

УДК 669.18-412:621746.6

В.Е. УХИН (канд.техн.наук)

Донецкий национальный технический университет, Донецк

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ СОРТОВОЙ ЗАГОТОВКИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ МНЛЗ

Представлены результаты физического моделирования процесса затвердевания непрерывнолитой сортовой заготовки. Установлены особенности формирования кристаллической структуры непрерывнолитого слитка, полученного на высокопроизводительной сортовой МНЛЗ. Показано влияние динамики роста дендритных кристаллов стали на образование внутренних дефектов в непрерывнолитой сортовой заготовке.

Ключевые слова: непрерывнолитая сортовая заготовка, дендритные кристаллы, МНЛЗ, внутренние дефекты

Введение

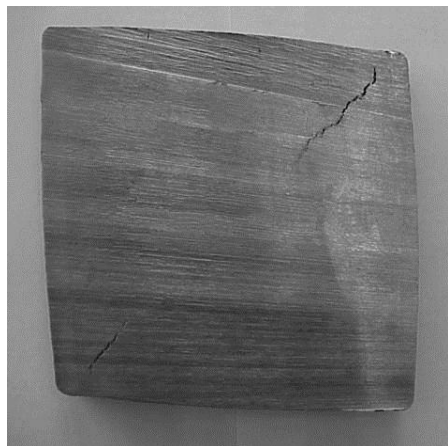
Современной тенденцией развития технологии непрерывного литья сортовой заготовки является стремление повысить производительность как новых, так и уже существующих МНЛЗ, за счёт увеличения скорости разливки стали при условии обеспечения высоких кондиций твёрдой заготовки, соответствующих требованиям ведущих международных систем стандартов качества. В последние два десятилетия основной прогресс в разливке сортовой заготовки достигается в части применения гильзовых кристаллизаторов, внутренняя полость которых имеет сложную геометрическую форму, которая в значительной степени учитывает особенности наращивания твёрдой корочки в кристаллизаторе (теплоотвод, скорость наращивания твёрдой корочки по периметру, усадку, внутренние напряжения в твёрдой оболочке и пр.) [1,2].

При высокопроизводительной разливке стали (со скоростями 5-7 м/мин на сортовые заготовки) время прибытия металла в кристаллизаторе значительно меньше, по сравнению с традиционной технологией (скорость вытяжки 2 - 2,5 м/мин), что отрицательно влияет на толщину и прочностные характеристики твёрдой корочки [3]. Также на процесс формирования заготовки пагубно влияет износ или деформация гильзы кристаллизатора [4]. Износ граней или углов гильзы способствует локальному ухудшению отвода тепла от корочки к кристаллизатору. Несмотря на все свои достоинства, так называемый «параболический» профиль внутренней поверхности гильзы кристаллизатора не может быть универсальным т.к. он усреднено рассчитывается для определённых групп марок стали а, например, величини-

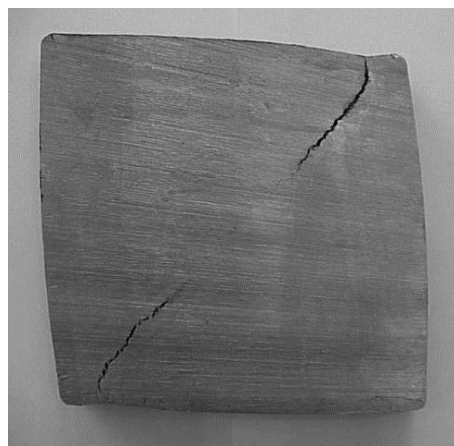
на усадки при одинаковых условиях охлаждения может изменяться в зависимости от химического состава сплава в пределах этой группы. Также определённую коррекцию в профиль твёрдой корочки вносит температура разливки.

