

Физическое моделирование деформаций заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной сортовой МНЛЗ

Представлены результаты физического моделирования условий деформации твердой корочки в процессе ее формирования в кристаллизаторе и влияние на нее основных факторов. Ил. 4. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: кристаллизатор, деформация, твердая корочка, конусность, усадка, физическое моделирование

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. Прогресс в разливке сортовой заготовки достигается применением гильзовых кристаллизаторов, внутренняя полость которых имеет сложную геометрическую форму, которая в значительной степени учитывает динамику наращивания твердой корочки в кристаллизаторе (теплоотвод, скорость наращивания твердой корочки по периметру, усадку, внутренние напряжения в твердой оболочке и пр.) [1, 2].

При разливке стали со скоростью 5-7 м/мин 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]. На процесс формирования заготовки отрицательно влияет износ или деформация отдельных участков гильзы кристаллизатора [4].

Износ внутренних 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. Это следует связывать с тем, что он усредненно 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 механических 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 конусно-

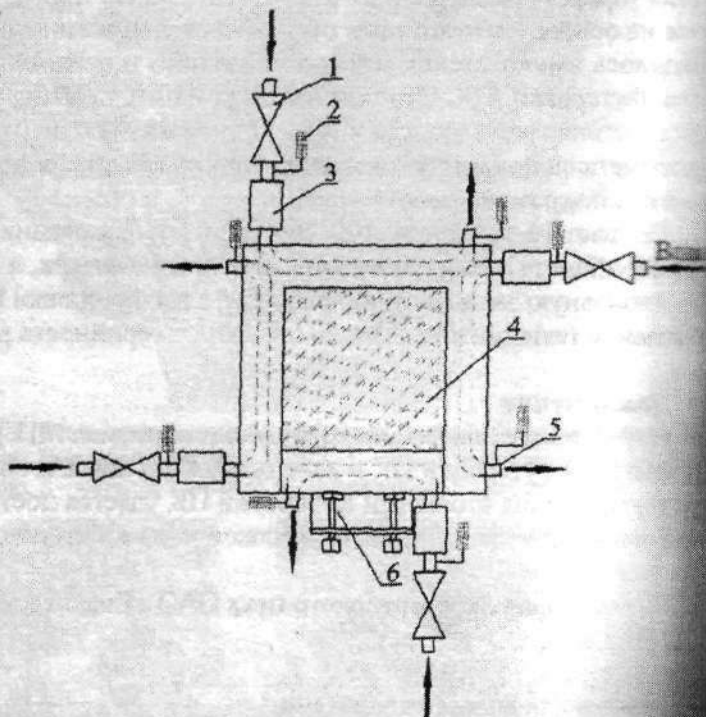


Рис. 1. Схема лабораторной установки для моделирования процесса деформации корочки заготовки в кристаллизаторе. 1 – клапан регулирования подачи охлаждающей воды; 2 – датчик температуры; 3 – расходомер; 4 – стекло; 5 – медная трубка; 6 – устройство измерения перемещения грани модели

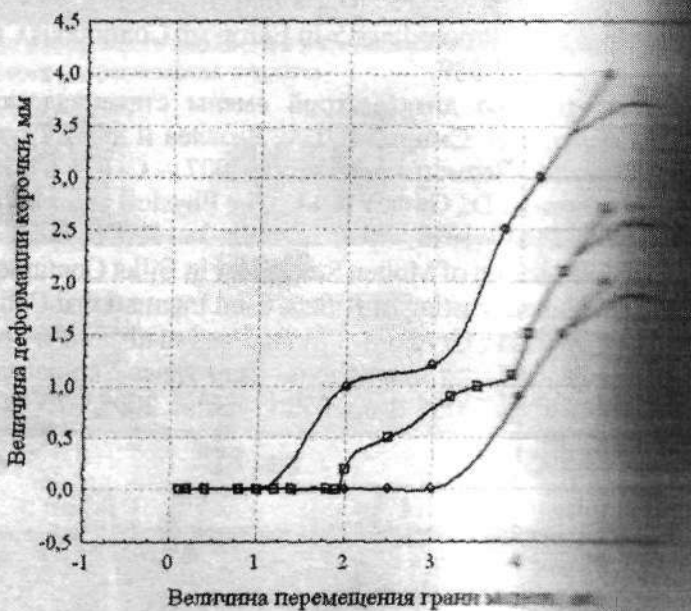


Рис. 2. Изменение величины деформации корочки заготовленного вещества при перемещении грани модели: 1 – толщина корочки 2,5 мм; 2 – толщина корочки 5 мм; 3 – толщина корочки 10 мм

сти нижней ее части для более жесткой фиксации заготовки. Эти решения успешно реализованы шведской 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 «DANIELI» 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].

