

Моделирование условий деформации твердой корочки заготовки в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ

Основной тенденцией развития техники и технологии непрерывного литья сортовой заготовки является стремление повысить производительность как новых, так и уже существующих МНЛЗ за счет увеличения скорости разливки стали при условии обеспечения высоких кондиций твердой 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 динамику наращивания твердой корочки в кристаллизаторе (геоотвод, скорость наращивания твердой корочки по периметру, усадку, внутренние напряжения в твердой оболочке и пр.) [1, 2].

При высокоскоростной разливке стали (со скоростями 5-7 м/мин) на сортовые заготовки время пребывания металла в кристаллизаторе значительно меньше, по сравнению с традиционной технологией (скорость вытяжки 2,2-2,5 м/мин), что может существенно снижать толщину и прочностные характеристики твердой корочки [3]. Также на процесс формирования заготовки пагубно влияет износ или деформация отдельных участков гильзы кристаллизатора [4].

Представлены результаты физического моделирования условий деформации твердой корочки в процессе ее формирования в кристаллизаторе и показаны основные факторы, влияющие на ее деформирование. Выполнен анализ влияния толщины корочки на характер ее деформирования при наложении сжимающих воздействий. Установлено, что характер и величина деформации твердой корочки имеет обратно пропорциональную зависимость от ее толщины. Показано, что массовое образование трещин в твердой корочке заготовки происходит только при достижении ею определенной толщины, соответствующей ее положению в нижней части кристаллизатора

Износ внутренних граней или углов гильзы (рис. 1) 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. Это следует связывать с тем, что он усреднено рассчитывается для определенных групп марок стали а, например, величина усадки при одинаковых условиях охлаждения может изменяться в зависимости от химического состава сплава в пределах этой группы. Также определенную коррекцию в профиль твердой 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 внутренней полости гильз кристаллизаторов, направленных на снижение ме-

