

## EINFLUSS DES ELEKTROMAGNETISCHEN RÜHRENS AUF DAS MAKRO UND MIKROGEFÜGE VON IM STRANGGUSS HERGESTELLTEN KNÜPPEL

Received - Priljeno: 2004-11-04  
Accepted - Prihvačeno: 2005-01-30  
Professional Paper - Strukovni rad

Die Anwendung des elektromagnetischen Rührens (EMR) beim Stranggiessen trägt zur besseren Qualität von Knüppeln bei. Einfluss von EMR auf das Erstarrungsgefüge ist beim Stranggiessen von Knüppeln 180 × 180 mm auf der Stranggiessanlage im Stahlwerk von Štore Steel untersucht worden. Durch die Anwendung von EMR wird eine Verbesserung der Oberflächengüte von Knüppeln und des Gefüges unter der Oberfläche und des inneren Gefüges erzielt und zwar durch die Vergrößerung des mittleren globulitischen Bereiches der gegossenen Knüppel und Vorblöcke. Im Beitrag wird der Einfluss vom elektromagnetischen Rühren auf das Makro und Mikrogefüge von gegossenen Knüppeln vorgestellt.

**Schlüsselworte:** Stranggiessen, elektromagnetisches Rühren, Makrogefüge, Mikrogefüge

**The Influence of the Electromagnetic Stirring on Macro and Microstructure of the Continuously Casting Billets.** The use of electromagnetic stirring (EMS) for continuous casting brings metallurgical benefits to cast billets. At the Steelwork Štore Steel we examined the influence of electromagnetic stirring on the solidification structure of cast billets with a size of 180 × 180 mm. EMS was applied to improve the surface and subsurface quality as well as the internal quality of macrostructures of stirred and non-stirred billets is presented.

**Key words:** continuously cast billets, electro-magnetic stirring, macrostructure, microstructure

**Utjecaj elektromagnetskog miješanja na makro i mikrostrukturu kontinuirano lijevanih gredica.** Uporaba elektromagnetskog miješanja (EMR) pri kontinuiranom lijevanju dovodi do poboljšanja kvaliteta lijevanih gredica. Istraživan je utjecaj EMR na strukturu skrućivanja kontinuirano lijevanih gredica 180 × 180 mm u čeličani Štore. Uporabom elektromagnetskog miješanja poboljšan je površinski i podpovršinski kvalitet gredica, unutarinja i vanjska makrostruktura kao i povećanje središnjih globularnih područja izlivenih gredica i poluproizvoda. U radu je prikazan utjecaj elektromagnetskog miješanja na makro i mikrostrukturu izlivenih gredica.

**Ključne riječi:** kontinuirano lijevane gredice, elektromagnetsko miješanje, makrostruktura, mikrostruktura

### EINLEITUNG

Die Erstarrungsmorphologie einer Legierung ist abhängig von den thermischen Bedingungen auf der Erstarrungsgrenze, dass heisst von dem Verhältniss  $G/R$  (Temperaturgradient/Erstarrungsgeschwindigkeit) [1]. Beim Stranggiessen von Stahl ist das Verhältniss  $G/R$  am Anfang der Erstarrung solches, dass Stengelgefüge - Transkristallite gebildet werden. Bei der Erstarrung wird an der Erstarrungsgrenze zwischen der erstarrten Schale und der Schmelze ein feinkörniges breiartiges Gussgefüge gebildet.

Insofern das erstarrte Makrogefüge stengelartig ist, ist das Kornwachstum im Breibereich kohärent mit fester Schicht. Die Mischung wehrt sich der weiteren Bewegung und hindert die Strömung der Schmelze.

Dieser breiartige Bereich beeinflusst die Makroseigerung, während dem die gleichachsige (globulitische) Form der Erstarrung gewöhnlich mit mehr isotropischen Mikroseigerungen verbunden ist. Deswegen ist es nötig, dass es möglichst früh aus der stengelartigen in die gleichachsige Kornmorphologie kommt.

Den Mechanismus der Bildung von gleichachsigen-globulitischen Körner erläutern zwei Theorien:

- heterogene Keimbildung [2] - verschiedenartige Kornkeime, wobei die Keime oxidische Einschlüsse sind;

B. Arh, F. Tehovnik, Institut für Materiale und Technologien, Ljubljana, Slowenien, H. Ploštajner, Steel Štore, Štore, Slowenien

- Multiplikation der Körner [3] - Vermehrung der Körner durch Erschmelzung oder durch Brechen der Kornspitzen durch die Kraft der Strömung der Schmelze auf der Erstarrungsgrenze.