Анализируя известные литературные источники и рекламные проспекты ведущих мировых разработчиков и производителей, можно выделить несколько основных концепций в конструкции геометрической формы гильз кристаллизаторов направленных на снижение механических напряжений в затвердевшей корочке и улучшение качества заготовки. Одной из таких концепций является обеспечение оптимального контакта граней заготовки в верхней части гильзы, а также увеличения конусности нижней её части для более жёсткой фиксации заготовки. Эти решения успешно воплощены швейцарской фирмой «CONCAST» в конструкции гильзы «CONVEX MOULD» [5] и в конструкции так называемого кристаллизатора с «гибкой» секцией вторичного охлаждения [6], а так же в кристаллизаторе итальянской фирмы DANIELI конструкции «Danam» [7]. Другим решением в обеспечении качества сортовой заготовки является концепция постарения гильз кристаллизаторов с меньшей конусностью углов, чем граней. Это позволяет снизить вероятность деформацию геометрии профиля заготовки за счет внутренних напряжений вызванных более интенсивным затвердеванием углов. Эта концепция осуществлена в конструкции гильзы кристаллизатора «HS MOULD» японской фирмы «Sumitomo», где конусность углов меньше, чем граней, а радиус сопряжения граней сверху гильзы в несколько раз меньше, чем в нижней части [8]. Также в мировой практике встречается сочетание описанных выше конструктивных решений. Примером такого симбиоза является гильза «DIA MOULD» австрийской фирмы «VAI» [9].

В процессе производства сортовой заготовки на высокопроизводительных сортовых МНЛЗ необходимо строго соблюдать технологические параметры разливки стали, которые учитывают особенности формирования твердой корочки в условиях используемой гильзы кристаллизатора. Отклонение от таких номинальных параметров литья приводит к неравномерному контакту затвердевающей корочки со стенкой гильзы кристаллизатора, чего может стать причиной появления дефектов геометрической формы заготовки, типа «ромбичность» [1]. Образование подобного рода дефекта дополнительно приводит к формированию внутренних растягивающих напряжений по граням в зоне, прилегающей к фронту затвердевания, в тупых углах заготовки, следствием чего может стать возникновение внутренних трещин в этой области (рисунок 1) [10]. Вероятность формирования таких трещин в значительной степени зависит от механической прочности корочки заготовки вблизи фронта затвердевания, которая в свою очередь обуславливается наличием дефектов в кристаллической структуре слитка.



а– ромбичность 18 мм;



б– ромбичность 20 мм

Рисунок 1 – Характерное расположение внутренних трещин в тупых углах непрерывнолитой сортовой заготовки (квадрат 125 мм).

Цель работы

Цель настоящей статьи заключается в изучении особенностей формирования дефектов кристаллической структуры непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокопроизводительной МНЛЗ, влияющих на прочность затвердевающего каркаса.

Основная часть

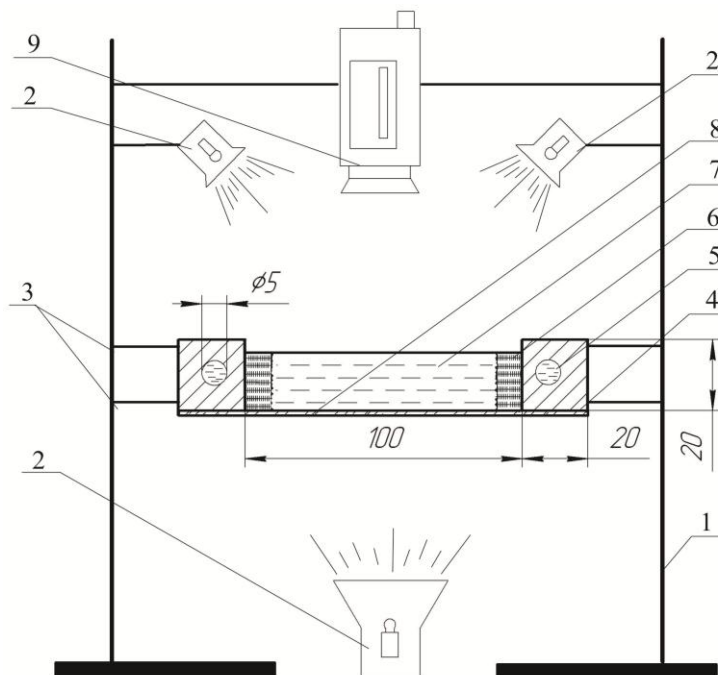
Наиболее эффективным методом исследования динамики затвердевания различного рода слитков является физическое моделирование, поскольку в этом случае удаётся контролировать отвод тепла от исследуемого объекта в совокупности с визуализацией основных процессов, сопровождающих наращивание твёрдой фазы [11-13]. При этом особое значение приобретает выбор моделирующего вещества, которое должно не только обладать оптической прозрачностью, но также иметь определённую совокупность теплофизических характеристик, позволяющих обеспечить соответствующую систему критериев подобия. Дополнительным условием, которое представляется, на наш взгляд, крайне важным, является затвердевание вещества по дендритному механизму.

