

## Особенности деформации твердой корочки заготовки в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ

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

*С применением разработанной математической модели выполнены исследования особенностей деформации твердой корочки заготовки в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ. Рассмотрены и смоделированы случаи искажения геометрической формы заготовки, которые часто встречаются на практике вследствие нарушения условий разливки и тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ.*

**Ключевые слова:** разливка стали, МНЛЗ, кристаллизатор, твердая корочка, термические напряжения, деформация, заготовка, математическая модель

Разливка стали на сортовые непрерывнолитые заготовки имеет целый ряд особенностей, что в ряде случаев и определяет их качество. Одной из таких особенностей является значительная неравномерность скорости затвердевания металла в углах и в центре граней заготовки, что приводит к большей или меньшей деформации профиля [1–3]. Соответственно при отходе одной из частей твердого каркаса заготовки в процессе разливки между поверхностью слитка и гильзой кристаллизатора образуется газовый зазор, коэффициент теплопередачи в котором значительно снижается вследствие более низкой теплопроводности газа. В этой области скорость наращивания твердой корочки замедляется относительно других зон заготовки, которые находятся в тесном контакте с гильзой. Также в области плохого контакта слитка с гильзой кристаллизатора может наблюдаться подплавление затвердевшей оболочки. Следовательно, при ухудшении контакта какой-либо части заготовки с гильзой происходит локальное утоньшение твердой корочки, что приводит к ухудшению прочностных свойств твердого каркаса слитка в этой области.

Одним из распространенных дефектов непрерывнолитой сортовой заготовки является искажение ее геометрической формы, к которой относится так называемая "ромбичность", обусловленная разностью диагоналей прямоугольника, составляющая, как правило, 5–12 мм и более. Принято считать, что ромбичность возникает во время формирования твердой корочки под действием внутренних термических напряжений, которые связаны с перепадом температуры по сечению слитка [4–6]. Превышение термическими напряжениями предела прочности металла при данной температуре приводит к возникновению поверхностных или внутренних трещин.

Поверхностные трещины в твердой корочке заготовки возникают, как правило, непосредственно в кристаллизаторе вследствие действия в ней растягивающих напряжений. При этом такие трещины наиболее характерны для тех углов твердого каркаса, в которых наблюдается деформация корочки и ее отход от поверхности гильзы кристаллизатора [7, 8]. В то же время в твердой корочке оказывается возможным развитие внутренних трещин, которые появляются преимущественно в тупых углах со стороны фронта затвердевания [9, 10]. Вместе с тем развитие этих трещин зависит от целого ряда технологических факторов (температура разливки, марка стали, геометрическая форма кристаллизатора, качество его поверхности, скорость вытяжки заготовки и пр.), что затрудняет формулирование универсальных закономерностей для описания поведения заготовки в кристаллизаторе [5, 6].

Следовательно, изучение поведения сортовой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ с целью определения уровня внутренних напря-

жений в твердой корочке и идентификации причин образования дефектов геометрической формы является актуальной задачей, так как в настоящее время дефекты такого характера имеют достаточно широкое распространение при непрерывной разливке стали и их можно рассматривать как брак продукции.

Динамика наращивания твердой корочки в кристаллизаторе наиболее полно может быть представлена с помощью расчетных математических моделей [11, 12], которые учитывают как особенности теплопереноса в твердой корочке и гильзе кристаллизатора, так и формирование в ней внутренних напряжений. В настоящей работе модель формирования твердой корочки сортовой заготовки была разработана на базе программного комплекса ANSYS 7.0. Для моделирования был применен широко используемый в подобных исследованиях метод поперечного сечения, которое проходит перпендикулярно технологической оси. В качестве объекта моделирования была выбрана заготовка сечением 120 × 120 мм, отливаемая на высокоскоростной МНЛЗ со следующими параметрами: общая длина кристаллизатора — 1,0 м (рабочая длина — 0,88 м); толщина стенки кристаллизатора — 12 мм; внутренний радиус угла гильзы кристаллизатора — 3–6 мм; скорость вытягивания заготовки — 3,0–4,5 м/мин.