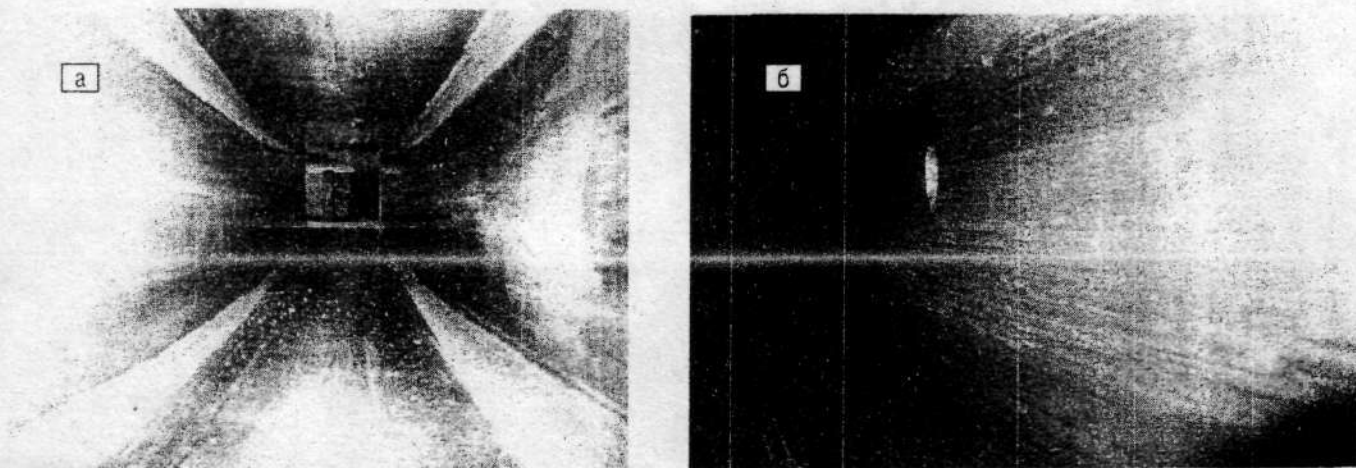


Рис. 1. Износ углов (а) и граней (б) гильзы кристаллизатора сортовой МНЛЗ

ханических напряжений в затвердевшей корочке и улучшение качества заготовки. Одной из таких концепций является обеспечение плотного контакта граней и углов заготовки в верхней части гильзы, а также увеличения конусности нижней ее части для более жесткой 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 также в кристаллизаторе итальянской фирмы «DANIEL» конструкции «Danam» [7]. Альтернативным решением в обеспечении качества сортовой заготовки является концепция построения гильз кристаллизаторов с меньшей конусностью углов, чем граней. Это позволяет снизить вероятность деформации геометрии профиля заготовки за счет внутренних напряжений, вызванных более интенсивным затвердеванием углов. Данная концепция осуществлена в конструкции гильзы кристаллизатора «HS MOULD» японской фирмы «SUMITOMO», где конусность углов меньше, чем граней, а радиус сопряжения граней вверху гильзы в несколько раз меньше, чем в нижней части [8]. Сочетанием описанных выше конструктивных решений является гильза «DIA MOULD» австрийской фирмы «VAI» [9].

В процессе разлива сортовой заготовки на высокоскоростных сортовых МНЛЗ необходимо строго соблюдать совокупность таких неразрывно связанных между собой технологических параметров разлива стали как: скорость вытяжки заготовки, профиль гильзы кристаллизатора, марка и температура разливаемой стали, которые учитывают особенности формирования твердой корочки в условиях используемой гильзы. Отклонение от номинальных параметров литья может привести к неравномерному контакту затвердевающей корочки со стенкой гильзы кристаллизатора, что может стать причиной возникновения дефектов геометрической формы заготовки [1], или, наоборот, к случаю, когда в какой-то части гильзы профиль заготовки может быть больше, чем внутренний профиль гильзы, следствием чего является деформация корочки.

Целью настоящей работы является исследование и идентификация процессов и явлений, сопровождающих формирование твердой корочки заготовки в кристаллизаторе, в условиях, когда конусность гильзы увеличивается быстрее, чем скорость усадки затвердевающей корочки. Такое явление может иметь место, например, в случае превышения скорости вытяжки заготовки над номинальным проектным значением или при короблении гильзы.

Наиболее эффективным методом исследова-

ния динамики процесса затвердевания непрерывнолитых слитков является физическое моделирование, так как оно позволяет контролировать теплофизические параметры системы (интенсивность теплоотвода от модели), а также позволяет визуализировать основные процессы, сопровождающие формирование твердой фазы [10-14]. При этом особое значение приобретает выбор моделирующего вещества, которое должно соответствовать ряду требований, важнейшими из которых, на наш взгляд, являются: оптическая прозрачность; наличие совокупности теплофизических характеристик, позволяющих обеспечить соответствующую систему критериев подобия; затвердевание вещества по дендритному механизму и т. п.

В значительной степени вышеперечисленным требованиям отвечает химическое соединение камфен (2,2-диметил-3-метилен-бициклогептан), которое затвердевает с образованием дендритной структуры, а также является оптически прозрачным, как в жидком, так и в твердом состояниях. Теплофизические свойства камфена были определены авторами и подробно описаны в работе [1].

При физическом моделировании процессов и явлений, сопровождающих формирование твердой корочки заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной сортовой МНЛЗ, в условиях, когда конусность гильзы увеличивается быстрее, чем скорость усадки затвердевающей корочки, решались следующие основные задачи: исследование динамики процесса поведения затвердевшей корочки при взаимодействии с кристаллизатором, качественная и количественная оценка характера деформации корочки в зависимости от величины сжимающего воздействия, определение условий возникновения внутренних трещин в твердой корочке и пр.

Разработанная лабораторная установка представляет собой модель поперечного сечения кристаллизатора сортовой МНЛЗ, стенки которой изготовлены из алюминиевого сплава, что обеспечивает высокую интенсивность отвода тепла в поперечном сечении (рис. 2). Высота модельного слоя жидкости составляет 20 мм. Внутри модели стен кристаллизатора смонтированы медные трубки диаметром 5 мм, через которые с определенным расходом пропускается охлаждающая вода. Для моделирования явления сжимающего воздействия, одна из граней модели выполнена подвижной. 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 гораздо выше, чем через мениск моделирующего вещества и прозрачное стекло.