Die konvektive Strömung der Schmelze die als Folge der Temperaturunterschiede im Gussblock auftritt, ist eine Folge der verschiedenen Schmelzendichte. Wenn der konvektive Strom stark genug ist, kann sich ein Teil der breiförmigen Zone wegen der Abschmelzung der Spitzen der schon erstarrten Körner lösen. So werden die gelösten Kornspitzen Keime der gleichachsigen Körner. Der verstärkte Strom der Schmelze vermehrt die Keime durch die Abbrechung der Kornspitzen wodurch zu einer früheren Umwandlung der stengelartigen Erstarrung in die globulitische Erstarrung kommt [4 - 6].

Elektromagnetisches Rühren vergrößert die Strömung der Schmelze und hilft zur Abschaffung der verbliebenen Überwärmung in der Breizone bzw. an der Erstarrungsgrenze und beeinflusst dadurch die Verkleinerung des Verhältnisses  $G/R$ , was die frühzeitige Änderung der stengelartigen in die gleichachsige Erstarrung bewirkt. Faktoren die das Gussgefüge und die Eigenschaften der gegossenen Knüppel im allgemeinen beeinflussen sind Giesstemperatur, Giessgeschwindigkeit, Querschnitt des Stranges, Stahlzusammensetzung [7 - 10]. Aus den Bildern 1. und 2. ist der Einfluss des

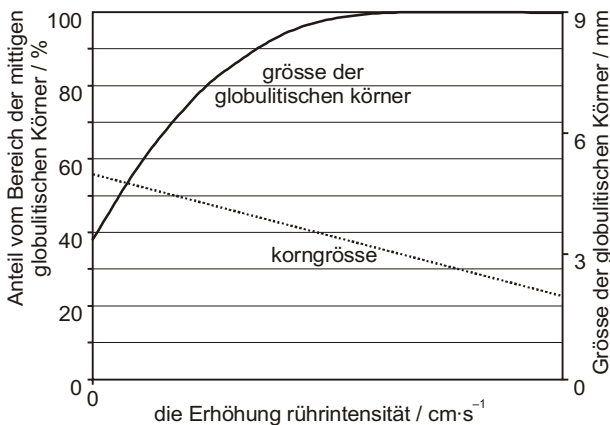


Bild 1. Anteil des mittleren globulitischen Bereiches und die Grösse der gleichachsigen Körner hinsichtlich der Rührleistung [6]

Slika 1. Udio srednjišnjeg globularnog područja i veličina jednakoosnih zrna s obzirom na stupanj miješanja [6]

Elektromagnetischen Rührens auf den Anteil des globulitischen bzw. mittleren Bereiches der feinkörnigen Erstarrung über den Strangquerschnitt ersichtlich.

Zweck dieser Untersuchung war die Einwirkung des elektromagnetischen Rührens (EMR) zwischen der regulären Produktion auf das Makro und Mikrogefüge der Stranggegossenen Knüppel und das Mikrogefüge der gewalzten Halbprodukte festzustellen.

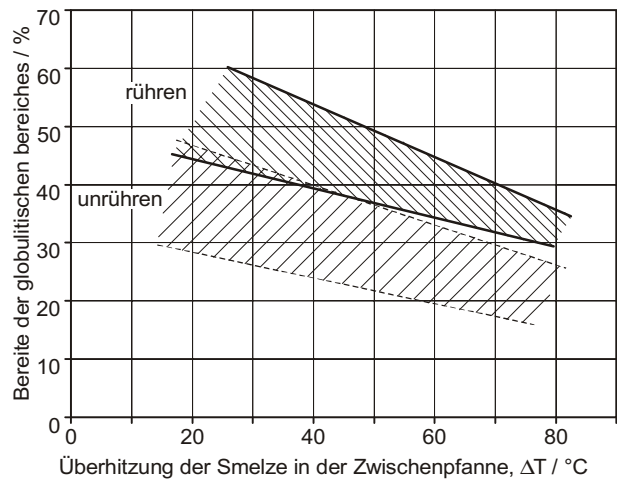


Bild 2. Anteil des mittleren globulitischen Bereiches ohne und mit EMR bei verschiedenen Überhitzungstemperaturen der Schmelze [7]

Slika 2. Udio srednjišnjeg globularnog područja bez i s elektromagnetnim miješanjem kod različitih temperatura pregrijavanja taline [7]

