

Министерство образования и науки Украины
Приазовский государственный технический университет
Министерство промышленной политики Украины
Академия наук высшей школы Украины

МАТЕРИАЛЫ

VIII МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

«ТЕПЛО – И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ
В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ »

Посвящается 80-летию Приазовского государственного
технического университета

Под общей редакцией
проф. докт. техн. наук В.С. Волошина
проф. докт. техн. наук П.С. Харлашина

7-9 сентября 2010 г.
г. Мариуполь

УДК: 669.045

Тепло-массообменные процессы в металлургических системах
// Материалы VIII Международной научно-технической конференции
(7-9 сентября 2010 г.) Мариуполь, ПГТУ, 2010.- 442с.

В материалах VIII Международной научно-технической конференции обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований по актуальным вопросам тепло- и массообмена в металлургических агрегатах, при охлаждении и затвердевании жидких расплавов, в жидких фазах при сварке плавлением, ресурсо-экономические проблемы производства. Особое внимание уделено состоянию и развитию фундаментальных исследований в связи с актуальными проблемами черной металлургии; газодинамике кислородных и других газовых струй, двухфазных потоков и гидродинамике жидкой ванны, плавлению твердых тел в ванне, теплофизическим и физико-химическим свойствам расплавов, коэффициентам массопереноса; совершенствованию внепечной десульфурации чугуна для обеспечения выплавки низкосернистых сталей; исследованию процессов массо- и теплопереноса в проковше современных МНЛЗ и в агрегате ковш-печь; снижению расхода и дефицитности энергоресурсов, потребляемых на производство чугуна, как основной резерв качественного повышения рентабельности черной металлургии.

Материалы конференции представляют интерес для сотрудников научно-исследовательских институтов, специалистов металлургических предприятий, научно-педагогических работников, а также аспирантов и студентов высших учебных заведений в области металлургии.

- СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДУТЬЕВОГО И ШЛАКОВОГО РЕЖИМОВ
 КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ ПРИ РЕГЛАМЕНТИРОВАННОМ
 ВВОДЕ КОМПЛЕКСНЫХ ДОБАВОК МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ
Мешалкин А.П., Камкина Л.В., Анкудинов Р.В., Колбин Н.А. (НМА Украины) 270
- ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛИ С ЗАДАННЫМ
 УРОВНЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
Стогний Ю.Д., Камкина Л.В., Стовпченко А.Н., Грищенко Ю.Н.
 (НМА Украины г. Днепропетровск) 275
- ПРОГРЕССИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ГОРЯЧЕГО РЕМОНТА ФУТЕРОВКИ
 КОНВЕРТЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕОБОЖЖЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ
Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Чернятевич И.В., Дигтярь А.Ю. 279
- МАССОПЕРЕНОС В РАСПЛАВАХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ
 ПЕРВИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ
Петров С.С., Ключник Д.Н., Пригунова А.Г. (НМАУ, г. Днепропетровск) 285
- ПРОЦЕССЫ ДИФФУЗИИ И ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА ПРИ ОБРАБОТКЕ
 РАСПЛАВОВ СИЛУМИНОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ
Петров С.С., Пригунов С.В. (НМАУ, г. Днепропетровск) 290
- Секция 2. Тепло - и массообменные процессы при охлаждении и затвердева-*
нии жидких расплавов
- МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
 РАСПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ СМЕСЕЙ
 ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА
П.С. Харлашин, Т.А. Левицкая (ПГТУ) 295
- ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
 РАЗЛИТЫХ В ИЗЛОЖНИЦЫ СЛИТКОВ КИПЯЩЕЙ СТАЛИ
Уманский А.А., Чернышева Н.А. (СибГИУ, Россия) 302
- МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОВЕДЕНИЯ ЖИДКОЙ СТАЛИ
 В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ СЛЯБОВОЙ МНЛЗ ПРИ РАБОТЕ ПЕРЕМЕННЫМ
 УРОВНЕМ
Смирнов А.Н., Верзилов А.П., Кравченко А.В. (ДонНТУ) 308
- ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ НЕПРЕРЫВНО-
 ЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ СОРТОВОЙ МНЛЗ
Смирнов А.Н., Ухин В.Е. (ДонНТУ, Украина) 314
- ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША
 МНОГОРУЧЬЕВОЙ СОРТОВОЙ МНЛЗ ПРИ РАЗЛИВКЕ
 СВЕРХДЛИННЫМИ СЕРИЯМИ
Смирнов А.Н. (ДонНТУ), *Подкорытов А.Л.* (ОАО Енакиевский МЗ),
Кравченко А.В., Верзилов А.П. (ДонНТУ, Украина) 323
- ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО
 ПОВЕРХНОСТИ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СЛЯБОВ
Федосов А.В., Казачков Е.А. (ПГТУ, Украина) 329

