

1. Медовар Б. И., Миринский Г. С., Шевцов В. Л. Центробежное электрошлаковое литье. — Киев: Знание, 1983. — 48 с.
2. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, В. М. Мартын и др. / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара — Киев: Наук. думка, 1988. — 216 с.
3. Электрошлаковый металл / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
4. Участок электрошлаковых технологий на Государственном предприятии «Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря» - «Машпроект» / А. В. Горячек, В. В. Романов, С. В. Блохин и др. // Металлургия машиностроения. — 2007. — № 6. — С. 34-36.

Поступила 15.07.2008

УДК 669.18-412: 621746.6

А. Н. Смирнов, В. Е. Ухин, Е. Ю. Жибоедов*

Донецкий национальный технический университет МОН Украины, Донецк

*ОАО «Енакиевский металлургический завод», Енакиево

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ СОРТОВОЙ ЗАГОТОВКИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МНЛЗ

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 теплоотвода на характер формирования твердой корочки в кристаллизаторе. Показано влияние локального изменения теплоотвода от поверхности заготовки на изменение ее конфигурации.

Розглянуті існуючі підходи до забезпечення високошвидкісного безперервного розливання сортової заготовки. Представлені результати фізичного моделювання процесу формування твердої скоринки в кристалізаторі й встановлені основні фактори, що впливають на темп її нарощування. Виконано порівняльний аналіз впливу інтенсивності тепловідводу на характер формування твердої скоринки в кристалізаторі. Показано вплив локальної зміни тепловідводу від поверхні заготовки на зміну її конфігурації.

Existing approaches for high-speed continuous billet casting ensuring are considered. The results of physical simulation of solid shell formation the mould are presented and the major factors that have an influence on its growth rate build-up are determined. The comparative analysis of heat removal intensity influence on the nature of solid shell formation in the mould is made. The influence of local heat removal changing from billet surface on its reconfiguration is shown.

Ключевые слова: заготовка, разливка, непрерывное литье, кристаллизатор, физическое моделирование.

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 трещин [1-3]. В последние два десятилетия основной прогресс в разливке сортовой заготовки достигается при использовании гильзовых кристаллизаторов, внутренняя полость которых имеет сложную геометрическую форму и

в значительной степени учитывает особенности наращивания твердой корочки в кристаллизаторе (теплоотвод, скорость наращивания твердой корочки по периметру, усадку, внутренние напряжения в твердой оболочке и другие) [4-7]. На практике фирмы-производители гильз кристаллизаторов для сортовых МНЛЗ при разработке конфигурации их внутренних профилей используют определенные конструкционные и технологические соображения, которые далеко не всегда декларируются в журнальных статьях и патентах, что затрудняет выбор рациональных параметров литья применительно к конкретным технологическим условиям.

Не выполняя углубленного анализа известных конфигураций гильз, отметим лишь, что у большинства производителей нижняя половина гильзы представляет собой квази-параболический профиль, рассчитанный, видимо, для определенных технологических условий (скорость разливки, химический состав стали и другие) [8, 9]. 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 [10]. 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.

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 [11-13]. 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. 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-метил-бициклопентан), 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.

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.

Таблица 1. Некоторые физические и теплофизические свойства камфена

Температура солидус, °С	Температура ликвидус, °С	Теплота кристаллизации, кДж/кг	Теплоемкость, кДж/(кг·К)		Температуропроводность, м ² /с	Поверхностное натяжение, Н/м	Кинематическая вязкость, м ² /с
			жидкий	твердый			
33	35	40,2	2,4	2,1	$1,3 \cdot 10^{-8}$	0,021	$7,2 \cdot 10^{-6}$

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, 1), что обеспечивает высокую интенсивность отвода тепла. Высота модельного слоя жидкости составляет 20 мм. Внутри модели кристаллизатора вмонтированы медные трубки (рис. 1, 2) диаметром 5 мм, через которые с определенным расходом пропускается охлаждающая вода. К нижней части модели приклеено прозрачное стекло (рис. 1, 3), 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 $42 \pm 0,5$ °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.