### EXPERIMENTELLE ARBEIT

Der Einfluss des elektromagnetischen Rührens ist beim Giessen der Knüppel 180 × 180 mm im Querschnitt auf einer dreisträngigen Bogengiessanlage im Stahlwerk der Firma Steel Štore in Štore untersucht worden. Die Giessparameter der hergestellten Schmelzen werden in den Tabellen 1. gezeigt. Der Giessprozess wird zur Vermeidung

Tabelle 1. Giesstemperatur, Liquidustemperatur von Stahl, Überhitzungstemperatur und Giessgeschwindigkeit

Tablica 1. Vrijednosti temperature lijevanja, likvidus temperature čelika, temperature pregrijavanja i brzina lijevanja

Stahl	T. giess. / °C	T. liquid. / °C	T. uberhit. / °C	H. giess. / m·min <sup>-1</sup>
16MnCr5	1545	1511	34	1,5
ST52 - 3/1	1540	1507	33	1,6
ST52 - 3/2	1553	1510	43	1,5
31CrV4	1545	1498	47	1,4
CK45	1533	1492	41	1,5
50CrV4	1527	1486	41	1,5
CK60	1523	1483	40	1,4

jedweder Reoxidation unter vollkommener Ausschaltung von Luftzutritt durchgeführt, durch Anwendung eines sogenannten Schattenrohres zwischen Pfanne und Tundish und eines Tauchrohres zwischen Tundish und Kokille. Elektromagnetische Rotationsrührer sind dicht unter der Kokille der Strangiessanlage angeordnet und verursachen ein Drehen der Schmelze um der vertikalen Achse des Stranges. Induktive elektromagnetische Rührer sind vier-

polig, zweiphasig und wirken durch übliche Netzfrequenz. Untersuchungen sind an Knüppelquerschnitten durchgeführt worden.

## ERGEBNISSE UND DISKUSSION

### Makrogefüge der gegossenen Knüppel

Vergleich des Makrogefüges an Knüppelquerschnitten gegossen mit und ohne Anwendung von elektromagnetischen Rühren zeigt, dass es sich beim Einsatz des Rührers der Umfang der mittleren globulitischen Zone vergrößert, und demgegenüber wird der Bereich der transkristallinen Zone enger. Bei den gerührten Knüppeln ist am Knüppelquerschnitt am Rand ein etwa 10 mm breiter heller Streifen negativer Seigerungen zu sehen. Am Bild 3. sind Abbildungen des Makrogefüges an Beizscheiben der gerührten und ungerührten Knüppel für den Stahl St52-3/1 gegossen bei einer Überhitzungstemperatur von 43 °C zu sehen. Am Bild des ungerührten Knüppels wird ein breiter Bereich der transkristallinen Körner gezeigt, dass fast bis zu der Mitte des Knüppels reicht und ein Makrolunker in der Mitte des Knüppels. Bei dem gerührten Knüppel ist eine sanfte Ver-

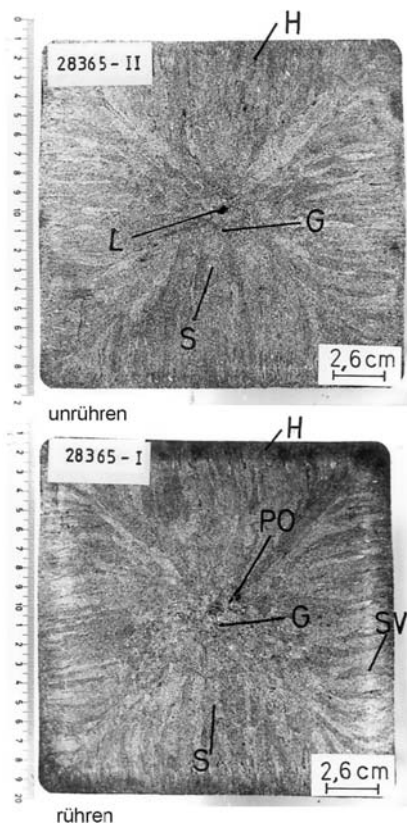


Bild 3. Makrogefüge des Knüppelquerschnittes einer gerührten und ungerührten Stahlschmelze St52-3, gegossen mit einer Überhitzungstemperatur von 43 °C. S - Transkristalliten, PO - poröse Mitte, G - feinkörnige Globuliten, L - Lunker, H - schnellerstarteter Randbereich, R - Riss, SV - heller Streifen