Как показывает анализ, в наибольшей степени вышеперечисленным требованиям удовлетворяет химическое соединение камфен (2,2-диметил-3-метилтен-бициклогептан), которое затвердевает с образованием дендритной структуры. При этом в жидком состоянии камфен сохраняет оптическую прозрачность вплоть до полного затвердевания. Теплофизические свойства камфена, которые были определены авторами в лабораторных условиях, приведены в табл. 1 [1].

Для исследования особенностей формирования кристаллической структуры медного слитка была создана физическая модель, имитирующая поперечное сечение непрерывнолитой сортовой заготовки. Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рисунке 2.

Таблица 1 – Некоторые физические и теплофизические свойства камфена.

Температура соли- дус, °С	Темпе- ратура ликви- дус, °С	Теплота кристалли- зации, кДж/кг	Теплоемкость, кДж/(кг·К)		Температу- ропровод- ность, м ² /с	Поверх- ностное натяже- ние, Н/м	Кинема- тическая вязкость, м ² /с
			жидкий	твер- дый			
33	35	40,2	2,4	2,1	$1,3 \cdot 10^{-8}$	0,021	$7,2 \cdot 10^{-6}$



1 – фиксирующая рама; 2 – осветительные лампы; 3 – фиксаторы для поддержания кристаллизатора; 4 – кристаллизатор; 5 – отверстия, для пропускания охлаждающей воды; 6 – твердый слой камфена, намёрзший в ходе затвердевания; 7 – жидкий объем моделирующего вещества; 8 – прозрачное органическое стекло с низкой теплопроводностью; 9 – видеокамера.

Рисунок 2 – Общая схема лабораторной установки для моделирования процесса затвердевания заготовки в кристаллизаторе.

Расплав камфена затвердевал в модели кристаллизатора, которая изготовлена из алюминиевого сплава, что обеспечивает высокую интенсивность отвода тепла. Внутри модели кристаллизатора вмонтированы медные трубки диаметром 5 мм, через которые с определённым расходом пропускается охлаждающая вода. К нижней части модели приклеено прозрачное стекло, которое позволяет визуализировать процессы затвердевания при пропускании света через жидкую ванну. Соответственно, при такой схеме интенсивность теплоотвода через водоохлаждаемые стенки модели на несколько порядков выше, чем через мениск моделирующего вещества и прозрачное стекло.

Физическая модель выполнена в масштабе 1:1 по отношению к моделируемому объекту – непрерывнолитой сортовой заготовке сечением

100×100 мм. Температура заливки камфена составляла $38 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Среднее значение температуры воды для охлаждения стенок модели составляло $18-20^{\circ}\text{C}$. С целью предотвращения влияния теплоотвода через стекло и мениск расплавленного камфена на процесс затвердевания высота модельного слоя жидкости была принята равной 20 мм.

Компенсация различий в теплофизических параметрах стали и камфена осуществлялась путём регулирования интенсивности режимов отвода тепла таким образом, чтобы выполнялось условие тождественности произведения критерия Био (Bi) и критерия фазового перехода (N) ($Bi \cdot N = idem$). Временной масштаб моделирования μ_{τ} определяли исходя из идентичности критерия Фурье ($Fo = idem$) в соответствии с формулой:

$$\mu_{\tau} = \frac{a_m}{a_{st}} \cdot \mu_L^2, \quad (1)$$

где a_m и a_{st} - коэффициенты температуропроводности моделирующего вещества и стали соответственно.

При этом наличие развитой двухфазной зоны учитывалось посредством эффективных значений коэффициентов температуропроводности, которые определялись при помощи следующего уравнения:

