

УДК621.74.047: 620.191.355

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ СЛЕДОВ КАЧАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА

**А. Н. Смирнов, С. В. Куберский*, А. В. Головчанский*,
А. П. Верзилов**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Донбасский государственный технический университет, Алчевск

Выполнено моделирование процесса формирования следов качания на поверхности непрерывнолитых заготовок на холодной модели при переливе жидкой фазы через твёрдую корочку. Показано, что формирующаяся вблизи стенки кристаллизатора твёрдая корочка, состоит преимущественно из мелких равноосных кристаллов, что объясняется повышенной интенсивностью отвода тепла в этой зоне. Проанализированы процессы роста твёрдой корочки в районе мениска в период первичной кристаллизации заготовки.

Ключевые слова: следы качания, кристаллизатор, МНЛЗ, твёрдая корочка, затвердевание.

Виконано моделювання процесу формування слідів гойдання на поверхні безперервнолитих заготовок на холодній моделі при переливанні рідкої фази через тверду скоринку. Показано, що тверда скоринка, яка формується поблизу стінки кристалізатора, складається переважно з дрібних рівноосних кристалів. Це пояснюється підвищеною інтенсивністю відводу тепла в цій зоні. Проаналізовано процеси росту твердої скоринки в районі мениска в період первинної кристалізації заготовки.

Ключові слова: сліди коливання, кристалізатор, МБЛЗ, тверда скоринка, твердіння.

The modelling of the oscillation mark formation on the surface of continuously cast ingots in the cold model for the overflow of the liquid phase through solid shell – is carried out. It is shown that a solid shell nearly the mold wall consists predominantly of equiaxed fine crystals. It is connect by intensity of the heat transfer in this zone. The processes of growth solid shell in the meniscus area during the primary crystallization had been research.

Keywords: oscillation marks, mold, CCM, solid crust, solidification.

Для предупреждения прилипания твёрдой корочки при её замерзании на поверхность кристаллизатора в процессе непрерывной разливки стали применяется его возвратно-поступательное движение. При этом происходит определённая совокупность физико-механических процессов, в результате чего на поверхности непрерывнолитого слитка формируются волнообразные складки, которые чаще называются следами качания [1-3]. Следы качания имеют важное значение в плане

обеспечения качества отлитых заготовок и конечной продукции, поскольку они являются причиной возникновения поперечных трещин. Из практики непрерывной разливки известно, что уменьшение глубины проникновения следов качания (например, при увеличении частоты качания кристаллизатора) обуславливает сокращение количества горизонтальных трещин, которые требуют механической зачистки и отбраковки.

Таким образом, сокращение количества горизонтальных трещин и повышение качества поверхности заготовки представляется актуальной практической задачей, для решения которой необходимо расширение теоретических представлений непосредственно о механизме формирования следов качания. При этом геометрическая форма следов качания и характер их проникновения вглубь тела заготовки во многом определяют также явление захвата металлом шлаковых включений и пузырьков аргона. Ключом к достижению высокого качества поверхности заготовки является контроль физико-механических явлений, происходящих в области мениска, которые в значительной степени влияют на формирование твёрдой корочки, её деформацию и подплавление.

Среди существующих теорий, описывающих или объясняющих механизмы формирования следов качания, наиболее вероятным, на наш взгляд, является механизм, основанный на явлении затвердевания твёрдой корочки непосредственно на мениске и переливе через неё порции жидкого металла при поднятии уровня в верх [3-6]. Перелив жидкого металла через затвердевшую корочку мениска происходит, как правило, в течение каждого цикла качания кристаллизатора при его движении вниз. Однако, как показано многими исследователями, процесс качания кристаллизатора оказывает существенное влияние на конфигурацию следа качания и связанного с ним подповерхностного гребешка.

Визуальное наблюдение процесса формирования следа качания в промышленных условиях при разливке жидкой стали технически представляется крайне затруднительным. Это объясняется высокими температурами в области формирования твёрдой корочки и высокой скоростью протекания процессов колебания и затвердевания. Более широкие возможности для визуализации этих процессов могут быть созданы в ходе физического моделирования. Наиболее важным при этом является выбор моделирующего вещества: оно должно не только обладать оптической прозрачностью, но также иметь определённую совокупность теплофизических характеристик, позволяющих обеспечить соответствующую систему критериев подобия. Дополнительным условием, которое представляется, на наш взгляд, крайне важным, является затвердевание моделирующего вещества по дендритному механизму и возможность пластической деформации корочки при наложении внешних воздействий [7-8].

При физическом моделировании процессов формирования твёрдой корочки в кристаллизаторе МНЛЗ решались следующие задачи: определение наиболее характерных стадий процесса образования твёрдой корочки в кристаллизаторе; количественная оценка параметров продвижения фронта затвердевания; исследование влияния параметров охлаждения на трещинообразование в твёрдой корочке. Было принято, что моделирование процессов затвердевания целесообразно осуществлять, имитируя продольное сечение заготовки в кристаллизаторе.