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ОКРУЖНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ
ШИХТЫ ЛОТКОВЫМ ЗАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Брусков А.Л. (ДонНТУ)

72

Секция 1. Тепло- и массообменные процессы в металлургических агрегатах

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И МАССЫ ПРИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РАСПЛАВА И СКРАПА

*В.Я. Бакст, П.С. Харлашин, Л.И. Тарасюк, А.Н. Яценко,
О.И. Романов* (ПГТУ)

78

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛА РАЗОГРЕТОЙ ФУТЕРОВКИ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО
КОВША ПРИ ПРОДУВКЕ СТАЛИ АРГОНОМ

Харлашин П.С., Яценко А.Н., Бакст В.Я., Гаврилова В.Г. (ПГТУ)

83

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОВШОВОГО
ШЛАКА

П.С.Харлашин, Ю.С.Коломийцева, П.А.Плохих, В.М.Бакланский (ПГТУ)

89

МЕХАНИЗМ ВЗРЫВА БРЫЗГ ЧУГУНА ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ МОНООКСИДА
УГЛЕРОДА НА ПОВЕРХНОСТИ ГРАФИТА

Кравец В.А., Попов А.Л. (ДонНАСА, Украина)

95

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РАСТВОРЕНИЯ МАГНИЯ В ЧУГУНЕ НА ЭФФЕКТИВ-
НОСТЬ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ МЕТАЛЛА

Зборицк А.М. (ДонТУ, Украина)

102

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ
ПЕЧИ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

Туяхов А.И., Жук В.Л. (ДонТУ, Украина) *Анищенко Н.Ф.* (ОАО НПП
«Техмет», Украина), *Сысоев П.В., Симоненко Л.Г.* (ДонНТУ, Украина)

108

АНАЛИЗ РАСХОДОВАНИЯ ТОКОПОДВОДЯЩИХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ
ПРОЦЕССА ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Проценко М.Ю., Куберский С.В., Эссельбах С.Б., Семирягин С.В.
(Донбасский ГТУ, Украина)

112

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОГО
СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ АВТОЛИСТОВЫХ СТАЛЕЙ

Кузнецов Д.Ю., Куберский С.В. (Донбасский ГТУ, Украина), *Ямполь А.И.*
(ОАО «Алческий МК», Украина)

118

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА
ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАРГАНЦА

Куберский С.В. (Донбасский ГТУ, Украина)

123

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ СОРТОВОЙ МНЛЗ

Смирнов А.Н., Ухин В.Е. (ДонНТУ, Украина)

Рассмотрены существующие подходы к обеспечению высокоскоростной непрерывной разливки сортовой заготовки. Представлены результаты физического моделирования процесса формирования твердой корочки в кристаллизаторе и установлены основные факторы, влияющие на темп ее наращивания. Выполнен сравнительный анализ влияния интенсивности теплотвода на характер формирования твердой корочки в кристаллизаторе.

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.[3-6]

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.) [7,8]. Однако реальные условия эксплуатации гильз показывают, что так называемый параболический профиль гильз не всегда в полной мере соответствует оптимальным условиям разливки. Для обеспечения высокой эффективности разливки необходимо учитывать концептуальные подходы в конструкции гильзы кристаллизатора, описанные в работе [9], непосредственно в процессе литья, что наиболее важно в случае отклонения технологических параметров от номинальных.