Геометрическая модель на стадии охлаждения заготовки в кристаллизаторе включала поперечное сечение заготовки и гильзы кристаллизатора. Эту модель разбивали на сетку конечных элементов с размером ячейки 3 мм. В наиболее дефектоопасных местах размер элементов уменьшали в 4–10 раз для получения более точного решения. Теплофизические и механические свойства исследуемого материала соответствовали стали с содержанием углерода < 0,3 %, их задавали в зависимости от ее температуры. Учет энергии (скрытой теплоты), которая выделяется или поглощается при фазовых преобразованиях, осуществляли заданием энтальпии как функции температуры [13]. В качестве модели поведения твердого каркаса под нагрузкой приняли упруго-пластическую модель. Пластическое течение материалов аппроксимировали с помощью модели билинейного

поведения материала [14, 15]. Аналогично свойства задавали и для материала гильзы кристаллизатора — меди.

Коэффициенты теплопередачи на границе металл—кристаллизатор принимали переменными в зависимости от расположения сечения по высоте гильзы кристаллизатора. Определение их величины основывалось на данных промышленных исследований [8, 16, 18]. В связи с тем, что углы непрерывнолитого слитка в отличие от граней имеют несколько другие условия охлаждения, для участков поверхности сечения, которая не контактирует близ углов сечения со стенками кристаллизатора, принимали меньшие величины коэффициента теплоотдачи. Длина данных участков составляла 10–12 % длины грани слитка. Влияние газового зазора между поверхностью слитка и стенкой гильзы кристаллизатора учитывали опосредовано: через коэффициент теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи на границе "гильза кристаллизатора—охлаждающая вода" принимали постоянным.

Разработанная математическая модель позволяет получать подробную информацию относительно теплового и напряженно-деформированного состояния твердой корочки непрерывнолитого слитка в кристаллизаторе, в частности: выводить на экран графики охлаждения слитка по сечению для разных точек по желанию исследователя; получать информацию относительно расположения границы фаз, распределения тепловых потоков и картины температурных полей; строить изолинии распределения температур; определять необходимые для анализа значения напряженного состояния слитка и кристаллизатора, в том числе и интенсивность напряжений; рассчитывать конфигурацию деформированного состояния твердого каркаса слитка и кристаллизатора в абсолютных и относительных величинах и т. п.

Калибровку модели (корректировку коэффициентов теплоотдачи) осуществляли путем сравнения расчетной температуры поверхности и толщины корочки на выходе из кристаллизатора с соответствующими данными, полученными в промышленных условиях.

Характерный пример распределения термических напряжений в твердой корочке



Рис. 1. Распределение термических напряжений по сечению корочки непрерывнолитой заготовки на выходе из кристаллизатора

слитка на выходе из кристаллизатора представлен на рис. 1 (относительная координата, равная единице, соответствует области, содержащей 95 % твердой фазы): на поверхности заготовки возникают сжимающие напряжения, ближе к фронту затвердевания — растягивающие, а на фронте кристаллизации напряжения отсутствуют.

Принимая во внимание тот факт, что на практике достаточно часто наблюдается трапецеидальная форма поперечного сечения сортовой заготовки (с различной степенью деформации начального профиля), можно пред-

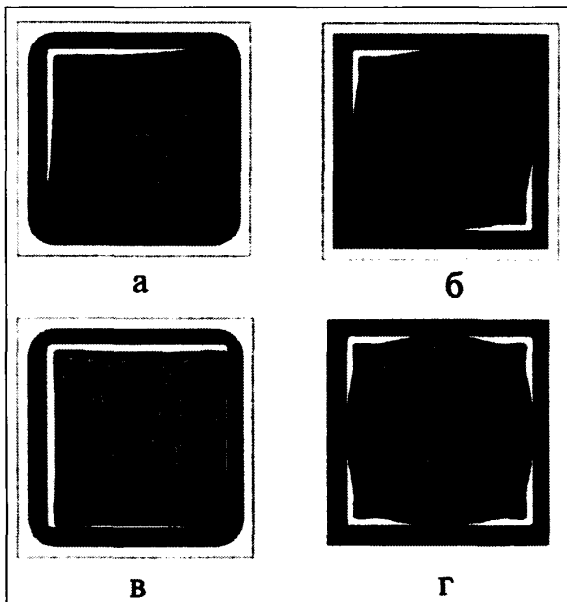


Рис. 2. Геометрическая форма поперечного сечения твердой корочки заготовки на выходе из гильзы кристаллизатора в случае отхода одного (а), двух (б), трех (в) и четырех (г) углов

положить, что уже в процессе ее формирования в гильзе кристаллизатора происходит деформация (искажение) начального профиля (квадрата) из-за того, что один или более углов отходят от стенки кристаллизатора под воздействием внутренних напряжений.