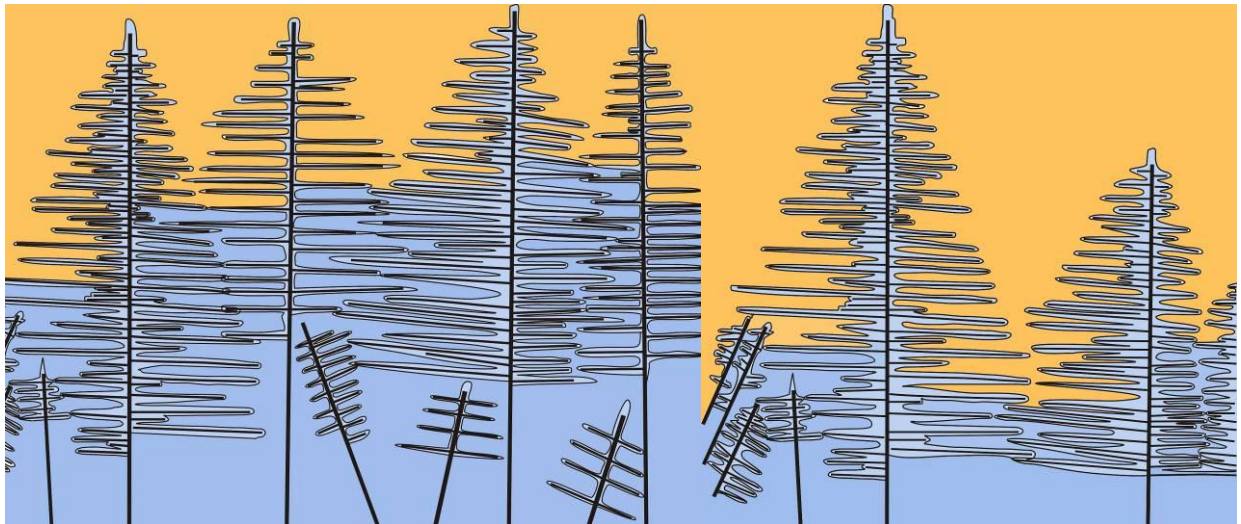
$$a_{эф} = \lambda / \rho (C + L / \Delta T_{кр}) \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К); ρ – плотность вещества, кг/м³; C – средняя массовая теплоемкость вещества, кДж/(кг·К); L – теплота кристаллизации вещества, кДж/кг; $\Delta T_{кр}$ – интервал температур затвердевания, $^{\circ}\text{C}$.

Процесс формирования твёрдой корочки вещества в лабораторной модели фиксировался при помощи цифрового фотоаппарата в режиме макросъёмки, что позволило визуализировать образование кристаллов и особенности формирования дендритной структуры.

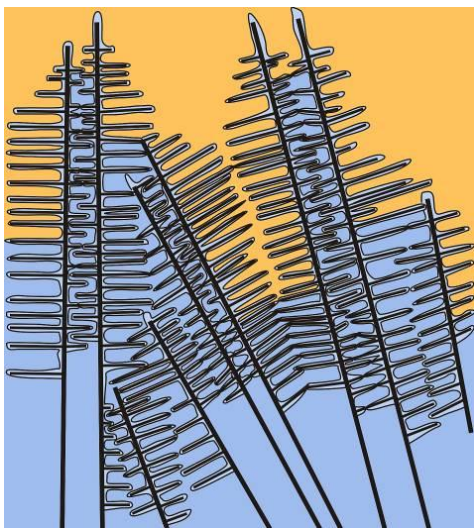
В процессе исследования особенностей роста кристаллов в кристаллизаторе высокопроизводительной сортовой МНЛЗ было выявлено пять основных схем формирования дендритных структур моделирующего вещества:

- 1) Схема упорядоченного роста дендритов (рисунок 3 а), при которой основное количество кристаллов находится на небольшом расстоянии друг от друга, их оси первого порядка расположены параллельно друг другу и перпендикулярно поверхности, а оси второго порядка пересекаясь, образуют плотную оболочку;
- 2) Область кристаллической структуры, в которой главные оси дендритов параллельны направлению теплоотвода, однако расположены на существенном расстоянии друг от друга, что обуславливает формирование областей глубокого проникновения жидкой фазы (30-40% от толщины затвердевшей оболочки) (рисунок 3 б);