В качестве моделирующего вещества использовали камфен (2,2-диметил-3-метил-бициклопентан), который как и сталь, является дендрито-кристаллизующимся материалом. Это позволило моделировать процессы и явления, происходящие в двухфазной зоне. Основные физические и теплофизические свойства камфена приведены в таблице.

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 1. При этом стенка, имитирующая стенку кристаллизатора (поз. 2), была изготовлена из полого алюминиевого профиля, что обеспечивало высокую интенсивность отвода тепла в процессе затвердевания корочки. Для усиления эффекта намерзания

Физические и теплофизические свойства камфена

Температура, °С		Теплота кристаллизации, кДж/кг	Теплоёмкость, кДж/(кг·К)		Температуропроводность, м ² /с	Поверхностное натяжение, Н/м	Кинематическая вязкость, м ² /с
солидус	ликвидус		жидкий	твёрдый			
33	35	40,2	2,4	2,1	1,3-10,0-8,0	0,021	7,2-10,0-6,0

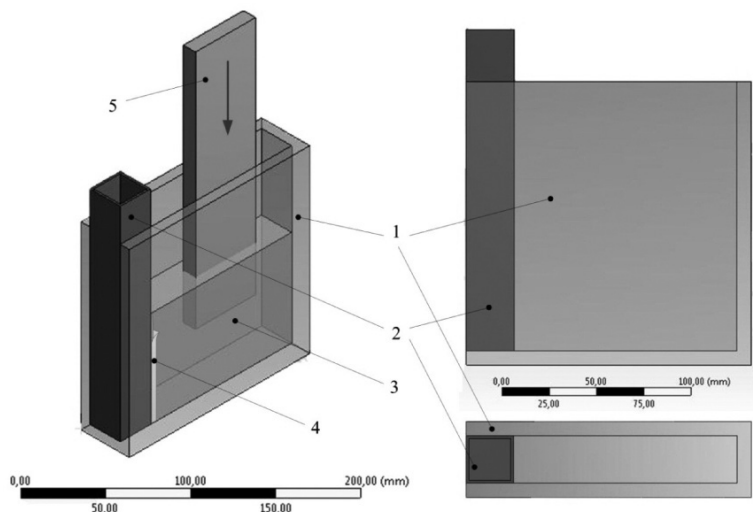


Рис. 1. Физическая модель для моделирования формирования следов качания: 1 – стенки из оргстекла; 2 – алюминиевый охлаждаемый профиль; 3 – жидкий камфен; 4 – кристаллизующая корочка камфена; 5 – погружаемый стержень

моделирующего вещества профиль наполняли водой и замораживали в холодильнике до температуры $-10...-15$ °С. Остальные стенки модели были выполнены из органического стекла, имеющего низкую теплопроводность. Соответственно при такой схеме охлаждения интенсивность теплоотвода через водоохлаждаемую стенку модели на несколько порядков выше, чем через стенки из органического стекла. Расстояние между параллельными стенками из органического стекла (поз. 1) составляло 25 мм, что позволяло наблюдать процесс формирования твёрдой корочки визуально и фиксировать его на видеокамеру. Температура заливки камфена составляла $38,0 \pm 0,5$ °С. По полученным видеофайлам осуществлялась количественная оценка кинетики формирования твёрдой корочки.

Исследования динамики формирования следов качания проводили в следующей последовательности:

- камфен разогревали на паровой бане до температуры $38,0 \pm 0,5$ °С, которую определяли лабораторным термометром, имеющим диапазон измерения от 0 до 50 °С и цену деления 0,1 °С;

- съёмный алюминиевый профиль, наполненный водой, помещали в холодильник для охлаждения до температуры $(-10) \div (-15)$ °С с целью увеличения интенсивности теплоотвода от моделируемой жидкости;

- модель со стороны параллельных стенок из органического стекла подогревали галогенными лампами (до температуры 32-33 °С) для предотвращения намерзания камфена на этих стенках и обеспечения возможности визуального наблюдения и видеофиксации процесса намерзания на алюминиевую стенку;

- в подготовленную для работы модель вставляли охлаждённый алюминиевый профиль и быстро заливали камфен, а затем фиксировали толщину и конфигурацию растущей корочки;

– по истечении 60-65 с, когда твёрдая корочка камфена выросла до 1,5-2 мм, производили перелив жидкого камфена через затвердевший мениск путем повышения уровня расплава в модели за счет погружения в него стержня из оргстекла.