Причинами такого искажения геометрической формы заготовки может быть: нарушение интенсивности отвода тепла по периметру и высоте кристаллизатора; искажение начальной геометрической формы гильзы кристаллизатора; локальный износ внутренней поверхности (наблюдается, как правило, по углам кристаллизатора и в нижней его части); несоответствие параметров разлива стали и профиля гильзы кристаллизатора и т. д. [19, 20].

С помощью разработанной математической модели выполнили анализ следующих возможных ситуаций с нарушением контакта твердой корочки заготовки с внутренней поверхностью кристаллизатора — отход одного угла, двух, трех и четырех углов (рис. 2).

Случай, когда один угол твердой корочки заготовки отходит от внутренней поверхности гильзы кристаллизатора (рис. 2, а), представляется, на наш взгляд, наиболее вероятным при отсутствии дополнительного коробления гильзы кристаллизатора и размывании твердой корочки падающей струей. При этом искажение геометрической формы твердого каркаса приводит к развитию в нем высокого уровня внутренних напряжений. Максимальных значений эти напряжения достигают в углах заготовки, которые находятся в жестком контакте с гильзой кристаллизатора.

Однако внутренние напряжения в этих углах твердой корочки заготовки являются сжимающими, и они не превышают предельно допустимых значений для данной температуры металла (рис. 3, а). В то же время в отшедшем от гильзы углу заготовки напряженно-деформированное состояние твердой корочки имеет более сложный характер и вблизи фронта затвердевания значения растягивающих внутренних напряжений достигают уровня 4–7 МПа, что может превышать предельно допустимые для таких условий напряжения, при которых не происходит разрушения твердой корочки (5–5,5 МПа). Соответственно

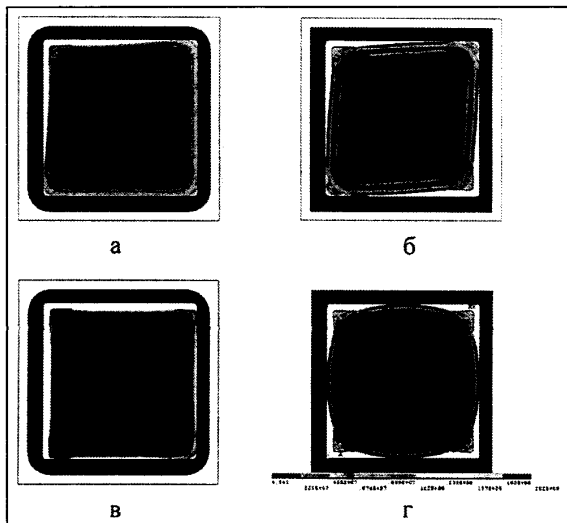


Рис. 3. Интенсивность напряжений в корочке заготовки на выходе из кристаллизатора в случае отхода одного (а), двух (б), трех (в) и четырех (г) углов

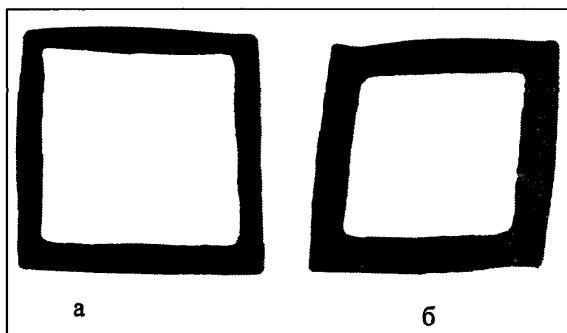


Рис. 4. Характерные примеры развития трещин в твердой корочке заготовки при отхождении одного (а) и двух углов (б) твердой корочки от поверхности гильзы кристаллизатора

вероятность появления трещины в твердом каркасе заготовки в приугловой зоне уже в кристаллизаторе оказывается весьма высокой.

На рис. 4, а представлена фотография поперечного темплета, которая достаточно хорошо иллюстрирует описанный механизм деформирования угла твердого каркаса заготовки непосредственно в гильзе кристаллизатора. Темплет был отобран из горизонта твердого каркаса заготовки, который располагался непосредственно перед выходом из кристаллизатора на 5–10 мм выше места прорыва, происшедшего в ходе разливки. При этом разви-

тие трещины происходило от поверхности заготовки в приугловой зоне, т. е. в более высоких горизонтах, когда толщина корочки составляла всего несколько миллиметров.