Slika 3. Makrosuktura poprečnog presjeka čelične gredice miješane i nemiješane taline čelika St 52-3 lijevane s temperaturom pregrijavanja od 43 °C. S - stubičasti kristali, PO - porozna sredina, G - finoznati globuliti, L - lunker, H - brzo očvrstnuto rubno područje, R - pukotina, SV - svijetlo područje

größerung der mittleren globulitischen Körner zu beobachten. Globulitische Körner in der Mitte des Knüppels sind grob und deren Bereich ist kleiner als bei der Vergleichsschmelze derselben Stahlorte, wohl aber mit 10 °C niedriger Überehitzungstemperatur gegossen. Hinter dem schnell erstartem Rand ist ein heller Streifen ersichtlich. Bild 4. zeigt im Baumanabdruck einen Querschnitt eines stranggegossenen Knüppels der Stahlmarke 16MnCr5 mit 0,024% S. Aus dem Abdruck des nichtgerührten Knüppels ist ersichtlich, dass dem schnellerstarteten Randbereich gerichtete transkristalle folgen. Im mittleren Bereich des Knüppels geht das gerichtete Wachstum ins nichtgerichtete transkristalle über. Bereich der feinkörnigen Globuliten in der Mitte des Knüppels ist klein. Makrolunker ist in Hinblick auf die geometrische

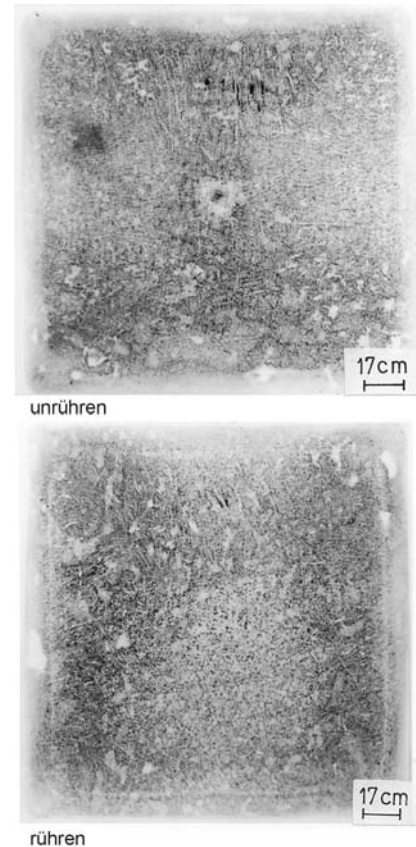


Bild 4. Baumanabdruck des Knüppelquerschnittes einer ungerührten und gerührten Stahlschmelze 16MnCr5

Slika 4. Baumanov otisak poprečnog presjeka gredice nemiješane i miješane taline 16MnCr5 čelika

Mitte nach oben verschoben. Beim gerührten Knüppel verläuft das Wachstum der transkristallinen Körner hinter der gemischten Stelle (heller Streifen um den Querschnitt des Knüppels) weiter. Jedoch ist ein breiter Streifen der globulitischen Körner bemerkbar, das aber an die untere Seite des Knüppels verrückt ist, das bedeutet an den äusseren Radius des Strangbogens. Aus dem Rand des oberen Teils des Knüppels, das heisst von dem inneren Radius des Stranges wachsen Transkristalliten tief in die Mitte des Knüppels. Makrolunker ist nicht zu sehen. Bereich des gerichteten und nichtgerichteten Wachstums der Transkristalliten ist enger. Im unteren Teil des Knüppels geht das gerichtete Transkristallitenwachstum bald in feinkörnige Globuliten über.

Im Abdruck des gerührten Knüppelquerschnittes ist zu sehen, dass hinter dem helleren Streifen die Transkristal-



liten hinsichtlich der Knüppelseitenflächen zur Mitte unter einem kleinen Winkel hineinwachsen. Die Ursache liegt im Rühren der Schmelze und deren Bewegung in Richtung des Uhrzeigers.

In der Tabelle 2. ist der Anteil der feinkörnigen Globuliten in Prozent der Querschnittsoberfläche der gerührten und ungerührten Knüppeln gegeben. Der grösste Anteil der mittigen globulitischen Körner ist bei den gerührten

Tabelle 2. Anteil des mittigen globulitischen Bereiches und deren Assimetrie

Tablica 2. Udio središnjih globularnih područja i njihova asimetrija

Stahl		Globulit. bereich. / %	$h_1 / h_2$
16MnCr5	gerührten	38	0,30
	ungerührten	14	-
ST52 - 3/1	gerührten	35	0,33
	ungerührten	14	-
ST52 - 3/2	gerührten	26	0,28
	ungerührten	11	-
31CrV4	gerührten	37	0,38
	ungerührten	12	-
CK45	gerührten	31	0,5
	ungerührten	15	-
50CrV4	gerührten	32	0,33
	ungerührten	14	-
CK60	gerührten	24	0,46
	ungerührten	12	-