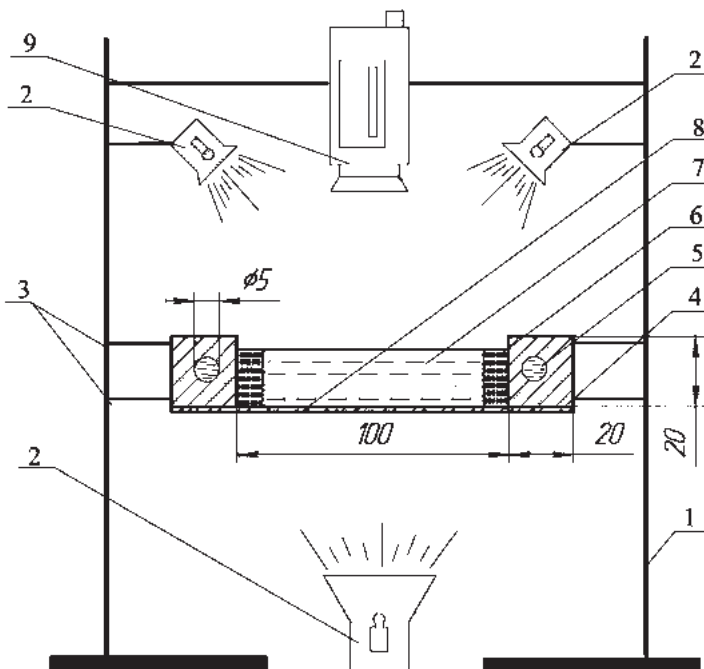


Рис. 1. Общая схема лабораторной установки для моделирования процесса затвердевания заготовки в кристаллизаторе: 1 – фиксирующая рама; 2 – осветительные лампы; 3 – фиксаторы для поддержания кристаллизатора; 4 – кристаллизатор; 5 – отверстия для пропускания охлаждающей воды; 6 – твердый слой камфена, 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 $\pm 0,1$ °С. 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_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 теплопроводности, соответственно, моделирующего вещества и стали.

При этом наличие развитой двухфазной зоны учитывалось посредством эффективных значений коэффициентов теплопроводности, 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, °С.

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.

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.

В соответствии с выполненными качественными и количественными оценками 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. Результаты экспериментов представлены на рис. 2. В целом для всех исследуемых ситуаций можно выделить два наиболее характерных этапа затвердевания. На первом этапе (начало затвердевания) величина коэффициента затвердевания k непрерывно растет до достижения определенного значения, которое зависит от интенсивности теплоотвода. В дальнейшем величина коэффициента затвердевания остается примерно одинаковой в достаточно большом временном интервале. Можно принять, что на этом участке процесс наращивания твердой корочки характеризуется высокой степенью стабильности. Поэтому сравнительные оценки динамики процессов формирования твердой корочки выполнялись именно в этом временном интервале.