Для лучшей визуализации формирующегося гребешка и имитации захвата шлака вслед качания на затвердевшем мениске размещали тонкую прослойку из чёрного материала (изоленты или ткани). Это связано с тем, что область следа качания может иметь повышенную загрязнённость неметаллическими включениями [4] вследствие захвата шлака переливающимся металлом в течение каждого цикла осцилляции кристаллизатора. Жидкий шлак, находящийся на затвердевавшем мениске, не успевает полностью всплыть во время перелива и оказывается захваченным в корочке металла. При дальнейшем вытягивании заготовки неоднородность поверхностного слоя, вызванная подобным загрязнением, может привести к появлению поперечных трещин по следам качания, необходимости зачистки поверхности заготовок перед прокаткой, а в худшем случае – прорыву металла.

На рис. 2 показаны фрагменты цикла формирования следов качания в процессе моделирования. Рис. 2, а отображает корочку камфена с двумя следами качания, сформированную на охлаждаемой алюминиевой стенке. В ходе экспериментов установлено, что на дугообразной поверхности жидкого мениска происходит затвердевание корочки, которая после перелива образует гребешок, внедряющийся в тело формируемого слитка. В процессе дальнейшего затвердевания гребешок может подплавляться восходящими потоками жидкого камфена, либо обламываться, как это показано на рис. 2, б. Обломившаяся часть гребешка переплавляется или перемещается в нижние горизонты расплава, где может быть захвачена растущими ветвями дендритов.

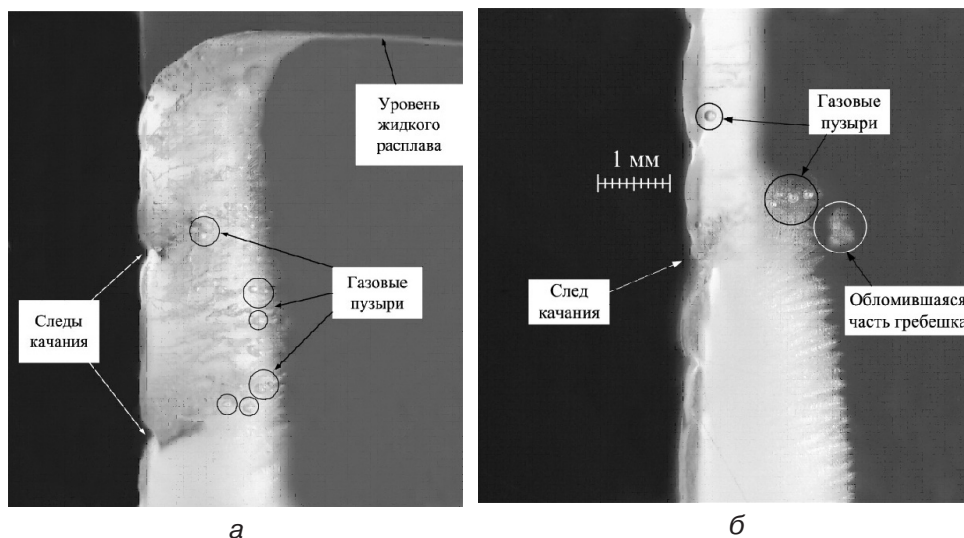


Рис. 2. Фрагменты формирования следов качания

Как было отмечено ранее, следы качания и связанные с ними гребешки, значительно ухудшают качество поверхности и подповерхностного слоя заготовок. В работе [15] отмечено, что область следа качания может быть насыщена неметаллическими включениями и газовыми пузырями. Пузырьки газа, всплывающие с глубины расплава, могут концентрироваться в районе гребешка, и далее оставаться в подповерхностном слое заготовки, снижая тем самым однородность металла и его качество, что нашло подтверждение в ходе проведённого моделирования (рис. 2).

В процессе роста кристаллов под действием гидростатического давления и усадки могут образовываться междендритные трещины (рис. 3, а), которые в дальнейшем могут зарастать новыми кристаллами либо обуславливать обламывание

вершин дендритов. Обломившиеся вершины дендритов либо переплавляются, либо становятся новыми центрами кристаллизации, опускаясь вглубь слитка (рис. 3, б, в). В ходе исследований удалось также наблюдать обламывание части гребешка после перелива расплава через мениск (рис. 3, д) и рост дендритных кристаллов вверх от линии формирования гребешка (рис. 3, в-е).