Knüppeln beim Giesen der Stahlmarke 16MnCr5 erreicht worden. Dieser folgen mit etwas kleinerem Anteil der globulitischen Körner die gerührten Knüppel der Stahlmarken 31CrV3 und ST52-3/1. Die Knüppel der Stahlmarke ST52-3/2 die mit 10 °C höherer Giesstemperatur gegossen worden sind, weisen einen kleineren Anteil der mittigen Globuliten auf. Ein kleinerer Globulitenbereich ist merkbar auch bei Schmelzern mit höherem Kohlenstoffgehalt, dass ist bei den Knüppeln der Stahlmarken CK45 und 50CrV4. Der kleinste Teil der mit-tigen Globuliten ist bei den gerührten Knüppeln der Stahl-marke CK60 erhalten worden.

An Querschnitten der gerührten Knüppel ist zu sehen, dass das Gebiet der mittigen globulitischen Körner in Hinsicht der geometrischen Mitte des Knüppels auf eine Seite verrückt ist, dass ist auf die untere Seite des Knüppelquerschnittes in Richtung des äusseren Bogenhalbmessers der Stranggiessanlage. Der Anteil der mittigen globulitischen Körner das über der geometrischen Mitte des Knüppels ragt ist im oberen Teil des Knüppels sehr klein. Der asymmetrische Koeffizient ( $h_1/h_2$ ) gibt an wie gross die Verbreitung des Bereiches der feinkörnigen Globuliten um der geometrischen Mitte ist Tabelle 2.

An Knüppelquerschnittsätzenproben kann 10 bis 15 mm vom Rand ein heller Streifen beobachtet werden. Diese Streifen entstehen als Folge des Rührens, da wo EMR angeordnet ist. Dass sind Streifen negativer Seigerungen von löslichen Elementen im Stahl. Wegen der negativen Seigerung von Kohlenstoff kommt an diesen Stellen zur Verkleinerung der Härte.

### Mikrogefüge der gegossenen Knüppel

Bei den Untersuchungen des Mikrogefüges haben wir ähnliche Unterschiede im Gefüge wie beim Makrogefüge beobachtet. Bereich der Transkristalliten ist bei gerührten Knüppeln enger, und die Körner sind kleiner. So auch sind die feinglobuliten an diesen Proben kleiner. Poröse Bereiche sind verhältnismässig klein und grössere Lunker sind nicht zu sehen. In der Mitte sind mehrere nichtmetallische Einschlüsse vorhanden. Reien eutektischer sulfidischer Einschlüsse sind bei gerührten Proben kleiner.

Die Transkristalliten sind an der oberen Hälfte des Knüppelquerschnittes länger. Bereich der transkristallinen Körner und die Breite der Körner sind bei gerührten Knüppeln kleiner. Vergleich der Körner vom oberen Teil gegen den unteren Teil des gerührten Knüppels zeigt, dass die transkristallinen Körner am oberen Teil des Knüppels breiter sind. Daraus kann geschlossen werden, dass die Kühl-

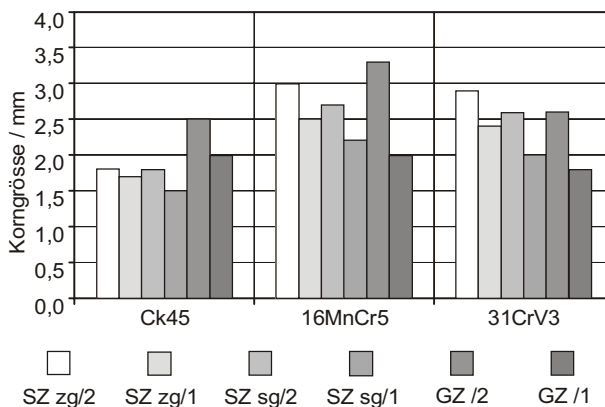


Bild 5. Breite der transkristallitischen Körner in oberer und unterer Hälfte des Knüppelquerschnittes und Durchmesser der mittleren gleichachsigen Körner im ungerührten und gerührten Knüppel.

SZ zg- durchschnittliche Breite der Stengelkristalle in oberer (r) Hälfte des Knüppels, SZ-sp- durchschnittliche Breite der Stengelkristalle in unterer (R) Hälfte des Knüppels, GZ- durchschnittlicher Durchmesser der mittigen gleichachsigen Körner /1,2- 1- mit EMR, 2- ohne EMR

Slika 5. Širina transkristalnih zrna u gornjoj i donjoj polovici poprečnog presjeka gredice i promjer središnjih jednakoosnih zrna u nemiješanoj i miješanoj gredici.