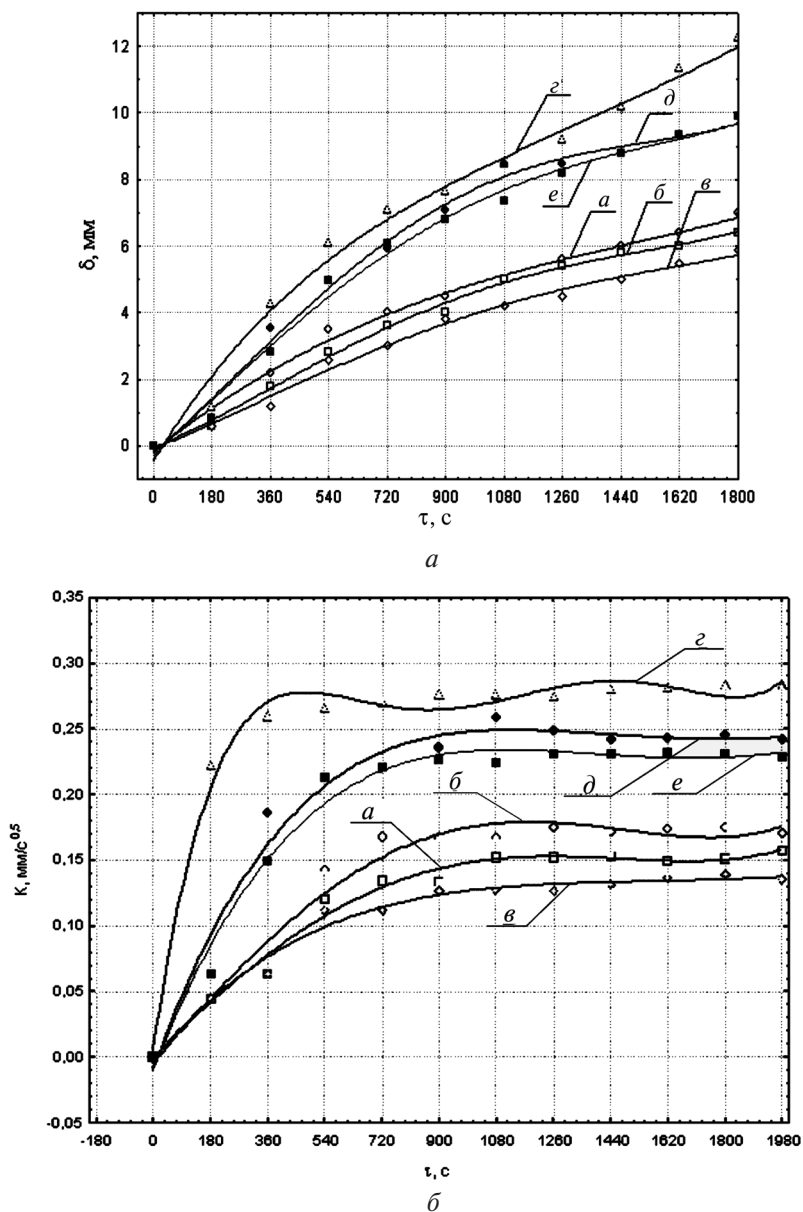


Рис. 2. Динамика продвижения фронта затвердевания (а) и изменения коэффициента затвердевания (б) в зависимости от режима охлаждения граней модели: а, а' – интенсивность охлаждения 0,818 л/мин; б, б' – интенсивность охлаждения 0,409 л/мин; в, в' – интенсивность охлаждения 0,080 л/мин

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. В ходе экспериментов слой теплоизоляционного материала варьировался по толщине (1 и 2 мм), что обеспечивало эффект изменения интенсивности теплоотвода. Обобщая приведенные в табл. 2 данные относительно изменения толщины твердой корочки для различных условий, 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, что подтверждается близкими значениями коэффициента затвердевания k .

Между тем, как видно из приведенных фотографий (рис. 3), 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.

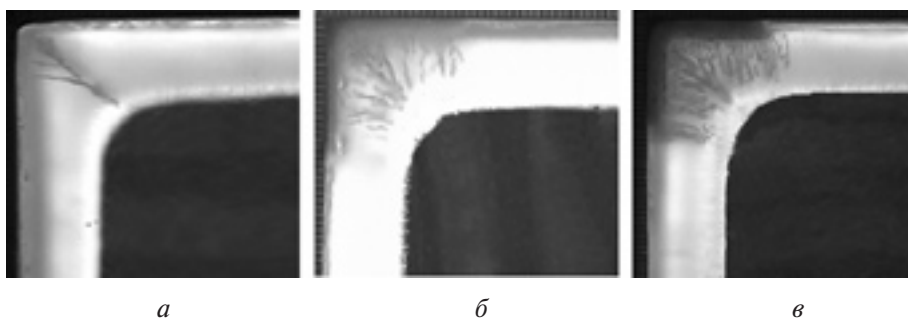


Рис. 3. Характерный вид твердой корочки заготовки после затвердевания в кристаллизаторе: *a* — без теплоизолятора; *б* и *в* — с теплоизоляторами толщиной 1 и 2 мм, установленными в углу кристаллизатора

Эффект образования трещин в твердой корочке в случае локального уменьшения теплоотвода хорошо проявляется и при установке теплоизолирующих прокладок вдоль грани. На рис. 4 представлен характерный результат моделирования, в котором на горизонтальной (положение на фотографии) грани устанавливалась теплоизоляционная

Таблица 2. Некоторые экспериментальные данные по наращиванию твердой корочки и величине коэффициента затвердевания k в зависимости от условий отвода тепла

Значения величин	Угол										Середина грани					
	время от начала затвердевания, с															
	540	720	900	1080	1260	1440	1620	540	720	900	1080	1260	1440	1620		
Толщина корочки с интенсивностью охлаждения $0,818 \text{ л/мин}$, мм	6,1	7,1	7,6	8,5	9,2	10,2	11,3	3,5	4,0	4,5	5,0	5,6	6,0	6,4		
Коэффициент затвердевания k с интенсивностью охлаждения $0,818 \text{ л/мин}$, мм/ $\text{с}^{0,5}$	0,26	0,27	0,28	0,27	0,27	0,28	0,28	0,14	0,17	0,17	0,17	0,18	0,17	0,17		
Толщина корочки с одним слоем теплоизолятора, 1 мм	2,8	4,9	6,4	7,4	8,8	9,9	11,3	0,2	1,0	2,0	2,5	3,5	4,2	5,0		
Толщина корочки с двумя слоями теплоизолятора, 2 мм	2,5	4,2	5,7	7,1	8,5	9,9	11,3	-	-	-	-	-	-	-		
Коэффициент затвердевания k с одним слоем теплоизолятора	0,12	0,19	0,21	0,22	0,25	0,26	0,28	0,04	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12	0,13		
Коэффициент затвердевания k с двумя слоями теплоизолятора	0,11	0,16	0,19	0,22	0,24	0,26	0,28	-	-	-	-	-	-	-		

