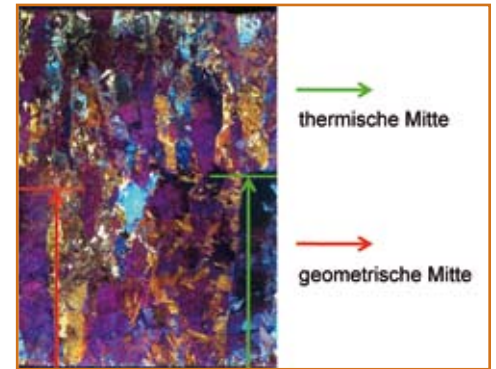


Bild 7: Längsschliff, Messing, 3 mm Flüssigmetallschicht, 100 % Gießgeschwindigkeit

Kokille mit unterschiedlicher Flüssigmetallstärke an Ober- und Unterseite

Um einschätzen zu können, inwieweit ein Erhöhen der Wärmeleitfähigkeit an der Oberseite der Kokille erfolgversprechend ist, wurde im Vorfeld ein Kokillenaufbau mit unterschiedlich starken Flüssigmetallschichten aufgebaut.

Da der Wärmestrom durch ein Material dem Gesetz

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (T_{W1} - T_{W2}) \quad (1)$$

- mit: A = Fläche Probenquerschnitt
- δ = Dicke Probenquerschnitt
- λ = Wärmeleitkoeffizient
- Q̇ = Wärmestrom
- T_{W1} = Temperatur der kälteren Wandoberfläche
- T_{W2} = Temperatur der wärmeren Wandoberfläche

folgt, wurde für den Versuchsaufbau an der Unterseite der Kokille eine 6 mm starke Flüssigmetallschicht, an der Oberseite hingegen eine 3 mm starke Flüssigmetallschicht gewählt. Das Resultat eines solchen Aufbaus

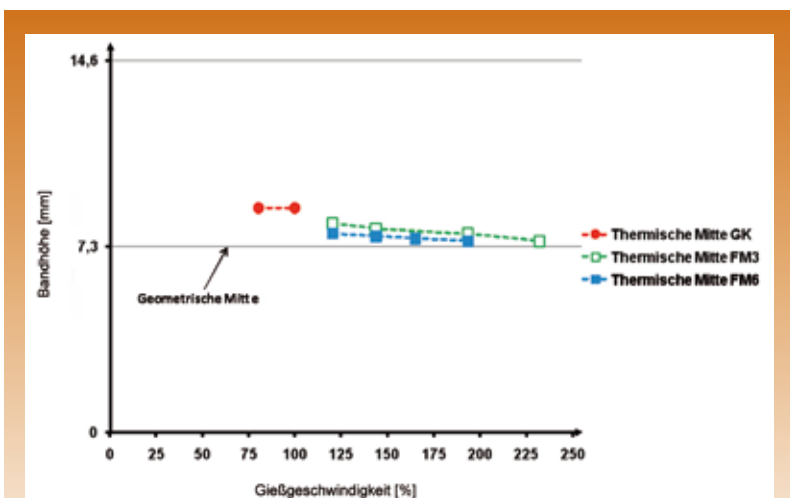


Bild 6: Einfluss der Gießgeschwindigkeit auf die Lage der thermischen Mitte, Werkstoff Bronze

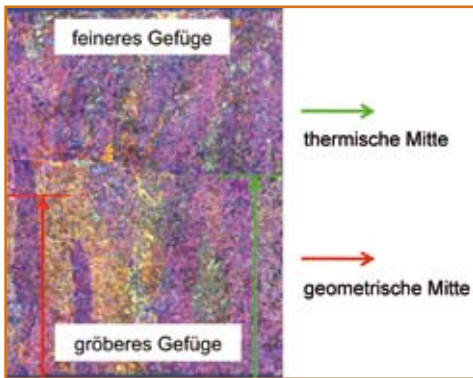


Bild 8: Längsschliff; 116 % Gießgeschwindigkeit, unterschiedliche Flüssigmetallstärke an Ober- und Unterseite der Kokille

ist in Bild 8 zu erkennen. Durch die unterschiedlich dicke Flüssigmetallschicht hat sich die Lage der thermischen Mitte nicht verschoben. Stattdessen wurde ein stark unterschiedliches Gefüge unter- bzw. oberhalb der thermischen Mitte erzeugt. Durch die geringere Kühlung an der Unterseite des Bandes ist das Gefüge hier im Gegensatz zur Oberseite grobkörniger, was auf ein langsames Kornwachstum hindeutet. Insgesamt ist die Qualität des Gefüges damit im Hinblick auf spätere Verarbeitungsstufen schlechter.

Verschiebener Kühler

Ein anderer Lösungsansatz zur Verschiebung der thermischen Mitte ist eine Verschiebung der Kühlzonen in Gießrichtung. Der Grundgedanke für diesen Aufbau ist in Bild 9 dargestellt. Die eingezeichnete durchgehende orangefarbene Linie über den Bandquerschnitt stellt die Form der Erstarrungsfront innerhalb des Bandes beim Erstarren des Metalls in der Kokille dar (Längsschnitt in Gießrichtung).

