

Исследование динамики роста твердой корочки и ее деформации в кристаллизаторе современной сортовой МНЛЗ

Рассмотрены существующие подходы к обеспечению высокоскоростной непрерывной разливки сортовой заготовки. Представлены результаты физического моделирования процесса формирования и деформации твердой корочки в кристаллизаторе, установлены основные факторы, влияющие на темп ее наращивания и деформирования. Показано влияние локального изменения теплоотвода от поверхности заготовки на изменение ее конфигурации. Установлено, что массовое образование трещин в твердой корочке заготовки происходит только при достижении ею определенной толщины, соответствующей ее положению в нижней части кристаллизатора

Ключевые слова: сортовая заготовка, непрерывная разливка стали, кристаллизатор, корка, теплоотвод

Эволюция развития технологии непрерывного литья сортовой заготовки характеризуется стремлением производителей максимально увеличить скорость разливки при обеспечении высоких кондиций твердой заготовки в части геометрической конфигурации и отсутствия поверхностных и подповерхностных трещин [1,2]. При этом 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 твердой корочки в кристаллизаторе (теплоотвод, скорость наращивания твердой корочки по периметру, усадку, внутренние напряжения в твердой оболочке и пр.) [3-5].

Не выполняя углубленного анализа известных конфигураций гильз, отметим лишь, что у большинства производителей нижняя половина гильзы представляет собой квазипараболический профиль, рассчитанный, видимо, для определенных технологических условий (скорость разливки, химический состав стали и т.п.) [6,7]. Однако реальные условия эксплуатации гильз показывают, что так называемый параболический профиль гильз не всегда в полной мере соответствует оптимальным условиям разливки. Кроме того, в процессе эксплуатации происходит

локальный износ поверхности гильз в отдельных ее частях (преимущественно в углах нижней части гильзы), что соответственно ухудшает условия отвода тепла от поверхности заготовки и способствует короблению твердой корочки. Не менее важным элементом конструкции гильзы является и профиль ее верхней части. Как правило, различные фирмы-производители предусматривают различную конусность верхней части гильзы, что следует рассматривать как свидетельство различных концептуальных подходов в части поведения заготовки в верхней части кристаллизатора [8]. Собственно, для обеспечения высокой эффективности разливки необходимо учитывать эти концептуальные подходы непосредственно в процессе литья, что наиболее важно в случае отклонения технологических параметров от номинальных. Отклонение от таких параметров литья может привести к неравномерному контакту затвердевающей корочки со стенкой гильзы кристаллизатора, что может привести к появлению дефектов геометрической формы заготовки [9], или, наоборот, к случаю, когда в какой-то части гильзы профиль заготовки может быть больше, чем профиль гильзы, следствием чего является деформация корочки.

Целью настоящей статьи является исследование и идентификация процессов и явлений, сопровождающих формирование заготовки в кристаллизаторе, в случае неравномерного отвод тепла по грани и в углах заготовки, связанного либо с износом части внутренней поверхности кристаллизатора, либо с отхождением поверхности заготовки от поверхности гильзы вследствие несоответствия их профилей, а также сжимающее воздействие на корочку со стороны кристаллизатора в условиях, когда конусность гильзы увеличивается быстрее, чем скорость усадки затвердевающей корочки.

Наиболее эффективным методом исследования динамики затвердевания различного 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 [10,11].

В наибольшей степени вышеперечисленным требованиям отвечает химическое соединение камфен (2,2-диметил-3-метилтен-бициклогептан), которое затвердевает с образованием дендритной структуры, а также является оптически прозрачным, как в жидком, так и в твердом состоянии. Теплофизические свойства камфена были определены авторами и подробно описаны в работе [9].

При исследовании динамики роста твердой корочки и ее деформации в кристаллизаторе современной сортовой МНЛЗ решались следующие задачи: определение наиболее характерных стадий процесса затвердевания сортовой заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной МНЛЗ;

количественная оценка параметров продвижения фронта затвердевания; исследование влияния параметров охлаждения на трещинообразование в твердой корочке; изучение динамики процесса деформации затвердевшей корочки при взаимодействии с кристаллизатора, качественная и количественная оценка деформации корочки в зависимости от величины сжимающего воздействия. Было принято, что моделирование процессов затвердевания целесообразно осуществлять, имитируя поперечное сечение заготовки.

Лабораторная установка, которая представляет собой модель поперечного сечения кристаллизатора сортовой МНЛЗ и использовалась в исследовании, принципиально схожа с лабораторной установкой, описанной в работе [12], однако отличается тем, что для моделирования сжимающего воздействия, одна из граней модели выполнена подвижной (рис. 2). Процесс затвердевания наблюдался визуально и фиксировался с помощью цифровой видеокамеры. По полученным видеофайлам осуществлялась количественная оценка динамики роста и деформации затвердевшей корочки.