прокладка, а на вертикальной — нет. Так, при толщине твердой корочки 4,5 и 6,0 мм (охлаждение без теплоизоляторов) уменьшение ее толщины посередине грани (с изоляционным слоем) составило соответственно 2,25 и 1,4 раза (см. табл. 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.

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 низкую прочность и пластичность твердой корочки в области температур затвердевания [14]. При этом трещины появляются в зонах с меньшей усадкой вследствие появления в них растягивающих напряжений, формирующихся за счет повышенной усадки в соседних зонах.

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, как видно из рис. 5, в углах заготовки могут образовываться диагональные макротрещины, которые делают непрерывнолитую заготовку некондиционной.

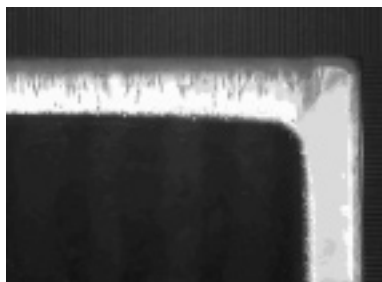


Рис. 4. Эффект образования трещин в процессе формирования твердой корочки с изолятором, установленном на грани кристаллизатора

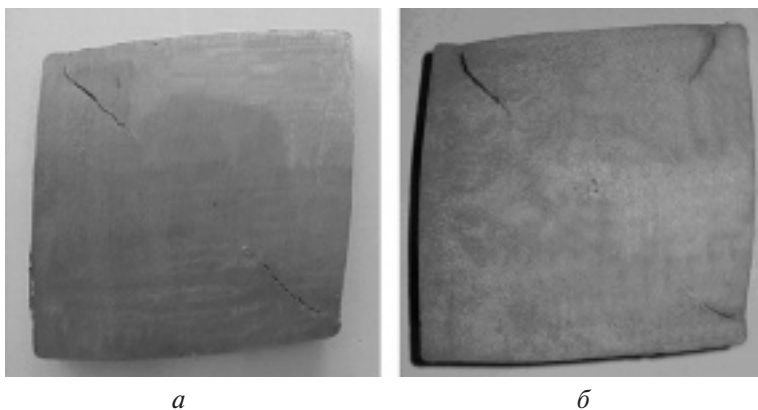


Рис. 5. Характерное расположение диагональных трещин на поперечных темплетях (квадрат 125 мм) сортовой заготовки: а — 18 мм, б — 16 мм (ромбичность)

Рассмотренные явления трещинообразования в твердой корочке непрерывнолитой заготовки в целом находятся в прямой взаимосвязи с условиями разливки и тепловой работы кристаллизатора. Они могут быть предотвращены в значительной степени, если поверхность заготовки будет плотно прилегать к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора на всем пути ее движения. При создании оптимальной конфигурации вну-

тренней 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, целесообразнее конструкционную конусность гильзы в верхней ее части предусматривать несколько большую, чем усадочная конусность для этой зоны заготовки. Кроме того, усадочная конусность гильзы в ее углах должна быть существенно меньше, чем вдоль ее грани.

На практике же определенный внутренний профиль гильзы используется для широкого спектра марок сталей, имеющих различный коэффициент линейной и объемной усадок. Кроме того, на величину скорости вытяжки заготовки могут накладываться дополнительные технологические ограничения. В то же время в процессе разлива могут изменяться скорость литья (например, вследствие износа внутренней полости стаканодозатора или падения уровня металла в промковше в ходе замены сталеразливочных ковшей), а также положение уровня металла в кристаллизаторе. Все это может привести к существенному отклонению профиля твердой корочки заготовки от внутреннего профиля гильзы, что создает условия для повышенного износа локальных участков гильзы кристаллизатора.