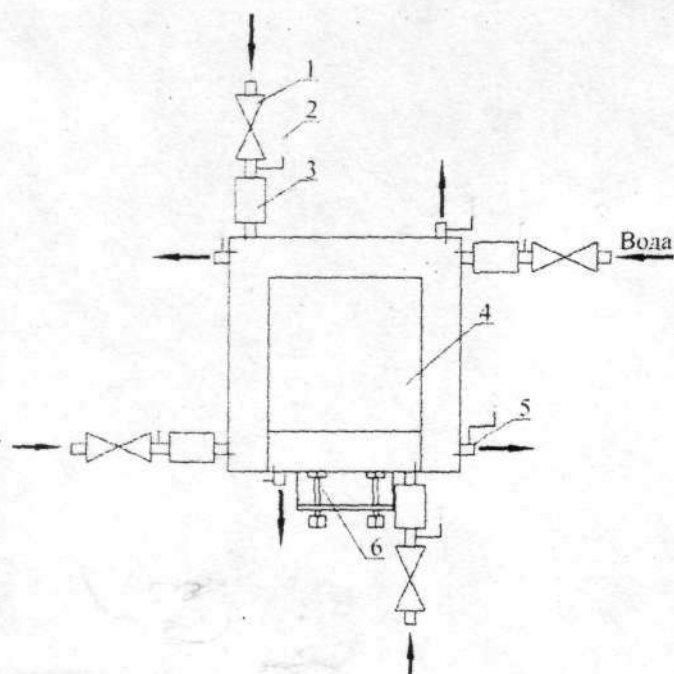


Рис. 2. Общая схема лабораторной установки для моделирования процесса деформации корочки заготовки в кристаллизаторе: 1 – клапан регулирования подачи охлаждающей воды; 2 – термометр; 3 – расходомер; 4 – стекло; 5 – медная трубка; 6 – механизм перемещения грани модели

Физическая модель выполнена в масштабе 1:1 по отношению к моделируемому объекту – непрерывнолитой сортовой заготовке сечением 100×100 мм. Температура заливки камфена составляла $38 \pm 0,5$ °С. Среднее значение температуры воды для охлаждения стенок модели составляло 18–20 °С. Процесс затвердевания наблюдался визуально и фиксировался с помощью цифровой видеокамеры. По полученным видеофайлам осуществлялась количественная оценка кинетики затвердевания и трещинообразования в затвердевшей корочке.

В разработанной модели предусмотрена возможность регулирования расхода охлаждающей воды для каждой грани в отдельности и измерения расхода посредством расходомера. Температура воды на входе и выходе из модели измерялась при помощи ртутного термометра с точностью $\pm 0,1$ °С. Процесс затвердевания фиксировался с помощью цифровой видеокамеры. По полученным видеофайлам осуществлялась количественная оценка поведения и динамики деформации затвердевшей корочки.

Компенсация различий в теплофизических параметрах стали и камфена осуществлялась путем 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 определяли исходя из идентичности критерия Фурье ($Fo = idem$). При этом наличие развитой двухфазной зоны

учитывалось посредством эффективных значений коэффициентов температуропроводности [1].

Для изучения деформации корочки в условиях, когда конусность гильзы увеличивается быстрее, чем величина усадки затвердевающего металла, интерес представляют три основных этапа формирования корочки заготовки:

1-й – начало нарастания твердой корочки (до 3–4 мм) на поверхности в верхней части гильзы, которую, в большинстве случаев, изготавливают с большой конусностью [15];

2-й – средняя часть кристаллизатора, где конусность примерно совпадает с величиной усадки (толщина корочки 4–8 мм);

3-й – нижняя часть гильзы (толщина корочки 8–14 мм и более), в которой величина конусности гильзы варьируется в зависимости от конструкции производителя и может быть как больше, так и меньше величины усадки.

Физическое моделирование каждого из вышеописанных этапов повторялось по 3 раза, что предполагало возможность дифференцированной количественной оценки основных параметров, характеризующих изучаемый процесс. При выполнении всех трех этапов моделирования был принят одинаковый расход воды для охлаждения модели, который составлял 1,125 л/мин на каждую грань. Величина деформации твердого каркаса определялась как максимальное расстояние от стенки модели кристаллизатора до внешней поверхности затвердевшей корочки модельного вещества. Величина перемещения стенки модели, имитирующая увеличение конусности гильзы кристаллизатора, во всех трех случаях равнялась 5 мм, а скорость перемещения составляла 0,083 мм/сек.