SZ zg - presječna širina stubičastih kristala u gornjoj polovici gredici, SZ sp - presječna širina stubičastih kristala u donjoj polovici gredice, GZ - presječni promjer središnjih jednakoosnih zrna, 1 - s elektromagnetskim miješanjem, 2 - bez elektromagnetskog miješanja

geschwindigkeit über den Querschnitt auf unterer und oberer Hälfte nicht gleich war. Die Grösse der Feinglobuliten ist im mittleren globulitischen Bereich des Knüppels bei dem gerührten Knüppel kleiner. Im Bereich des helleren Streifens haben wir beim gerührten Knüppel im Mikrogefüge keine Besonderheiten beobachtet. Aus dem Bild 5. kann die Breite der transkristallinen Körner und der Durchmesser der gleichachsigen Körner im mittleren globulitischen Bereich für Knüppel der Stahlmarken CK45, 16MnCr5 und 31CrV3 entnommen werden. Im Knüppel der Stahlmarke 31CrV4 ist dicht unter der Oberfläche des Knüppels ein Bereich feiner Globuliten die im Bereich des helleren Streifens in gröbere Globuliten übergehen. Von da weiter wachsen gerichtete Transkristalliten. Bei Knüppeln der Stahlmarken 16MnCr5 und CK45 ist unter der Oberfläche ein enger Bereich globulitischer Körner. Diesem Bereich folgen feine Transkristalliten, die auch im Bereich des helleren Streifens sind. Von diesem helleren Streifen gegen die Mitte wachsen breitere gerichtete Transkristalliten. Bei den nichtgerührten Knüppeln ist zu sehen, dass die Transkristalliten im ersten Teil seines Bereiches enger sind als im zweiten Teil. Wahrscheinlich liegt der Grund in schnellerer Abkühlung am Anfang des Wachstums.

Im Bild 6. wird auf den Abbildungen das Mikrogefüge im Bereich des Lunkers (L) und der geometrischen Mitte (S) am Querschnitt des nichtgerührten und gerührten Knüppels der Stahlmarke 16MnCr5 gezeigt. Globulitische

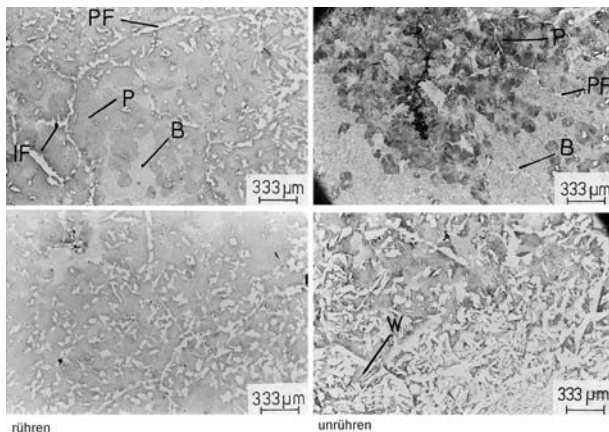


Bild 6. Mikrogefüge des mittleren Bereiches des gerührten und ungerührten Knüppels der Stahlmarke 16MnCr5-30×  
 PF- polygonaler Ferrit, IF- Nadelferrit, P- Perlit, B- Bainit, W- Widmanstätten Mikrogefüge  
 Slika 6. Mikrostruktura srednjih područja miješanih i nemiješanih gredica 16MnCr5 čelika, povećanje 30 ×, PF - poligonalni ferit, IF - igličasti ferit, P - perlit, B - bainit, W - Widmanstátska mikrostruktura

Körner sind im mittleren Bereich des Knüppels größer bei dem gerührten Knüppel. Ferrit ist in den nichtgerührten Knüppeln an den Korngrenzen ausgeschieden (polygonaler Ferrit) und als Körner (nadelförmiger Ferrit) mehr grober

Form. Besonders viel Ferrit gibt es in der Mitte des nichtgerührten Knüppels. So auch gibt es im nichtgerührten Knüppel neben dem Lunker wegen grösserer Seigerungen der Elemente mehr Bainit als im gerührten Knüppel.