Критерии подобия, в соответствии с которыми определились основные параметры модели, подробно описаны в работе [9].

Сравнение количественных оценок динамики наращивания твердой корочки в зависимости от условий охлаждения производилось исходя из закона квадратного корня, при этом динамика процессов затвердевания легко оценивается по значению коэффициента затвердевания k , поскольку толщина твердой корочки для заданного времени затвердевания определяется в ходе физического моделирования.

На первом этапе исследований оценивалось влияние интенсивности охлаждения на динамику формирования твердой корочки. Для этих целей две соседние грани кристаллизатора охлаждались водой с расходом 0,818 л/мин каждая. А две другие в одном случае с расходом 0,409 л/мин., а в другом – 0,080 л/мин. Результаты экспериментов представлены на рис.2. В целом можно отметить, что в начале затвердевания величина коэффициент затвердевания k непрерывно возрастает до достижения определенного значения, которое зависит от интенсивности теплоотвода. В дальнейшем величина коэффициента затвердевания остается примерно одинаковой в достаточно большом временном интервале.

Для имитации уменьшения интенсивности теплоотвода при отхождении твердой корочки заготовки в углу (или середине грани) модели кристаллизатора наклеивался определенный слой теплоизоляционного материала. В ходе экспериментов слой теплоизоляционного материала варьировался по толщине (1 и 2 мм), что обеспечивало эффект изменения интенсивности теплоотвода. При этом следует отметить, что уменьшение интенсивности теплоотвода в значительной степени проявляется на начальных этапах формирования

твердой корочки (до толщины 6-8 мм). При моделировании уменьшения интенсивности теплоотвода в углу заготовки отмечено существенное отставание темпа продвижения фронта затвердевания при наличии теплоизоляционных прокладок на толщинах до 5-6 мм. В дальнейшем темп наращивания твердой корочки для всех случаев примерно выравнивается.

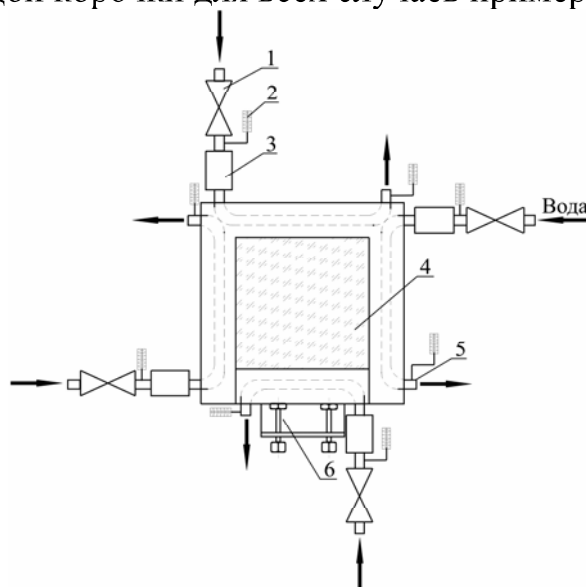


Рис.1. Общая схема лабораторной установки для моделирования процесса деформации корочки заготовки в кристаллизаторе:

- 1 – клапан регулирование подачи охлаждающей воды; 2 – термометр;
3 – расходомер; 4 – стекло; 5 – медная трубка; 6 – механизм перемещения грани модели.

Между тем, как видно из приведенных на рис.3 а, б, в фотографий, характерной особенностью процесса формирования твердой корочки в местах с уменьшенным теплоотводом (теплоизоляционные прокладки) является образование большого количества мелких трещин, которые располагаются вдоль направления отвода тепла. Размещение этих трещин носит достаточно локальный характер - по периметру зоны расположения теплоизолирующих прокладок. При этом трещины представляют собой тонкие разрывы сплошности твердой корочки, тянущиеся, видимо, вдоль границ дендритных кристаллов на глубину 5-8 мм. Количество трещин на единицу длины периметра твердой корочки возрастает с увеличением толщины теплоизолирующей прокладки. Это, вероятно, можно рассматривать как подтверждение того факта, что наиболее вероятным механизмом происхождения этих трещин являются внутренние напряжения в твердой корочке, которые формируются вследствие неравномерного ее охлаждения. При этом растрескивание происходит в тех областях твердой корочки, которые охлаждаются менее интенсивно и

имеют меньшую величину линейной усадки в сравнении с областями твердой корочки, затвердевающими с более высокой скоростью.