На первом этапе моделирования деформации подвергалась корочка модельного вещества толщиной 2,5 мм. При перемещении стенки вглубь модели на расстояние 1 мм никаких значимых изменений в поведении затвердевшего каркаса вещества не наблюдалось. Дальнейшее поведение объекта моделирования выглядело следующим образом: сжимающее воздействие, равное 2 мм, спровоцировало резкую деформацию участка корочки длиной около 28–30 мм до уровня 1 мм в районе угла модели. Однако последующее перемещение стенки еще на 1 мм незначительно повлияло на деформацию корочки. Перемещение грани модели до расстояния 5-ти мм вызвало почти линейное увеличение деформации корочки, значение которой в конце моделирования составило 4 мм (рис. 3). После проведения эксперимента кристаллическая структура деформированной корочки не отличалась от структуры недеформированного затвердевшего модельного вещества.

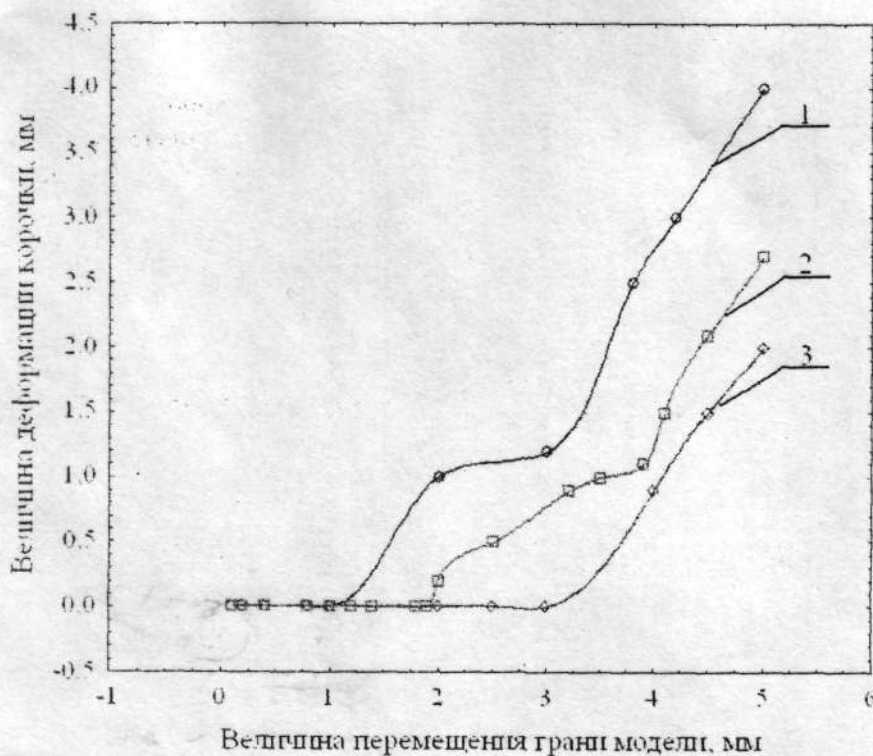


Рис. 3. График изменения величины деформации корочки модельного вещества от перемещения грани модели (толщина корочки: 1 – 2,5 мм; 2 – 5 мм; 3 – 9 мм)

На втором этапе моделирования исследовалось воздействие деформации на затвердевшую корочку толщиной 5 мм. В этом случае твердая фаза не подвергалась деформации вплоть до величины перемещения стенки, равной 2 мм, однако, после преодоления этого рубежа участок корочки протяженностью 35 мм отошел от стенки модели в районе угла сразу на 0,2 мм.