Для снижения вероятности отхождения угла твердой корочки от гильзы кристаллизатора представляется целесообразным обеспечить рациональный профиль угла гильзы кристаллизатора путем оптимизации его радиуса и конусности по высоте. Достаточно эффективным мероприятием при этом может быть также обеспечение максимальной интенсивности теплоотвода в верхней половине гильзы, что будет способствовать быстрому наращиванию слоя твердой корочки, который устойчив к внутренним напряжениям.

Ситуацию с отхождением двух углов каркаса твердой корочки от гильзы кристаллизатора можно рассматривать как динамическое развитие процесса коробления твердого каркаса при отхождении одного угла. Условиями для отхождения второго угла каркаса твердой корочки могут быть коробление гильзы кристаллизатора или некоторое несоответствие профиля внутренней полости гильзы кристаллизатора внешней поверхности твердой корочки. Все это следует связывать или с отклонением параметров литья от номинальных (заложенных в расчетную модель профиля гильзы), или с локальным износом внутренней полости гильзы (особенно в области углов). При этом каркас твердой корочки принимает наиболее устойчивое положение, которым является ромб.

Искажение геометрической формы твердой корочки заготовки вследствие отхода двух углов дополнительно приводит к возникновению внутренних растягивающих напряжений по граням в областях, прилегающих к фронту затвердевания (рис. 3, б). Наибольшую опасность разрушения твердой корочки представляют тупые углы заготовки, так как в них концентрируются растягивающие напряжения [21–23]. Полученная в результате выполненных расчетов максимальная величина их интенсивности (5,0–5,5 МПа) является граничным допустимым значением для данной температуры заготовки. В целом острые углы каркаса твердой корочки имеют более слож-

ное напряженное состояние, которое характеризуется наличием внутренних напряжений обоих знаков. Поэтому в случае развития ромбичности (например, после выхода заготовки из кристаллизатора) на практике следует ожидать возникновение внутренних трещин по обоим тупым углам. На рис. 4, б приведен характерный пример образования внутренних трещин в твердой корочке заготовки при развитии явления ромбичности. Темплет был отобран на 300 мм ниже выхода заготовки из кристаллизатора.

Ситуацию с отходом трех (рис. 2, в) или четырех углов (рис. 2, г) каркаса твердой корочки от внутренних стенок гильзы кристаллизатора следует рассматривать как следствие нерационального выбора параметров процесса разлива стали: скорости вытягивания заготовки, температуры стали в кристаллизаторе и т. п. В этом случае внутренний профиль гильзы кристаллизатора (или его отдельные участки) не соответствует профилю внешней поверхности твердого каркаса. Такая ситуация представляется весьма вероятной, например, при снижении скорости вытягивания заготовки ниже номинальной или при повышенном износе внутренней поверхности гильзы кристаллизатора (особенно в нижней ее трети).

Выполненный авторами настоящей статьи анализ показывает, что при отходе трех углов (рис. 3, в) уровень внутренних напряжений в твердом каркасе оказывается значительно ниже, чем при отходе двух углов. При этом коробление поперечного сечения заготовки также происходит в меньшей степени. Рассматривая динамику формирования твердой корочки заготовки при отходе трех углов, следует отметить, что ее наращивание на участках, отошедших от гильзы, происходит значительно медленнее. Поэтому по мере опускания заготовки в нижние горизонты кристаллизатора может происходить восстановление контакта некоторой части поверхности заготовки и внутренней поверхности гильзы кристаллизатора. Можно предположить, что на практике этот процесс будет происходить неравномерно и, как следствие, твердый каркас заготовки может принять одну из ранее

рассмотренных более устойчивых геометрических форм.

Другим вариантом нерационального выбора параметров процесса разлива стали может являться ситуация с отхождением всех четырех углов твердого каркаса от поверхности гильзы кристаллизатора (рис. 2, г). Эта ситуация может быть также обусловлена нерациональной конструкцией гильзы кристаллизатора в области углов гильзы, т. е. в области, где величина уменьшения линейных размеров твердой корочки является максимальной. Показано (рис. 2, г), что при отхождении всех четырех углов твердый каркас сохраняет контакт с поверхностью гильзы по граням формирующейся заготовки. При этом происходит "выпучивание" граней и наблюдается преимущественное наращивание твердой корочки именно в местах контакта. В этом случае расчетные значения внутренних напряжений как у фронта затвердевания, так и вблизи поверхности заготовки обычно не превышают предельно допустимых значений, что свидетельствует о низкой вероятности образования внутренних трещин непосредственно в кристаллизаторе.