Цель настоящей статьи заключается в идентификации основных процессов и явлений, которые сопровождают формирование твердой корочки заготовки в кристаллизаторе и исследование влияния на процесс наращивания твердой корочки различного рода возмущений, имеющих периодический и несимметричный характер. В качестве основных возмущающих факторов, влияющих на процесс формирования твердой корочки, были приняты неравномерный отвод тепла по грани и в углах заготовки, а также неравномерный отвод тепла, связанный либо с износом части внутренней поверхности кристаллизатора, либо с отхождением поверхности заготовки от поверхности гильзы кристаллизатора вследствие несоответствия их профилей.

Наиболее эффективным методом исследования динамики затвердевания различного рода слитков является физическое моделирование, поскольку в этом случае удается контролировать отвод тепла от исследуемого объекта в совокупности с визуализацией основных процессов, сопровождающих наращивание твердой фазы [10]. При этом особое значение приобретает выбор моделирующего вещества, которое должно не только обладать оптической прозрачностью, но также иметь определенную совокупность теплофизических характеристик, позволяющих обеспечить соответствующую систему критериев подобия.

Как показывает анализ, в наибольшей степени вышперечисленным требованиям удовлетворяет химическое соединение камфен (2,2-диметил-3-метилен-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.

Таблица.1. Некоторые физические и теплофизические свойства камфена

Температура солидус, °С	Температура ликвидуса, °С	Теплота кристалли- зации, кДж/кг	Теплоемкость, кДж/(кг·К)		Темпера- туропро- водность, м ² /с	Поверх- ностное натяже- ние, Н/м	Кинема- тическая вязкость. м ² /с
			жид- кий	твердый			
33	35	40,2	2,4	2,1	$1,3 \cdot 10^{-8}$	0,021	$7,2 \cdot 10^{-6}$

При физическом моделировании процессов затвердевания непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной 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. Было принято, что моделирование процессов затвердевания целесообразно осуществлять, имитируя поперечное сечение заготовки.

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис.1. Расплав камфена затвердевает в модели поперечного сечения кристаллизатора сортовой МНЛЗ, который изготовлен из алюминиевого сплава (рис.1, поз.1), что обеспечивает высокую интенсивность отвода тепла. Высота модельного слоя жидкости составляет 20 мм. Внутри модели кристаллизатора смонтированы медные трубки (рис.1, поз.2) диаметром 5 мм, через которые с определенным расходом пропускается охлаждающая вода. К нижней части модели приклеено прозрачное стекло (рис.1, поз.3), которое позволяет визуализировать процессы за-

твёрдевания 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 $42 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Среднее значение температуры воды для охлаждения стенок модели составляло $18-20^\circ\text{C}$. Процесс затвердевания наблюдался визуально и фиксировался с помощью цифровой видеокамеры. По полученным видеофайлам осуществлялась количественная оценка кинетики затвердевания и трещинообразования в затвердевшей корочке.

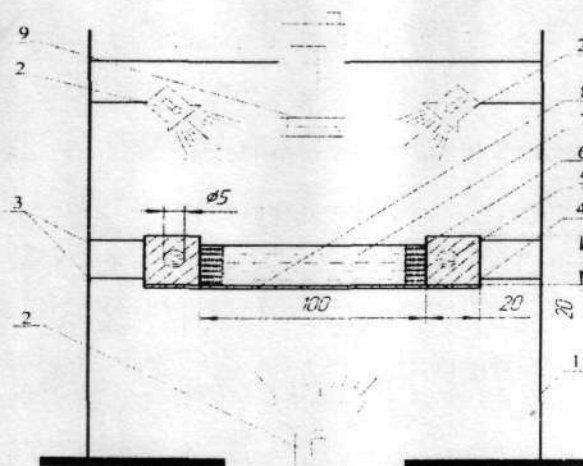


Рис.1. – Общая схема лабораторной установки для моделирования процесса затвердевания заготовки в кристаллизаторе: 1 – фиксирующая рама; 2 – осветительные лампы; 3 – фиксаторы для поддержания кристаллизатора; 4 – кристаллизатор; 5 – отверстия, для пропускания охлаждающей воды; 6 – твердый слой камфена, намерзший в ходе затвердевания; 7 – жидкий объем моделирующего вещества; 8 – прозрачное органическое стекло с низкой теплопроводностью; 9 – видеокамера.