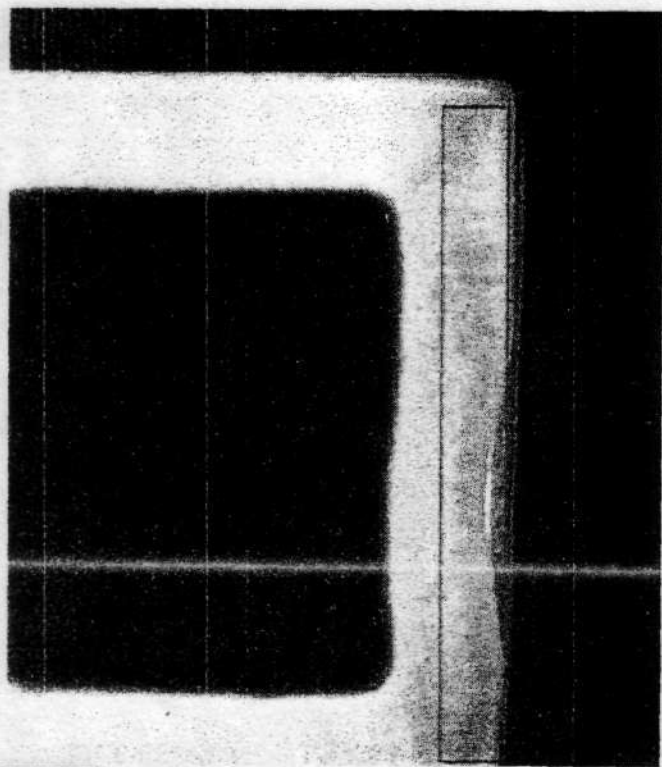


Рис. 4. Образование трещин в корочке модельного вещества толщиной 9 мм после деформации

В процессе моделирования наблюдалось снижение реакции корочки на сжимающую силу, как и в первом случае, при перемещении грани от 3,2 до 3,9 мм. В дальнейшем изменение величины деформации корочки в зависимости от перемещения грани модели принимает линейный характер и в конце эксперимента установилось равным 2,7 мм. Структура затвердевшей корочки, как и в предыдущем случае, в месте приложения деформационного усилия не отличалась от мест не подверженных сжатию.

Третий этап моделирования предусматривал изучение влияния взаимодействия корочки толщиной 9 мм со стенкой кристаллизатора в условиях несоответствия скорости усадки заготовки увеличению конусности гильзы. Как и в первых двух случаях,

реакция заготовки на перемещение грани модели отсутствовала до величины деформации, равной 3 мм, после чего по центру грани от поверхности модели отошла часть корочки шириной 38-40 мм. В дальнейшем в ходе эксперимента величина деформации корочки равномерно возрастала под действием сжимающей силы, направленной со стороны перемещающейся грани, которая была расположена перпендикулярно, и в конце исследования достигла значения 2 мм. Особенностью данного этапа моделирования стало формирование в корочке большого количества мелких трещин толщиной 0,3-0,5 мм и длиной 2-4 мм (приблизительно 10-15 шт/см длины грани), ориентированных параллельно направлению роста дендритных кристаллов и, по-видимому, сформировавшихся между ними. В соответствии с визуальными наблюдениями эти трещины образовались в зоне близкой к поверхности заготовки непосредственно в процессе деформации (рис. 4).

В целом смоделированный в настоящей работе механизм деформации твердой корочки заготовки достаточно хорошо согласуется с процессами, наблюдаемыми в реальных сортовых заготовках. Например, в практике непрерывной разливки весьма характерным дефектом является «ужимина» вдоль угла заготовки (рис. 5, б). На наш взгляд, происхождение этого дефекта достаточно легко идентифицировать, сравнивая профиль поперечного сечения заготовки с профилем корочки модельного сплава.