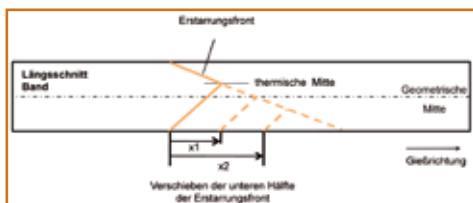


Bild 9: Verschiebung der Erstarrungsfront

Die Linie wird an der thermischen Mitte geteilt. Damit sich die beiden Teillinien in ihrer Verlängerung auf Höhe der geometrischen Mitte schneiden, kann z.B. die Position der unteren Linie weiter nach rechts verschoben werden (z.B. Verschiebung x1). Der untere Kühler müsste also in Gießrichtung vom Ofen weg verschoben werden.

Der Kühler wurde auf der Unterseite der Kokille verkürzt, die Kühlung setzt damit in Gießrichtung später ein. Die Auswirkungen auf das Gefüge sind in Bild 10 zu erkennen.

Die Lage der thermischen Mitte hat sich im Vergleich zu einem konventionellen Aufbau jetzt gravierend verändert. Sie liegt unterhalb der geometrischen Mitte.

Durch das Verschieben des Kühlers an der Unterseite setzt die Erstarrung der Schmelze an der unteren Kokillenplatte später ein. Erst nach Durchlaufen der Verschiebung x entfaltet sich die volle Kühlwirkung an der Unterseite.

Diese Aufbauvariante beeinflusst jedoch auch die Kornstruktur. Die Wachstumsgeschwindigkeit ist deutlich erniedrigt und die entstehende Kornstruktur sehr grobkörnig.

Zusammenfassend lassen sich die mit dem Werkstoff Bronze ermittelten Versuchsergebnisse auch mit dem Werkstoff Messing bestätigen. Durch den Einsatz der Flüssigmetallschicht kann die Produktionsgeschwindigkeit erhöht werden. Mit steigender Gießgeschwindigkeit wird eine Verschiebung der thermischen Mitte in Richtung der geometrischen Mitte beobachtet (siehe Bild 11). Die thermische Mitte kann dabei jedoch nicht unter die geometrische Mitte des Gussbandes verschoben werden.

Dies ist durch das Verschieben der Kühlerplatten möglich. Durch das Verkürzen der unteren Kühlerplatte konnte die thermische Mitte unter die geometrische Mitte verschoben werden. Über den Einfluss der Gießgeschwindigkeit auf die Lage der thermischen Mitte kann mit diesem Aufbau allerdings noch keine Aussage getroffen werden, da hier bisher nur zwei Betriebspunkte untersucht wurden.

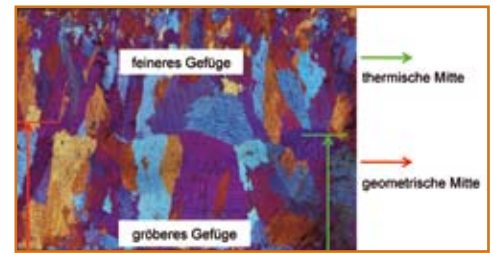


Bild 10: Längsschliff CuZn37, verschobener Kühler, 136 % Gießgeschwindigkeit

Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Flüssigmetallschicht zwischen Kokille und Kühler können die Erstarrungsverhältnisse über die Breite eines Gussbandes und über die Länge des Bandes gleichmäßiger gestaltet werden als mit klassischen zwischen den Kühlern geklemmten Kokillen. Über die Parameter Gießgeschwindigkeit, Lage der Kühlzone und Schichtdicke des Wärmeleitmediums lassen sich die Kornstruktur sowie die Lage der thermischen Mitte gezielt beeinflussen. Durch eine Variation dieser Parameter wird die Möglichkeit eröffnet, für jeden Gusswerkstoff eine optimale Gefügestruktur für die anschließende Weiterverarbeitung einzustellen.

(1) Stefan Riedel, Hartmut Ricken, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg), Technische Universität München

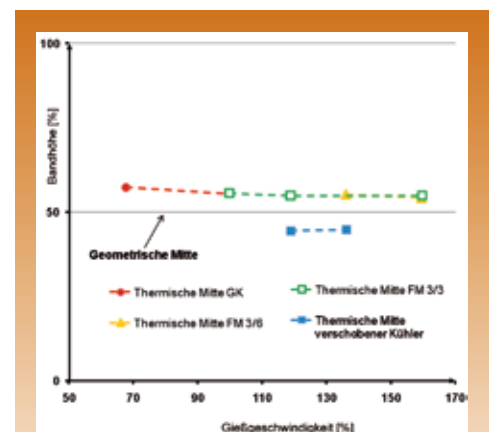


Bild 11: Einfluss der Gießgeschwindigkeit auf die Lage der thermischen Mitte, Werkstoff Messing