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 $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Газовый зазор между кристаллизатором и затвердевающей корочкой моделировался посредством наклеивания на внутреннюю сторону стенки или угла модели теплоизолирующей прокладки определенной толщины.

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_t определяли исходя из идентичности критерия Фурье ($Fo = idem$). При этом наличие развитой двухфазной зоны

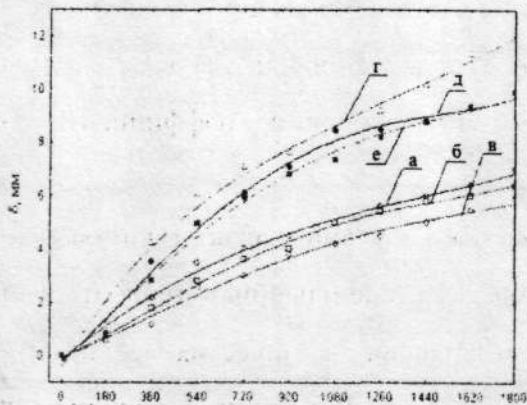
учитывалось посредством эффективных значений коэффициентов температуропроводности. Для осуществления сравнительных количественных оценок динамики наращивания твердой корочки в зависимости от условий охлаждения использовалась широко известная эмпирическая зависимость:

$$\delta = k \times \sqrt{\tau} \quad (3)$$

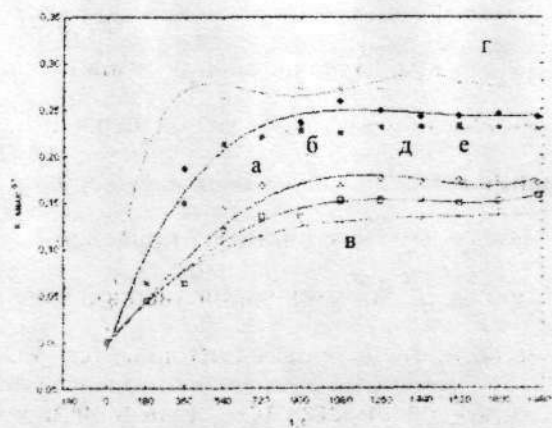
где δ – толщина твердой корочки; τ – время затвердевания; k – коэффициент затвердевания, определяемый экспериментально.

Установлено, что в ходе моделирования достаточно адекватно воспроизводятся процессы наращивания твердой корочки по грани и в углах заготовки. Исследования выполнялись последовательно в несколько этапов, что предполагало возможность дифференцированной количественной оценки основных параметров, характеризующих процесс наращивания твердой корочки в кристаллизаторе.

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 (рис.2.) Для всех исследуемых ситуаций можно выделить два наиболее характерных этапа затвердевания. На первом этапе (начало 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, поэтому сравнительные оценки динамики процессов формирования твердой корочки выполнялись именно в этом временном интервале.



а



б

Рис.2. – Динамика продвижения фронта затвердевания a и изменения коэффициента затвердевания b 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.

В ходе экспериментов установлено, что при уменьшении расхода жидкости на охлаждение стенок модели на 50% толщина твердой корочки моделирующего вещества в середине грани уменьшается соответственно на 6,0-6,5%, а коэффициент затвердевания - на 14,0-14,5%. При тех же условиях для угла модели толщина корочки снизилась на 17,5-18,0%, а коэффициент затвердевания - на 21,0-21,5%. В случае же уменьшения расхода жидкости до 0,08 л/мин толщина затвердевшего слоя уменьшилась соответственно на 14,0-15,0% и 17-18%, а коэффициент затвердевания - на 18-19% и 19-20%. Таким образом, при изменении условий теплоотвода на физической модели удалось идентифицировать соответствующее изменение темпа прироста твердой корочки. При этом неравномерная толщина твердой корочки по различным участкам периметра заготовки обуславливает развитие внутренних растягивающих и сжимающих напряжений, которые приводят к появлению трещин в твердой фазе.