Эффект образования трещин в твердой корочке в случае локального уменьшения теплоотвода хорошо проявляется и при установке теплоизолирующих прокладок вдоль грани. На рис. 3 г представлен характерный результат моделирования, в котором на горизонтальной (положение на фотографии) грани устанавливалась теплоизоляционная прокладка, а на вертикальной – нет.

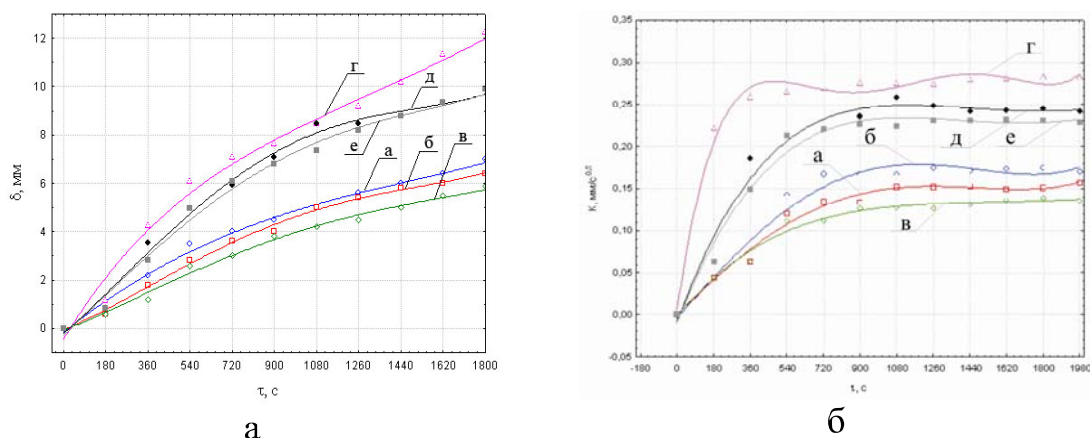


Рис.2. Динамика продвижения фронта затвердевания а и изменения коэффициента затвердевания б в зависимости от режима охлаждения граней модели: а,г – интенсивность охлаждения 0,818 л/мин; б,д – интенсивность охлаждения 0,409 л/мин; в,е – интенсивность охлаждения 0,080 л/мин.

Принимая такую схему формирования твердой корочки заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ, можно предположить, что в углах заготовки, которые отошли от поверхности гильзы кристаллизатора, может наблюдаться возникновение некоторого количества микротрещин, которые, по сути, локально разупрочняют твердый каркас. При этом вследствие действия внутренних напряжений, формирующихся в твердом каркасе в процессе затвердевания, углы заготовки, в которых имеется повышенное количество трещин, проявляют склонность к макродеформации. В результате этого заготовка в поперечном своем сечении изменяет свою конфигурацию, образуя либо ромб, либо более сложную геометрическую фигуру.

При изучении деформации корочки в условиях, когда конусность гильзы увеличивается быстрее, чем величина усадки затвердевающего металла, интерес представляют 3 основные этапа формирования заготовки:

1 этап – начало нарастания твердой корочки (до 3–4 мм) на поверхности в верхней части гильзы, которую, в большинстве случаев, изготавливают с большой конусностью [9];

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

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

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 пяти миллиметрам, 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 один миллиметр 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-го 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. После проведения эксперимента кристаллическая структура деформированной корочки не отличалась от структуры недеформированного затвердевшего модельного вещества.

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. 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.