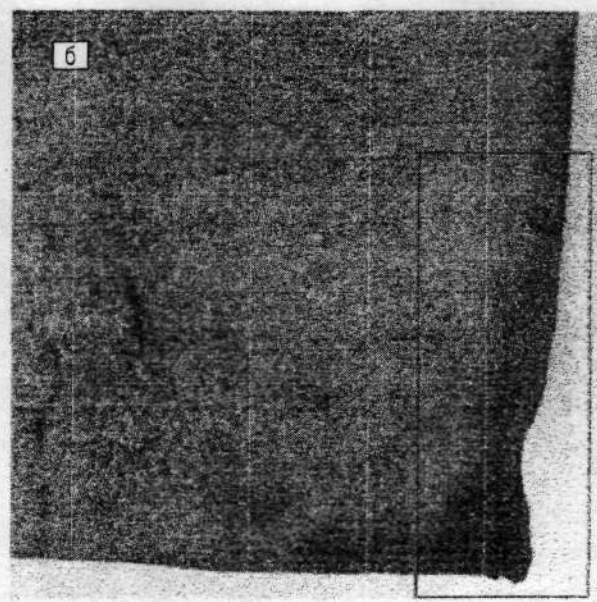
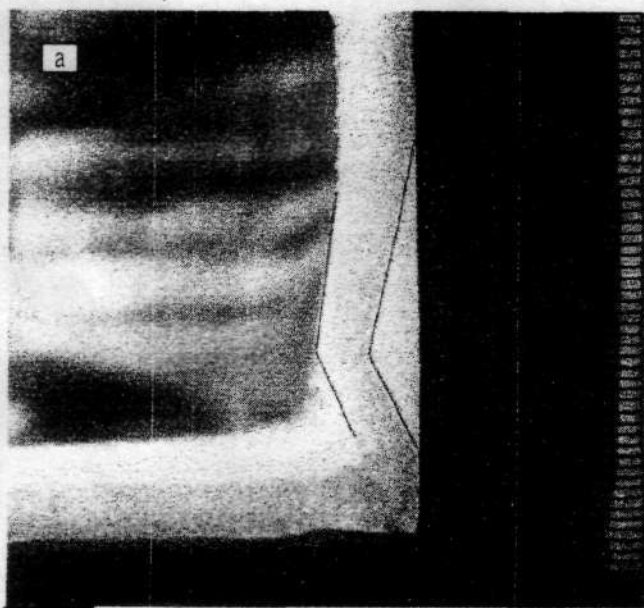


Рис. 5. Фотография корочки модельного вещества в месте деформации при наложении на нее сжимающего воздействия (а) и профиля темплета непрерывнолитой сортовой заготовки сечением 125 мм (б)

Следовательно, полученные качественные результаты изучения процесса роста твердой корочки в кристаллизаторе могут быть использованы при проектировании внутреннего профиля скоростных гильз для разлива сортовой заготовки с высокими скоростями. Прежде всего, следует отметить, что для обеспечения максимального отвода тепла в верхней половине гильзы целесообразно выполнять эту область с конусностью, превышающей конусность заготовки, обуславливаемую явлением усадки. Для верхней части нижней половины гильзы наиболее предпочтительным является примерное совпадение конусности внутренней полости гильзы и величины усадки заготовки. При этом конусность гильзы может быть несколько больше. Для нижней части гильзы предлагается использовать конусность несколько меньше, чем усадка заготовки. Это обеспечит минимизацию износа стенок гильзы вследствие истирания.

Что же касается величины конусности в углах гильзы кристаллизатора, то, принимая во внимание явление образования продольных ужимин вдоль углов заготовки, наиболее предпочтительной представляется несколько меньшая конусность, чем по граням заготовки. Принцип выбора величины конусности при этом должен предполагать, что углы заготовки выходят из прямого контакта с поверхностью заготовки в нижней половине гильзы.

Дополнительным фактором, который оказывает влияние на условия формирования твердой корочки заготовки при фиксированной конфигурации гильзы может рассматриваться положение уровня металла в кристаллизаторе. Например, при увеличении скорости вытяжки заготовки (или повышении температуры заливки стали) разливку целесообразно вести на максимально

допустимом по высоте уровне, величина которого обуславливается возможностями оборудования для поддержания уровня стали в кристаллизаторе. Соответственно при снижении скорости вытяжки заготовки ниже номинального уровня стали в кристаллизаторе следует понизить таким образом, чтобы профиль твердой корочки заготовки обеспечивал его прилегание к поверхности гильзы.

Выводы

1. В процессе непрерывной разлива при отклонении параметров литья от номинальных формирующаяся твердая корочка заготовки может испытывать сжимающее воздействие со стороны стенок гильзы кристаллизатора, что приводит к деформации корочки заготовки и появлению внутренних трещин.

2. Установлено, что характер и величина деформации твердой корочки имеет обратно пропорциональную зависимость от ее толщины. При этом очаг деформации перемещается из приугловой зоны к центру грани с увеличением толщины твердой корочки заготовки.

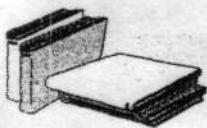
3. Исследованиями на модельном веществе (камфен) показано, что твердая корочка способна выдержать величину сжатия (без деформации), равную 37-40 % от своей толщины.

4. Установлено, что массовое образование трещин в твердой корочке заготовки происходит только при достижении ею определенной толщины, соответствующей ее положению в нижней части кристаллизатора. Это позволяет рекомендовать такую конструкцию внутренней полости кристаллизатора, при которой сжимающие воздействия на твердую корочку осуществляются в верхней части гильзы. При этом рекомендуемая конусность гильзы кристаллизатора в углах

должна быть несколько меньше, чем по его граням.