Принимая во внимание тот факт, что в практике непрерывной разливки может наблюдаться отделение части твердой корочки от внутренней поверхности гильзы (в силу искажения профиля или износа отдельных участков поверхности гильзы), на втором этапе исследований были выполнены эксперименты для оценки влияния газового зазора на динамику затвердевания заготовки и трещинообразование в корочке. При этом рассматривались две наиболее вероятные ситуации: образование газового зазора в углу кристаллизатора и образование газового зазора вдоль грани кристаллизатора.

Для имитации уменьшения интенсивности теплоотвода при отхождении твердой корочки заготовки в углу (или середине грани) модели кристаллизатора наклеивался определенный слой теплоизоляционного материала (1 и 2 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, что подтверждается близкими значениями коэффициента затвердевания k .

Между тем, как видно из приведенных на рис.3 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 и они 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, что можно рассматривать как подтверждение то-

го факта, что наиболее вероятным механизмом происхождения этих трещин являются внутренние напряжения в твердой корочке, которые формируются вследствие неравномерного ее охлаждения.

Эффект образования трещин в твердой корочке в случае локального уменьшения теплоотвода хорошо проявляется и при установке теплоизолирующих прокладок вдоль грани.

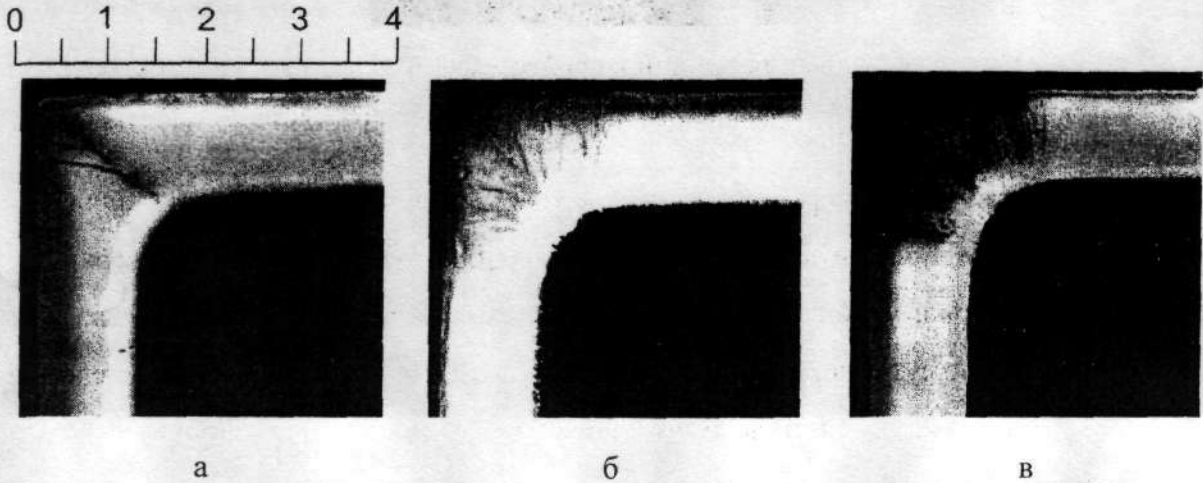


Рис. 3 – Характерный вид твердой корочки заготовки после затвердевания в кристаллизаторе: *а* – без теплоизолятора; *б* и *в* – с теплоизоляторами толщиной 1 мм и 2 мм, установленными в углу кристаллизатора.

На рис.4 представлен характерный результат моделирования, в котором на горизонтальной (положение на фотографии) грани устанавливалась теплоизоляционная прокладка, а на вертикальной – нет. Так, при толщине твердой корочки 4,5 мм и 6,0 мм (охлаждение без теплоизоляторов) уменьшение ее толщины посередине грани (с изоляционным слоем) составило соответственно 2,25 и 1,4 раза (рис.2). В дальнейшем фронт затвердевания продвигался примерно с одинаковой скоростью для всех исследуемых случаев, что, вероятно, объясняется увеличением термического сопротивления отводу тепла через твердую корочку.