Вместе с тем деформация твердого каркаса заготовки вследствие выпучивания граней при отхождении трех или четырех углов может получить дальнейшее развитие после выхода заготовки из кристаллизатора. При этом не малую роль может сыграть уже накопленный ранее уровень внутренних напряжений. Как видно на фотографиях поперечных темплетов, приведенных на рис. 5, внешняя поверхность граней заготовки сохраняет выпуклую форму в течение всего процесса затвердевания слитка. Однако конфигурация поперечного сечения все же дополнительно приобретает форму ромба, что создает наиболее благоприятные условия для формирования внутренних трещин.

По-видимому, образование и развитие внутренних трещин в этом случае происходит вследствие трансформации профиля заготовки в зоне вторичного охлаждения. Вероятность возникновения и развития внутренних трещин во многом определяется величиной ромбичности заготовки (разность диагоналей поперечного сечения) в совокупности с условиями отвода тепла в ЗВО и прочностными

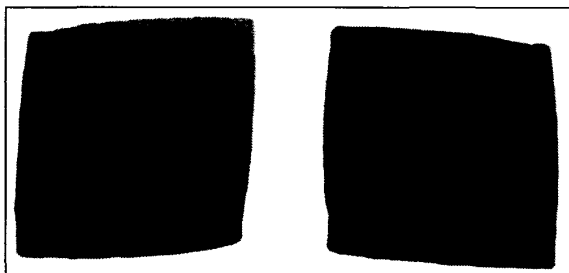


Рис. 5. Вид темплетов непрерывнолитых заготовок при развитии явления ромбичности

показателями стали в области температур затвердевания.

### Заключение

Для процесса формирования твердой корочки заготовки в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ присущи неравномерность отвода тепла по периметру и высоте твердого каркаса, что обуславливает возникновение в нем внутренних напряжений. При этом некоторая часть твердой корочки заготовки может деформироваться и отходить от поверхности гильзы кристаллизатора, что существенным образом уменьшит скорость ее наращивания. Наиболее часто этот процесс наблюдается в углах заготовки.

Для условий затвердевания в кристаллизаторе наиболее вероятным представляется отхождение одного из углов твердой корочки. При этом в связи с уменьшением скорости наращивания твердой корочки и увеличением уровня растягивающих напряжений в этом углу, как правило, можно наблюдать значительную деформацию профиля заготовки, которая при определенных условиях обуславливает возникновение поверхностной продольной угловой трещины и, возможно, прорыва под кристаллизатором.

Развитие явления ромбичности при формировании твердого каркаса сортовой заготовки, по мнению авторов настоящей статьи, обуславливается определенным уровнем внутренних напряжений, накопленных твердой корочкой при нахождении в кристаллизаторе. Как правило, отхождение двух углов твердой корочки заготовки может происходить уже в нижней части гильзы кристаллизатора вследствие, например, ее локального износа. После выхода заготовки из кристаллизатора ромбич-

ность продолжает развиваться в большей или меньшей степени, что может приводить к формированию внутренних угловых трещин (преимущественно в тупых углах ромба).

Случай отхождения трех или четырех углов твердого каркаса заготовки от внутренней поверхности гильзы следует рассматривать, прежде всего, как несоответствие внутреннего профиля гильзы установленным параметрам разливки. При этом в определенных областях твердой корочки может существенным образом изменяться интенсивность теплоотвода, что с высокой степенью вероятности может приводить к развитию ромбичности в поперечном сечении заготовки.

Рассмотренные и смоделированные при помощи математической модели случаи искажения геометрической формы заготовки часто встречаются на практике (рис. 5) вследствие нарушения условий разливки и тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ. Наиболее вероятными из них являются отход одного и двух углов, так как в этих случаях заготовка наиболее устойчива в кристаллизаторе.