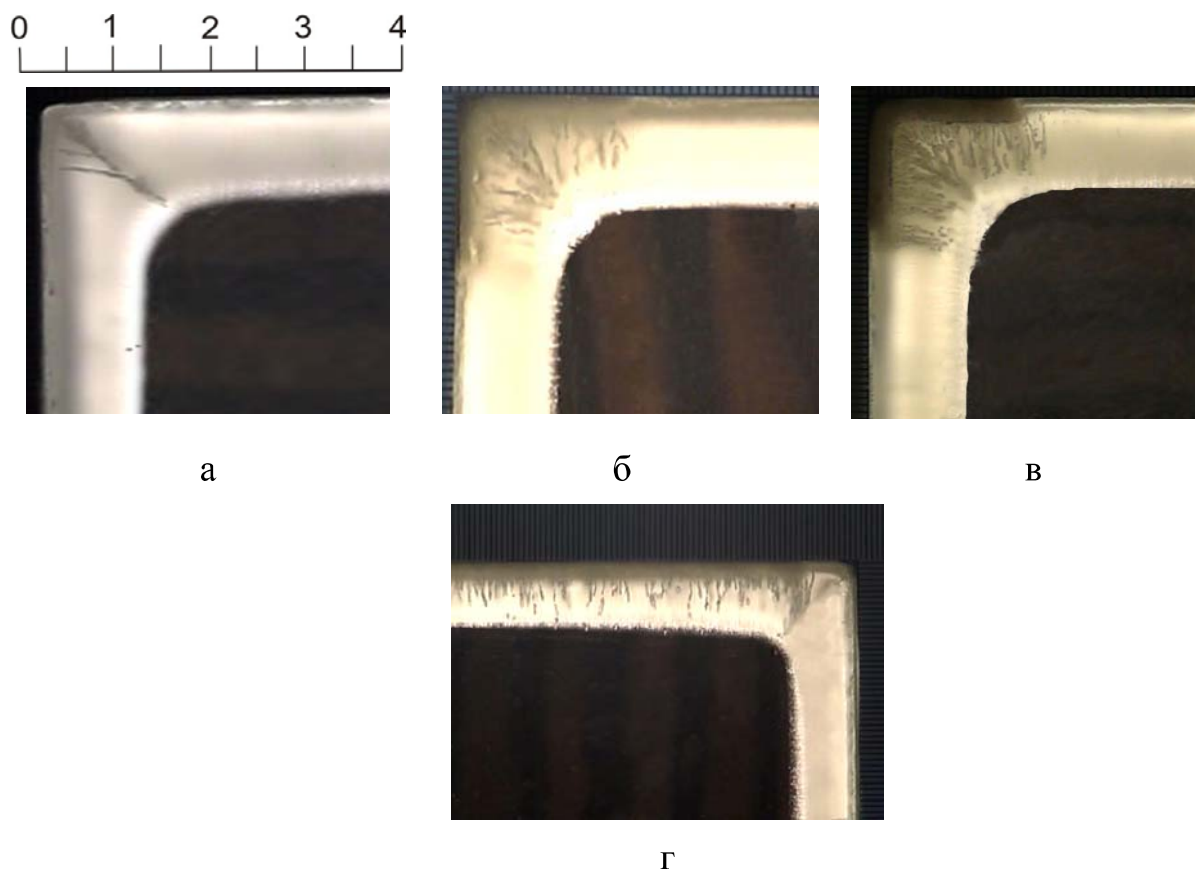


Рис. 3. Характерный вид твердой корочки заготовки после затвердевания в кристаллизаторе: а – без теплоизолятора; б и в – с теплоизоляторами толщиной 1 мм и 2 мм, установленными в углу кристаллизатора; г – с изолятором, установленном на грани кристаллизатора

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 в 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).

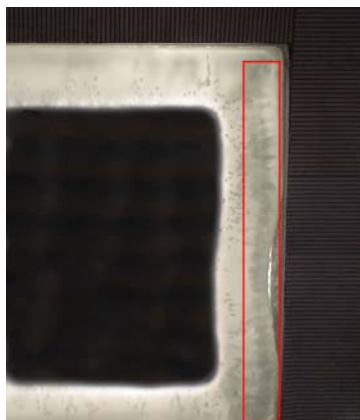


Рис. 4. Образование трещин в корочке модельного вещества толщиной 9 мм после деформации.

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.

Следовательно, полученные качественные результаты изучения процесса роста твердой корочки в кристаллизаторе могут быть использованы при проектировании внутреннего профиля скоростных гильз для разливки 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, обусловливаемую 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.

Дополнительным фактором, который может оказывать 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.