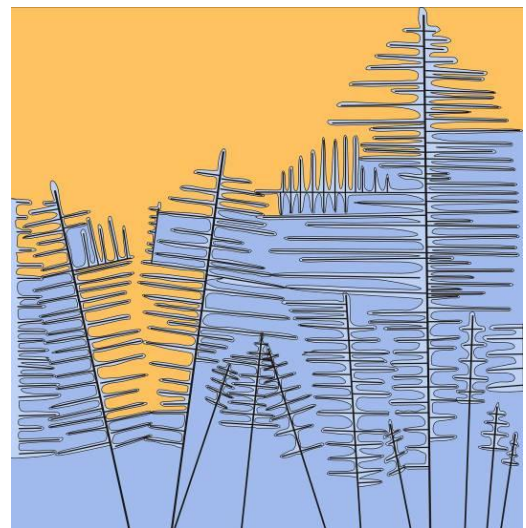


а

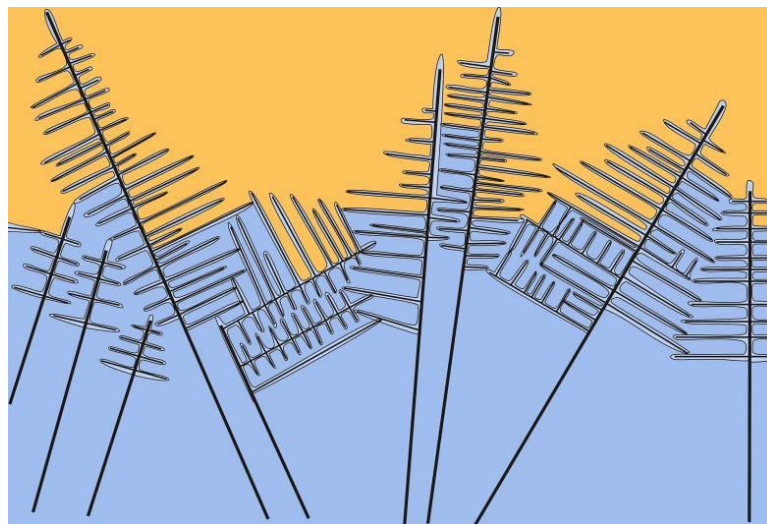
б



в



г



д

Рисунок 3 – Схемы формирования дефектов дендритной структуры непрерывнолитой сортовой заготовки.

- 3) Схема роста дендритных кристаллов, отличающаяся от предыдущих двух тем, что оси первого порядка некоторых кристаллов формируются перпендикулярно продвижению фронта кристаллизации, а главные оси рядом растущих дендритов образуют с поверхностью модели острый угол (рисунок 3 в). При этом останавливается рост части дендритов главные оси которых сталкиваются с вторичными или первичными осями пряморастущих кристаллов, следствием чего является отставание в затвердевании части жидкой фазы в междендритном пространстве толщиной равной 20-30% от толщины твёрдой фазы слитка;
- 4) Схема кристаллической структуры, в которой некоторые рядом расположенные дендриты растут под небольшим углом в разные стороны друг от друга (рисунок 3 г). Это приводит к локальному проникновению жидкой фазы вглубь плотной кристаллической оболочки на 40-60%;
- 5) Схема роста кристаллов, при которой оси первого порядка растущих рядом дендритов образуют между собой тупой угол (рисунок 3 д). В процессе развития такой кристаллической структуры пространство между дендритами растущими в противоположенные стороны начинает заполняться разрастающимися осями второго и третьего порядка, образующими менее прочную кристаллическую оболочку.

Наиболее предпочтительным вариантом формирования корочки заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ является традиционная схема роста дендритов (рисунок 3 а), так как в этом случае обеспечивается наибольшая прочность твёрдого каркаса из-за отсутствия в нем включений жидкой фазы.

Однако, как показало физическое моделирование, образование кристаллической структуры заготовки по периметру происходит не равномерно и может включать в себя различные комбинации схем дендритных структур, отличающихся от «классической». В этом случае, между некоторыми расположенными рядом кристаллами остаётся значительное количество жидкости (40-60%) (рисунок 3 б, в, г, д), что способствует локальному ухудшению прочности корочки в этой области, и что может стать причиной зарождения и образования трещины при появлении в этой зоне механических или температурных напряжений.

В целом, смоделированный в данной главе механизм формирования дендритной структуры сортовой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ хорошо согласуется с процессами, наблюдаемыми в промышленных условиях, чему свидетельствует качественное совпадение направлений роста кристаллов камфена с направлением роста кристаллов стали на протравленном темплете (рисунок 4).

Полученные результаты физического моделирования позволяют сделать вывод о том, что зарождение трещин в корочке заготовки происходит между главными осями кристаллов, чему способствует формирование де-

фектов в дендритной структуре вследствие отклонения направления роста кристаллов от нормального по отношению к поверхности гильзы.