### Список литературы

1. Шалимов А. Г. Высокоскоростная непрерывная отливка стальных заготовок // ОАО "Черметинформация". Приложение "Сталеплавильное производство". Новости черной металлургии за рубежом // М.: Черметинформация. 2003. С. 3–21.
2. Хорбах У., Коккендидт Й., Юнг В. Скоростное литье сортовых заготовок через кристаллизаторы с параболической конусностью // Черные металлы. 1998. № 5. С. 19–25.
3. Van Drunen G., Brimacombe J. K., Weinberg F. Internal cracks in standcast billets // Ironmaking and Steelmaking. 1975. N 2. P. 125–133.
4. Ларонов В. И., Кокоулин Е. Л., Бриксманис Г. Н., Дымчиков В. П. Особенности формирования ромбичности квадратных стальных заготовок // Металлург. 1982. № 4. С. 21–23.
5. Смирнов А. Н., Касьян Г. И., Минц А. Я., Штепан Е. В. Технологическое развитие параметров высокоскоростной разливки на сортовых МНЛЗ // Труды VIII Конгресса сталеплавыльщиков. (18–22 октября 2004 г.). М.: Черметинформация. 2005. С. 484–488.
6. Дымченко Е. Н., Товкун В. И., Оробцев А. Ю. и др. Влияние технологических параметров непрерывной разливки на образование ромбичности заготовки // Сталь. 2007. № 11. С. 11–12.
7. Kelly J. E., Michalek K. P., O'Konnor T. G. et al. Initial Development of Thermal and Stress Fields in Continuous Cast Steel Billets // Metallurgical Transaction. 1988. V. 19A. N 10. P. 2589–2602.
8. Park J. K., Li C., Thomas B. G., Samarasekera I. V. Analysis of Thermo-Mechanical Behavior in Billet Casting // 60<sup>th</sup> Electric Furnace Conference (Nov. 10–12, 2002, San Antonio, TX, V. ISS, Warrendale, PA, 2002. P. 669–685.
9. Kiffie B., Alemu D. Thermal analysis of continuous casting process // ESME 5<sup>th</sup> Annual Conference on Manufacturing and Process Industry, September. 2000. P. 25–31.

10. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Кабинов С. М. Теоретический анализ влияния технологических факторов на процесс затвердевания стальных заготовок при непрерывном литье // Бюл. "Черная металлургия". 2008. № 4. С. 66–73.
11. Ridolfi M. R. An overview on solidification modelling / Proc. 6-th European Conference on Continuous Casting, 3-6 июня 2008. Риччионе, Италия. — Milano: AIM, 2008. P. 1–9.
12. Thomas B. G. Continuous Casting: Complex Models / The Encyclopedia of Materials: Science and Technology. — Oxford: Elsevier Science Ltd. 2001. V. 2. P. 1599–1609.
13. Янишевская А. Г., Цергун И. Н. Исследование программного комплекса ANSYS при расчетах тепловых процессов в машиностроении: Учеб. пособие. Омск: Изд. ОмГУ. 2001. 96 с.
14. Огородникова О. М. Введение в компьютерный конструкционный анализ: Методические указания по курсу "Компьютерная диагностика". Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2001. 47 с.
15. Bohemer J. R., Funk G., Jordan M. et al. Strategies for coupled analysis of thermal strain history during continuous solidification process // Advances in Engineering Software. 1998. V. 29. N 7–9. P. 679–697.
16. Hebert L., Gilles T. Development of thermal solidification models for Bethel's slab caster // Steelmaking Conf. Proceedings. V. 76. Dallas. TX. 1993. P. 315–328.
17. Kelly J. E., Michalek K. P., O'Connor T. G. et al. Initial Development of Thermal and Stress Fields in Continuously Cast Steel Billets // Metallurgical Transaction. 1988. V. 19A. N 10. P. 2589–2602.
18. Guo L., Wang X., Zhan H. et al. Mould Heat Transfer in the Continuous Casting of Round Billet // ISIJ International. 2007. V. 47. N 8. P. 1108–1116.
19. Смирнов А. Н., Лейрих И. В., Жибоедов Е. Ю., Любищенко Е. И. Особенности разрушения покрытий гильз кристаллизаторов высокоскоростных сортовых МНЛЗ // Электрометаллургия. 2007. № 4. С. 29–32.
20. Alvarez de Toledo G., Unamuno I., Ciriza J. et al. Study of billet mould interaction during casting through billet contour measurements // Proc. 6-th European Conference on Continuous Casting, 3–6 июня 2008, Риччионе, Италия, Milano: AIM, 2008. P. 1–12.
21. Нотт Дж. Основы механики разрушения. М.: Металлургия, 1978. 256 с.
22. Корольков А. М. Усадочные явления в сплавах и образование трещин при затвердевании. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 124 с.
23. Строганов А. И. Качество поверхности металла. М.: Металлургия, 1985. 156 с.