Наиболее эффективным методом исследования 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]. 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-метил-бициклогептан), которое затвердевает с образованием дендритной структуры, а также является оптически прозрачным, как в жидком, так и в твердом состоянии. Теплофизические свойства камфена описаны в работе [1].

Разработанная лабораторная установка, которая представляет собой модель поперечного сечения кристаллизатора сортовой МНЛЗ, стенки которой изготовлены из алюминиевого сплава, что обеспечивает высокую интенсивность отвода тепла в поперечном сечении (рис. 1). Высота модельного слоя жидкости составляет 20 мм. Внутри модели стен кристаллизатора вмонтированы медные трубки диаметром 5 мм, через которые

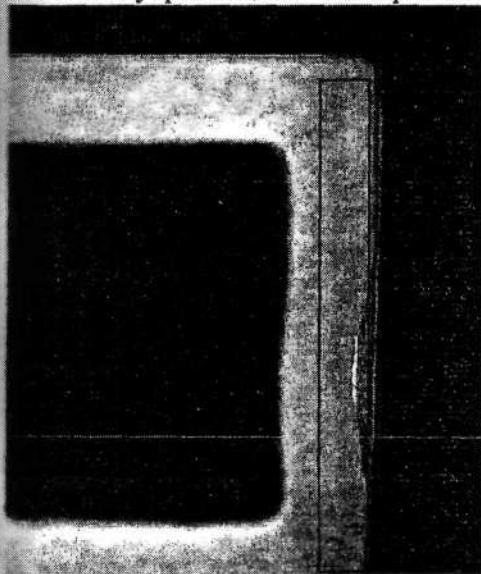


Рис. 3. Образование трещин в корочке модельного вещества толщиной 9 мм после деформации

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. 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 ($Fo = idem$). Наличие развитой двухфазной зоны учитывалось посредством эффективных значений коэффициентов температуропроводности [1].

Моделировалось затвердевание в верхней [11], средней и нижней части кристаллизатора, по 3 раза каждое при одинаковом расходе воды на одну грань 1,125 г/мин.

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/с.

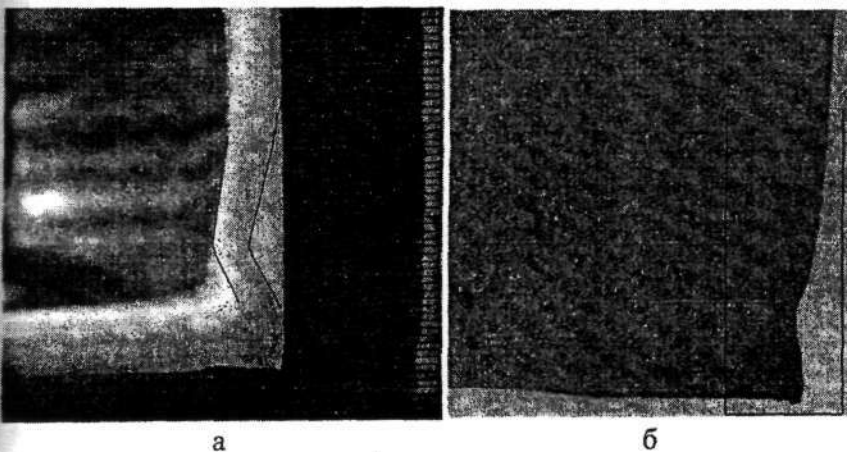


Рис. 4. Фотография корочки модельного вещества в месте деформации при наложении на нее сжимающего воздействия (а) и профиля темплета непрерывнолитой сортовой заготовки сечением 125 мм (б)

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 выгля-

дело 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 мм вызвало почти линейное увеличение деформации корочки, значение которой в конце моделирования составило 4 мм (рис. 2). 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 подвергавшихся 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. 3).

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. 4б). Полученные качественные результаты изучения процесса роста твердой корочки в кристаллизаторе могут быть использованы при проектировании внутреннего профиля гильз для разливки сортовой заготовки. 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.

По углам гильзы кристаллизатора возможна меньшая конусность, чем по граням заготовки. 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 вытягивания заготовки разливку целесообразно вести на максимальном допустимом уровне.

Выводы

Выполнено физическое моделирование затвердевания непрерывнолитой заготовки и определен его рациональный режим.

Библиографический список

1. Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Жибоедов Е.Ю. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной МНЛЗ // 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 / 85th 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.