В целом выполненные на физической модели исследования позволили установить тот факт, что в случае локального изменения величины интенсивности теплоотвода от твердой корочки заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ в ней может образовываться большое количество трещин, локально расположенных по периметру заготовки в местах с меньшей интенсивностью теплоотвода. Причиной растрескивания твердой корочки, видимо, следует считать неравномерную усадку металла по периметру заготовки, а также низкой прочностью и пластичностью твердой корочки в области температур затвердевания [11]. При этом трещины появляются в зонах с меньшей усадкой вследствие появления в них растягивающих напряжений, формирующихся за счет повышенной усадки в соседних зонах.

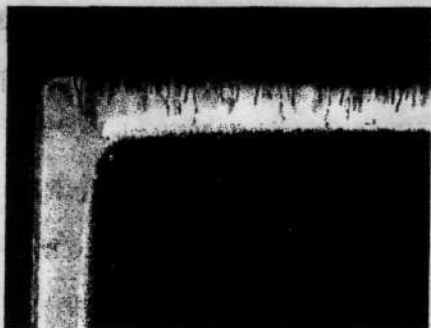


Рис.4. – Эффект образования трещин в процессе формирования твердой корочки с изолятором, установленном на грани кристаллизатора

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 этом в углах заготовки могут образовываться диагональные макротрещины, которые делают непрерывнолитую заготовку некондиционной.

В целом рассмотренные явления трещинообразования в твердой корочке непрерывнолитой заготовки находятся в прямой взаимосвязи с условиями разливки и тепловой работы кристаллизатора. Безусловно, в значительной степени они могут быть предотвращены в случае, если поверхность заготовки будет плотно прилегать к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора на всем пути ее движения. Соответственно при создании оптимальной конфигурации внутренней полости гильзы кристаллизатора необходимо учитывать особенности усадки твердой корочки как по поперечному сечению заготовки, так и по высоте кристаллизатора. Принимая во внимание тот факт, что трещины начинают зарождаться в твердой корочке заготовки уже в верхней части гильзы, на наш взгляд представляется целесообразным предусматривать конструкционную конусность гильзы в верхней ее части несколько большую, чем усадочная конусность для этой зоны заготовки. Кроме того, достаточно очевидным представляется и тот факт, что усадочная конусность гильзы в ее углах должна быть существенно меньше, чем вдоль ее грани.

Выводы

1. Нарастание твердой корочки в кристаллизаторе МНЛЗ происходит достаточно неравномерно. При этом коэффициент затвердевания k в начале формирования твердой корочки непрерывно возрастает, а затем имеет примерно постоянное значение. Темп на-

ращивания твердой корочки в углах заготовки примерно в 1,5-2 раза превышает темп прироста твердой корочки по грани, что следует объяснять двухмерным характером отвода тепла в углу кристаллизатора.

2. 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 обложку заготовки и может приводить к ее деформации (короблению).

3. 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

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. Гильзовые кристаллизаторы высокоскоростных сортовых МНЛЗ / В.Б. Ганкин, Б.А.Спивак, Г.И.Николаев и др. статья ВНИИМЕТМАШ // *Тяжелое машиностроение.* 1997. №5. – с.19-22.
5. Analys of Thermo-Mechanical Behavior in Billet Casting / J.K.Park, C.Li, B.Thomas, I.V.Samarasekera // *Proceedings 60th Electric Furnace Conference.* ISS. – Warrendale, PA, 2002. – P.669-685.
6. Высокоскоростное литье мелкосортовых заготовок на МНЛЗ с кристаллизатором «Дайэмоулд» / Ф.Виммер, Х.Тене, Л.Пекштфйнер и др. // *Сталь.* 1999. №6. – С.22-26.
7. 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

8. Schweikle R., Volkert A., Barbe J. High efficiency and reliability, and high casting speed on the billet casters at BSW // 5th European Continuous Casting Conference in Nice. Proceedings. – Paris: La Revue de Metallurgie. 2004. – P.382-389.
9. 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.
10. 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.
11. Strategies for coupled analyses of thermal strain history during continuous solidification processes / J.R.Boehmer, G.Funk, M.Jordan, F.N.Fett // *Advanced in Engineering Software*. 1998. Vol.29. No.7-9. – P.679-697.