### Mikrogefüge der gewalzten Knüppel

Untersuchungen des Mikrogefüges am Walzgut sind an Proben der gerührten und ungerührten Schmelzen der Stahlmarken ST52-3, CK45, CK60 und 16MnCr5 durchgeführt worden. Runde Profile ( $d = 75 \text{ mm}$ ) sind aus Stählen der Marken ST52-3, CK45 und CK60 aus ungerührten und gerührten Knüppeln mit einem Vervormungsgrad von 7,3 gewalzt worden. Quadratische Profile ( $80 \times 80 \text{ mm}$ ) sind aus 16MnCr Stahl mit einem Vervormungsgrad von 5,1 gewalzt worden. Untersuchungen des Mikrogefüges sind im Bereich der Oberfläche und in der Mitte von Walzgut gemacht worden.

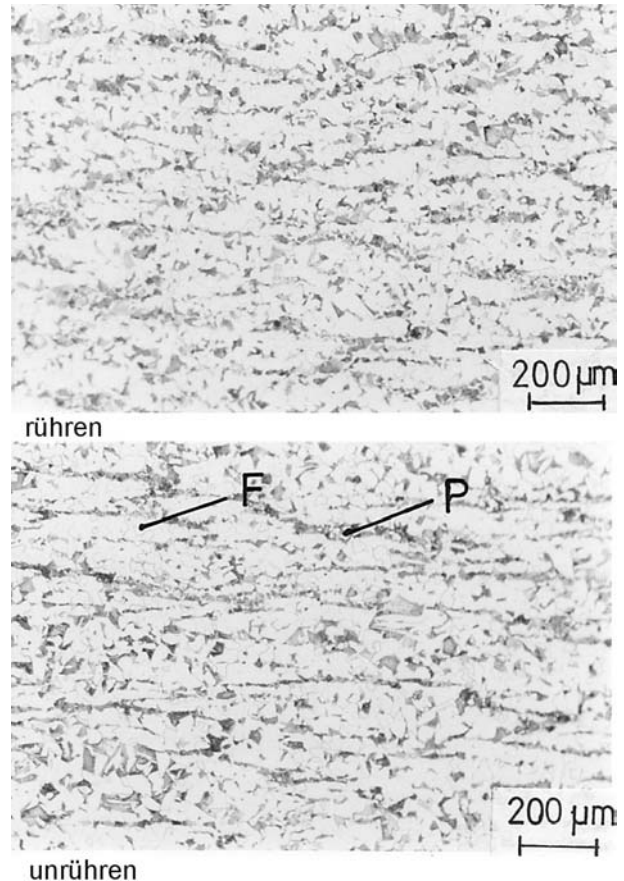
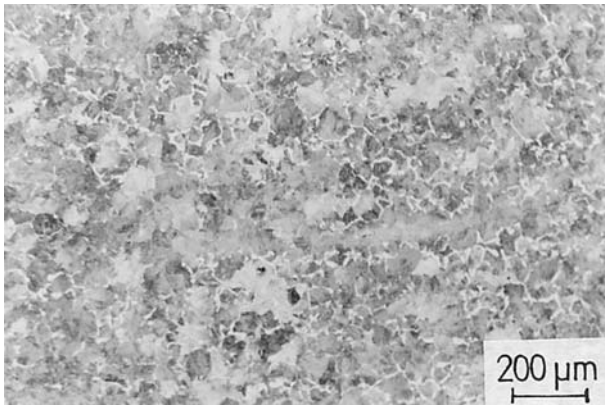


Bild 7. Ferritisch-perlitisches Mikrogefüge in der Mitte des gewalzten Knüppels aus dem gerührten und ungerührten Knüppel der Stahlmarke ST52-3

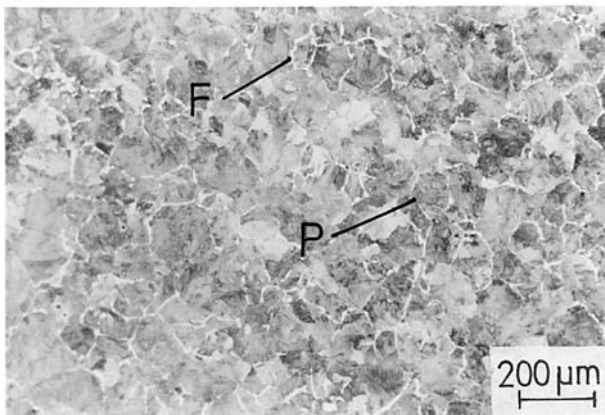
Slika 7. Ferritno-perlitna mikrostruktura u sredini valjanih gredica iz miješanih i nemiješanih gredica St52-3 čelika

Kleinere gestreckte Körner und feineres globulitisches Korn im Stahl ST52-3 haben in Knüppeln gegossen mit