5. В качестве управляющего фактора, влияющего на уровень сжимающих воздействий на твердую корочку, может рассматриваться положение

уровня жидкой стали в кристаллизаторе. Между тем, возможности изменения положения уровня жидкой стали ограничиваются действием системы автоматического поддержания уровня металла в кристаллизаторе.



ЛИТЕРАТУРА

1. 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. Application of a thermo-mechanical model for steel behavior in continuous slab casting / A. Moitra, B. G. Thomas, T. Hong-Zhit // *Steelmaking conf. Proceedings*. Vol. 76. – Dallas, Tx, 1993. – P. 663-668.
3. Li C., Thomas B. G.. Maximum casting speed for continuous cast steel billets based on sub-mold bulging computation / 85-th *Steelmaking Conf. Proc.*, ISS, Warrendale, PA, (held in Nashville, TN, March 10-13), 2002. – P. 109-130.
4. Krujelskis V., Cook J. The influence of mould tube taper and distortion on cast billet quality // *Steelmaking conference proceeding*, 1988. – P. 349-352.
5. Cobelli P., Tercelli C., Kohl S. Continuous Casting of Long Product (Billet and Bloom Quality) // *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 // *Concast standard news*. – 1992. – Vol. 31, No. 2. – P. 4-7.
7. High casting speed / M. Pavlicevic, B. Matijasevic, N. Kapaj e.a. // *DaNEWS 114*. – 1994. – № 1. – P. 36-43.
8. High Speed Casting Mold for Continuously Cast Billet / T. Kanazawa, K. Abe, N. Fukuda e.a. // *Zairyo to Prosesu – Current Advances in Materials and Processes*. – 2002. – No. 15. – P. 749.
9. Fuchshuber J., Zedefbauer G. Modern billet casting technology // *Continuous casting. Millennium steel*, 2004. – P. 162-167.
10. Эльдарханов А. С. Процессы кристаллизации в поле упругих волн. – М.: *Металлургия*, 1996. – 256 с.
11. Смирнов А. Н. Улучшение качества слитков и заготовок путем виброимпульсного воздействия при их затвердевании // *Сталь*. – 1997. – № 4. – С. 14-20.
12. Марков Б. Л., Кирсанов А. А. Физическое моделирование в металлургии. – М.: *Металлургия*, 1984. – 119 с.
13. Эльдарханов А. С., Ефимов В. А., Нуратдинов А. С. Процессы формирования отливок и их моделирование. – М. *Машиностроение*. – 208 с.
14. 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.
15. Смирнов А. Н., Лейрих И. В., Жибоедов Е. Ю. Современные тенденции развития конструкции кристаллизаторов для сортовых МНЛЗ // *Металлургическая и горнорудная пром-сть*. – № 6. – 2005. – С. 13-17.

Summary

A. Smirnov, V. Uhin

Simulation of solid shell deformation conditions in the billet continuous casters mould

Physical simulation results of solid shell deformation conditions during its formation in the mould are presented and major contributors that influences on its deformation are shown. The analysis of solid shell thickness influence on its deformation character during compressing influences is made. The inversely proportional dependence of shell deformation nature and value on its thickness is determined. It is shown that massive crack formation in the solid shell occurs only on reaching of certain shell thickness, that conforms to its position in the moulds bottom.

Анотація

А. Н. Смірнов, В. Є. Ухін

Моделювання умов деформації твердої скоринки заготовки у кристалізаторі сортової МНЛЗ

Представлено результати фізичного моделювання умов деформації твердої скоринки в процесі її формування в кристалізаторі та показано основні фактори, що впливають на її деформування. Виконано аналіз впливу товщини скоринки на характер її деформування при накладанні стискаючих впливів. Встановлено, що характер і величина деформації твердої скоринки має зворотно пропорційну залежність від її товщини. Показано, що масове утворення тріщин у твердій скоринці заготовки відбувається тільки при досягненні нею певної товщини, яка відповідає її положенню в нижній частині кристалізатора.

Ключевые слова

Кристаллизатор, моделирование, твердая корочка, условия деформации, заготовка