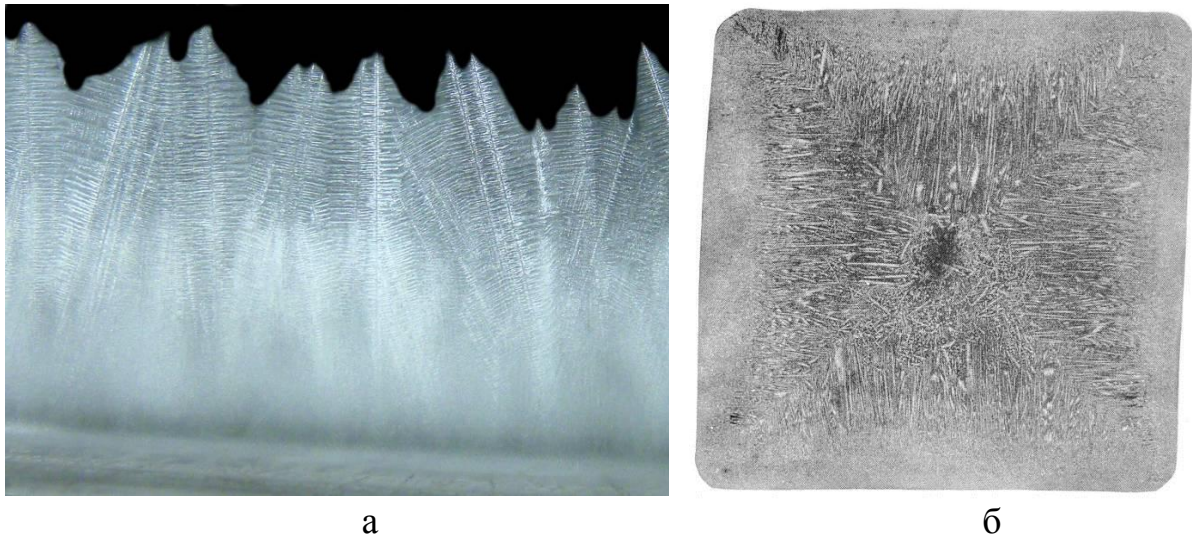


Рисунок 4 – Пример качественного совпадения направления роста дендритных кристаллов камфена и стали

Выводы

В результате выполненных исследований установлено, что в процессе затвердевания непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокопроизводительной МНЛЗ направление роста дендритов в большинстве случаев является хаотичным относительно поверхности теплоотвода, а скорости роста отдельных кристаллов отличаются на 25-35%. При этом развитие близлежащих кристаллов прекращается из-за столкновения с вторичными ветвями более интенсивно развивающихся дендритов. Также, вследствие разнонаправленности роста дендритов между кристаллами остаётся 40-60% жидкой фазы, что снижает механическую прочность корочки, следствием чего является появление трещин в этой области под действием температурных или механических напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А.Н. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин, Е.Ю. Жибоедов // Процессы литья. – 2009. – №1. – С. 33 - 42.
2. Moitra A. Application of a thermo-mechanical model for steel behavior in continuous slab casting / A. Moitra, G. Brian, T. Hong Zhit // Steelmaking conf. Proceedings (Dallas,tx). – 1993. – Vol.76. – P. 663-668.
3. Li C. Maximum casting speed for continuous cast steel billets based on sub-mold bulging computation / C. Li, B.G. Thomas // 85th Steelmaking Conf. Proc., ISS, Warrendale, PA, (held in Nashville, TN, March 10-13, 2002). – 2002. – P. 109-130.
4. Krujelskis V. The influence of mould tube taper and distortion on cast billet quality / V. Krujelskis, J. Cook // Steelmaking conference proceeding. – 1988 – P. 349- 352.