Hilfe von EMR weniger ausgeprägte Streifigkeit zur Folge, die sonst für diese Stahlsorte charakteristisch ist. Vor allem ist es wichtig, dass die Ferrit und Perlitstreifen enger und kürzer sind. Mikrostrukturelle Eigenheiten in der Mitte des Walzgutes sind für den Stahl ST52-3 aus dem Bild 7. ersichtlich. Bei mittel und hochgekohten Stählen ist der Einfluss der Rührwirkung in kleinerer Korngrosse in der Mitte des Walzgutes erkennbar -Bild 8.



rühren



unrühren

Bild 8. Ferritisch-perlitisches Mikrogefüge in der Mitte des gewalzten Knüppels aus dem gerührten und ungerührten Knüppel der Stahlmarke CK60

Slika 8. Feritno - perlitna mikrostruktura u sredini valjanih gredica iz miješanih i nemiješanih gredica CK60 čelika

## ZUSAMMENFASSUNG

Elektromagnetisches Rühren der Schmelze beim Stranggiessen von Stahl hat einen günstigen Einfluss auf die Homogenität der Erstarrung. Vergleich der Makrostruktur an Knüppelquerschnitten zeigt, dass es sich mit dem Rühren

der Bereich der mittleren globulitischen Körner vergrössert, Bereich der gestreckten transkristallinen Körner wird aber enger. Am breiteren mittleren Bereich ist eine schwache Porosität zu beobachten, in der Mitte des Knüppels ist kein ausdrücklicher Lunker mehr zu sehen.

Die Grösse des feinkörnigen Bereiches ist von der Überhitzungstemperatur und der Stahlzusammensetzung abhängig. Höhere Überhitzungstemperatur der Schmelze hat einen kleineren mittleren globulitischen Bereich zur Folge. Die grösste Vergrösserung des mittleren globulitischen Bereiches ist beim mittelgekohten Stahl erzielt worden, kleinere bei niedrig kohlehaltigen Stählen und die kleinste bei hochkohlehaltigen Stählen. Wegen des Einflusses des Bogens der Stranggiessanlage kommt zur Verstellung des Mittleren globulitischen Bereiches auf die untere Seite des Knüppels bzw. auf die Seite des äusseren Radius der Stranggiessanlage. Der Anteil der globulitischen Körner im oberen Teil des Knüppels, über der geometrischen Mitte iast klein.

Bei gerührten Knüppeln tritt 10 bis 15 mm vom Knüppelrand ein hellerer Streifen auf. Dieser hellere Streifen am Querschnitt des gerührten Knüppels entsteht wegen der Rührwirkung, da wo der Rührer an den Strang angekoppelt ist. Da kommt es zu negativen Seigerungen der löslichen Elemente im Stahl als Folge des Rührens der Schmelze.

## LITERATUR

- [1] M. C. Flemings: Solidification Processing, Metallurgical transaction, 5 (1974), 2121-2134.
- [2] T. Ohashi, et. al.: Effect of oxides on nucleation behavior in supercooled iron, Transactions ISIJ 17 (1977), 262 - 270.
- [3] S. O'Hara, W. A. Tiller: On the Mechanisms of crystal multiplication during solidification in the presence of fluid motion, TMS of AIME, 329 (1967), 497-501.
- [4] A. A. Tzavaras: Solidification control by electromagnetic stirring state of the art., Continuous Casting, (1984), 47 - 67.
- [5] J. J. Moore, N. A. Shah: A review of the effects of electromagnetic stirring (EMS) in C.C. steels, Continuous Casting, 3 (1984), 35 - 45.
- [6] M. Dupke: Electromagnetic rühren beim stranggiessen, Metallurgie des stranggiessens – Giesen und erstarren von stahl, Stahl Eisen, Düsseldorf, 1992, 449 - 531.
- [7] B. Arh: Influence of electro-magnetic stirring on the solidification structure of continuously cast billets, M. Sc. Thessys University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Ljubljana, 1996.
- [8] B. Kosec, F. Kavička, V. Gontarev, B. Arh, F. Tehovnik, J. Štetina, B. Velička: Continnuous casting of steel billets: Study of the casting and cooling conditions, RMZ – Materiali in Geokolje, 47 (2000) 3-4, 377 - 383.
- [9] L. Beitelman, et. al.: Influence of electromagnetic stirring on quality of continuously cast billets, Proceedings of the 2 nd Process Technology Conference, 1981, pub. By AIME, 1981, 270 - 277.
- [10] M. R. Bridge, G. D. Rogers: Structural effects and band segregate formation during the electromagnetic stirring of strand-cast steel, Metallurgical transactions B, 153 (1984), 561 - 589.