Выводы

- Нарастание твердой корочки в кристаллизаторе МНЛЗ происходит достаточно не равномерно. При этом коэффициент затвердевания k в начале формирования твердой корочки непрерывно возрастает, а затем имеет примерно постоянное значение. Темп нарастания твердой корочки в углах заготовки почти в 1,5-2,0 раза превышает темп прироста твердой корочки по грани, что объясняется двухмерным характером отвода тепла в углу кристаллизатора.

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

- Неравномерное нарастание твердой корочки по периметру заготовки обуславливает формирование внутренних напряжений в твердом каркасе, что приводит к искажению профиля заготовки и формированию таких типичных дефектов формы и поверхности, как «ромбичность» и продольные подповерхностные угловые трещины.

Список литературы

1. Смирнов А. Н., Штепан Е. В., Смирнов Е. Н. Опыт производства сортовых заготовок для длинномерного проката // Металл. — 2005. — № 1. — С. 44-50.
2. Шалимов А. Г. Высокоскоростная непрерывная отливка стальных заготовок // ОАО «Черметинформация». Приложение «Сталеплавильное производство». Новости черной металлургии за рубежом. — М.: Черметинформация, 2003. — С. 3-21.
3. Wolf M. Can mini mills cope with high speed casting? // Steel Times International. — 1989. — № 3. — P. 16-19.
4. Хорбах У., Коккендидт Й., Юнг В. Скоростное литье сортовых заготовок через кристаллизаторы с параболической конусностью // Чер. металлы. — 1998. — № 5. — С. 19-25.
5. Гильзовые кристаллизаторы высокоскоростных сортовых МНЛЗ / В. Б. Ганкин, Б. А. Спивак, Г. И. Николаев и др. // Тяжелое машиностроение. — 1997. — № 5. — С. 19-22.
6. Analysis of Thermo-Mechanical Behavior in Billet Casting / J. K. Park, C. Li, B. Thomas, I. V. Samarasakera // Proceedings 60th Electric Furnace Conference. ISS. — Warrendale, PA, 2002. — P. 669-685.
7. Высокоскоростное литье мелкосортовых заготовок на МНЛЗ с кристаллизатором «Дайэмоулд» /Ф. Виммер, Х. Тене, Л. Пекштфайнер и др. // Сталь. — 1999. — № 6. — С. 22-26.
8. Технологическое развитие параметров высокоскоростной разливки на сортовых МНЛЗ / А. Н. Смирнов, Г. И. Касьян, А. Я. Минц, Е. В. Штепан // Труды VIII Конгресса Сталеплавильщиков. Нижний Тагил. 18-22 Октября 2004 г. — М.: Черметинформация, 2005. — С. 484-488
9. 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 Metalurgie, 2004. — P. 382-389.

10. *Смирнов А. Н., Жибедов Е. Ю., Лейрих И. В.* Современные тенденции развития конструкции кристаллизаторов для сортовых МНЛЗ // Металлургическая и горнорудная пром-сть, 2005. – № 6. – С. 13-17.
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., Ефимов В. А., Нурадинов А. С.* Процессы формирования отливок и их моделирование. – М.: Машиностроение, 2001. – 208 с.
13. *Thomas B. G.* Continuous casting: Complex Models // The Encyclopedia of Materials: Science and Technology. – Oxford: Elsevier Science Ltd, 2001. – Vol. 2. – P. 1599-1609.
14. 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, № 7-9. – P. 679-697.

Поступила 04.09.2007

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ И ПОДПИСЧИКОВ!

С 1 января 2009 г. редакция журнала «Металл и литье Украины» изменила адрес.

Статьи для печати в журнале «Металл и литье Украины» необходимо высылать по адресу: Украина, 03680, г. Киев-142, пр. Вернадского, 34/1, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины.

**Телефоны: (044) 424-12-50, 459-50-29; факс: (044) 424-35-15,
E-mail: mlu@ptima.kiev.ua**

Продолжается подписка журнала на 2009 год

Для того чтобы подписаться на журнал через редакцию, необходимо направить письмо-запрос или факс в адрес редакции. Счет-фактура согласно запросу высылается письмом или по факсу.

Стоимость одного журнала – 28 грн.

Годовая подписка – 336 грн. (для Украины).

Годовая подписка для зарубежных стран – 90 \$.

Редакция может предоставить электронную версию журнала на компакт-диске.

Редакция также может подготовить заказной номер журнала

*Ориентировочная стоимость заказного номера - 6750 грн.
(объем до 4 уч. - изд. л.)*

*Ориентировочная стоимость заказного
спаренного номера – 1300 грн.
(объем до 8 уч. - изд. л.)*