5. Cobelli P. Continuous Casting of Long Product (Billet and Bloom Quality) / P. Cobelli, C. Terrelli, S. Kohl // Proceedings Conference "Long Products – The Challenge & Opportunity". Jamshedpur (India). – 2004. – P. 1-21.
6. Kawa F. CONCAST experimental mould with a flexible secondary cooling section / F. Kawa // Concast standard news. – 1992. – Vol. 31,2. – P. 4 - 7.
7. High casting speed / M. Pavlicevic, B. Matijasevic, N. Karaj et all // DaNEWS 114. – Vol. 1. – P. 36 - 43.
8. High Speed Casting Mold for Continuously Cast Billet / T. Kanazawa, K. Abe, N. Fukuda et. al. // Zairyo to Prosesu = Current Advances in Materials and Processes. – 2002. – №15. – P. 749.
9. Fuchshuber J. Modern billet casting technology / J. Fuchshuber, G. Zedefbauer // Continuous casting. Millennium steel 2k4. – P. 162 - 167.
10. Смирнов А.Н. Особенности деформации твердой корочки заготовки в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин // Электрометаллургия. – 2009. – №6. – С. 14-20.
11. Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, С.В. Момот, В.Н. Амитан. – Донецк: Изд-во «ВИК», 2002. – 169 с.
12. Эльдарханов А.С. Процессы формирования отливок и их моделирование / А.С. Эльдарханов, В.А. Ефимов, А.С. Нурадинов. – М.: Машиностроение, 2001. – 208 с.
13. Thomas B.G. Continuous casting: Complex Models / B.G. Thomas // The Encyclopedia of Materials: Science and Technology. – Oxford: Elsevier Science Ltd., 2001. – Vol. 2. – P. 1599-1609.

Надійшла до редакції 23.11.2012

Рецензент д-р техн. наук, проф. О.М. Смірнов

В.Є. Ухін

Донецький національний технічний університет, Донецьк

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ КРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОЇ СОРТОВОЇ ЗАГОТОВКИ В КРИСТАЛІЗАТОРІ ВИСОКОПРОДУКТИВНОЇ МБЛЗ

Представлені результати фізичного моделювання процесу затвердіння безперервнолиотої сортової заготовки. Установлені особливості формування кристалічної структури безперервнолитого зливка, отриманого на високопродуктивній МБЛЗ. Показано вплив динаміки росту дендритних кристалів сталі на утворення внутрішніх дефектів у безперервнолитій сортовій заготовці.

Ключові слова: безперервнолита сортова заготовка, дендритні кристали, МБЛЗ, внутрішні дефекти.

V.E. Uhin

Donetsk National Technical University, Donetsk

BILLET CRYSTAL STRUCTURE FORMATION IN HIGH PRODUCTIVITY CASTER MOLD

The paper presents the results of physical modeling of continuously casted billet solidification. We discuss the formation of the crystal structure of continuously casted billets obtained by means of a high productivity continuous caster. The influence of steel dendrite crystals

growth dynamics on the internal defects formation in a billet is shown.

Keywords: billets, dendrite crystals, CCM, internal defects.

УДК 669.018.258

О.В. АНТЫКУЗ (канд.техн.наук)

Донецкий национальный технический университет, Донецк

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ МЕХАНИЗМА КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА СЛЯБОВОЙ МНЛЗ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕСС ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Разработана физическая модель механизма качания кристаллизатора слябовой МНЛЗ, позволяющая осуществлять исследования работы механизма. На этой установке было проведено моделирование работы механизма качания кристаллизатора в различных его технических состояниях. Установлено влияние технического состояния механизма качания кристаллизатора на явления образования волновых колебаний на поверхности жидкости в нем. Определены частоты качания кристаллизатора, при которых в нем образуются волны и частоты, при которых происходит увеличение высоты волн.

Ключевые слова: механизм качания кристаллизатора, физическое моделирование, волновые колебания, техническое состояние.

Введение

Исследования процесса качания кристаллизатора и его влияние на поведение жидкого металла в полости кристаллизатора в производственных условиях достаточно усложнено. Это связано с тем, что не всегда есть возможность установки необходимой измерительной аппаратуры во время разлива на МНЛЗ, не все режимы качания из доступных применяются на промышленной МНЛЗ. Кроме того, во время исследований высока вероятность увеличения образования брака непрерывнолитой заготовки и возникновения аварийной ситуации, что может повлечь за собой снижение производительности и прибыли.

Цель работы

В связи с этим представляется целесообразным проведение физического моделирования работы механизма качания с целью расширения практических знаний о влиянии качания кристаллизатора на процессы, происходящие при разливе стали на МНЛЗ.

Для исследования режимов качания кристаллизатора, а также их влияния на процесс волнообразования на поверхности металла в кристаллизаторе, была разработана и изготовлена физическая модель механизма кача-