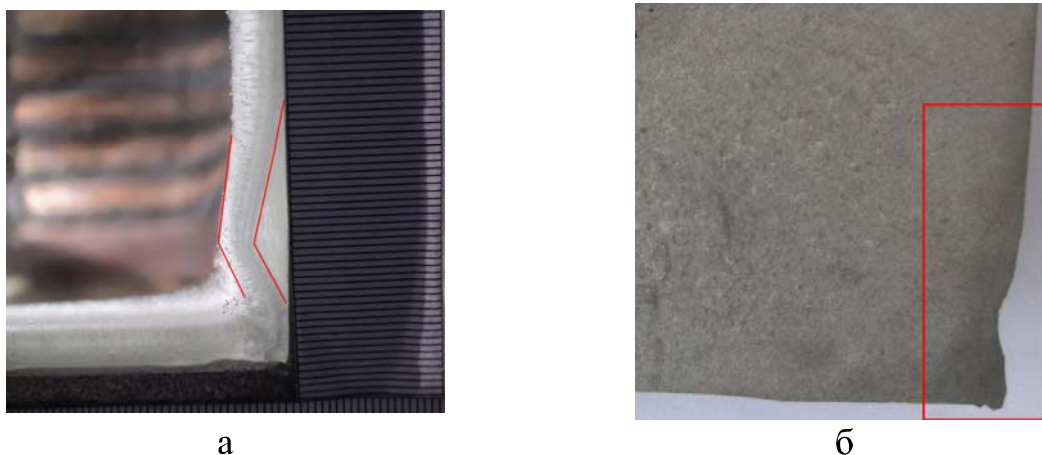


Рис. 5. Фотография корочки модельного вещества в месте деформации при наложении на нее сжимающего воздействия (а) и профиля темплета непрерывнолитой сортовой заготовки сечением 125 мм (б).

Выводы

1. Уменьшение интенсивности теплотвода на каком-либо участке твердой корочки снижает темп ее наращивания в этой зоне, что, в конечном счете, приводит к появлению достаточно большого количества трещин в твердом каркасе, что локально разупрочняет твердую оболочку заготовки и может приводить к ее деформации (короблению).

2. Неравномерное наращивание твердой корочки по периметру заготовки обуславливает формирование внутренних напряжений в твердом каркасе, что, в конечном счете, приводит к искажению профиля заготовки и к формированию таких типичных дефектов формы и поверхности как "ромбичность" и продольные подповерхностные внеугловые трещины

3. В процессе непрерывной разливки при отклонении параметров литья от номинальных формирующаяся твердая корочка заготовки может испытывать со стороны стенок гильзы кристаллизатора сжимающее воздействие, что приводит к деформации корочки заготовки и появлению внутренних трещин. Установлено, что характер и величина деформации твердой корочки имеет обратно пропорциональную зависимость от ее толщины. При этом зона деформации перемещается из приугловой

области к центру грани с увеличением толщины твердой корочки заготовки.

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.

Библиографический список:

1. Смирнов А.Н., Штепан Е.В., Смирнов Е.Н. Опыт производства сортовых заготовок для длинномерного проката // *Металл*. 2005. №1. С.44-50.
2. Wolf M. Can mini mills cope with high speed casting? // *Steel Times International*. 1989. №3. – P.16-19.
3. Хорбах У., Коккендидт Й., Юнг В. Скоростное литье сортовых заготовок через кристаллизаторы с параболической конусностью // *Черные металлы*. 1998. №5. – С.19-25.
4. *Analys of Thermo-Mechanical Behavior in Billet Casting* / J.K.Park, C.Li, V.Thomas, I.V.Samarasekera // *Proceedings 60 Electric Furnace Conference*. ISS. – Warrendale, PA, 2002. – P.669-685.
5. Высокоскоростное литье мелкосортовых заготовок на МНЛЗ с кристаллизатором «Дайэмоулд» / Ф.Виммер, Х.Тене, Л.Пекштфйнер и др. // *Сталь*. 1999. №6. – С.22-26.
6. Технологическое развитие параметров высокоскоростной разливки на сортовых МНЛЗ / А.Н.Смирнов, Г.И.Касьян, А.Я.Минц, Е.В.Штепан // *Труды Восьмого Конгресса Сталеплавильщиков*. Нижний Тагил. 18-22 Октября 2004 г. – М.: Черметинформация, 2005. – С.484-488
7. Schweikle R., Volkert A., Barbe J. High efficiency and reliability, and high casting speed on the billet casters at BSW // *5 European Continuous Casting Conference in Nice. Proceedings*. – Paris: La Revue de Metallurgie. 2004. – P.382-389.
8. Смирнов А.Н., Жибоедов Е.Ю., Лейрих И.В. Современные тенденции развития конструкции кристаллизаторов для сортовых МНЛЗ // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. №6. 2005. – С.13-17.

9. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной МНЛЗ. Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Жибоедов Е.Ю. // Процессы литья. 2009. №1. – с. 33 - 42.
10. Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях / А.Н.Смирнов, В.Л.Пилушенко, С.В.Момот, В.Н.Амитан. - Донецк: Изд-во „ВИК”. 2002. – 169 с.
12. Thomas B.G. Continuous casting: Complex Models // The Encyclopedia of Materials: Science and Technology. – Oxford: Elsevier Science Ltd. Vol.2. 2001. – pp.1599-1609.
13. Smirnov A., Ukhin V. Physical Modeling of Billet Rhomboidity Phenomena During Solidification in the CCM Mould // 3rd International Conference on Simulation and Modelling of Metallurgical Processes in Steel-making, Steelsim 2009. September 8 10, 2009, Leoben /Austria. – CD-print

© Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Подкорытов А.Л., 2010