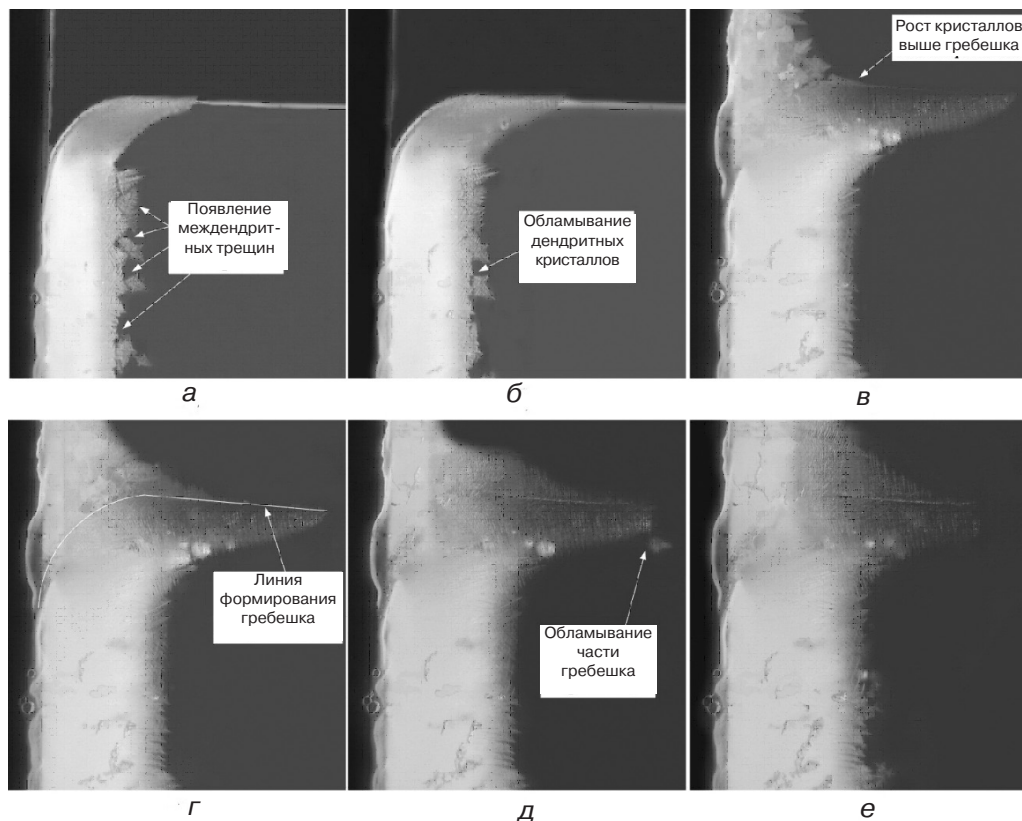


Рис. 3. Поведение дендритов в процессе затвердевания корки слитка

Важнейшим следствием образования следов качания является то, что твёрдая корочка в основании следа становится несколько тоньше вследствие уменьшения величины скорости затвердевания, по крайней мере, в той части заготовки, которая находится в кристаллизаторе. В настоящей работе выполнены сравнительные испытания прочности корочки камфена со следом качания и без него на сжатие. Для этого из затвердевшего слитка вырезались образцы размером $10 \times 10 \times 10$ мм (36 шт.). Испытание на сжатие проводили путём приложения нагрузки по трём основным направлениям. Установлено, что образцы твёрдой корочки со следами качания имеют прочность на 14-30 % меньше, чем образцы без следов качания. Причём наименьшие значения прочности соответствуют образцам, нагруженным перпендикулярно направлению вытягивания заготовки. Полученные данные ещё раз подтверждают определяющее влияние следов качания на формирование твёрдого каркаса заготовки в кристаллизаторе.

Можно утверждать, что большое уменьшение толщины корочки в основании следа качания может служить причиной образования поперечной трещины или прорыва, особенно в том случае, когда друг на друга накладываются различные негативные факторы (например, сильный перегрев расплава, высокое трение в кристаллизаторе или турбулизация потоков). Соответственно для предотвращения формирования глубоких следов качания необходимо по возможности предупреждать переливы расплава через затвердевший гребешок. Например, если кристаллизатор начинает

совершать движение вверх сразу при достижении максимальной высоты мениска, перелив будет предотвращён.

Одним из способов сокращения времени перелива или полного его предотвращения является применение гидравлического привода механизма качания кристаллизатора [9].

Данный механизм способен обеспечить исполнение несинусоидального режима качания, исключая износ механических частей привода, как это свойственно механическому приводу качания. В то же время, гидравлический привод механизма возвратно-поступательного движения кристаллизатора позволяет повысить его частоту качания до величины порядка 400 циклов в минуту при сохранении его конструктивной целостности и минимальных поломках. А с учётом того, что в течение каждого цикла качания кристаллизатора происходит перелив металла через затвердевший мениск и формируется следкачания, можно предположить, что разливка металла с такой частотой позволит значительно сократить глубину проникновения следов качания в тело слитка. Это можно объяснить сокращением промежутка времени, отведённого на кристаллизацию мениска до следующего за ним перелива жидкого расплава. С целью подтверждения этой теории были проведены эксперименты на холодной модели, в ходе которых, после заливки камфена в модель и начала затвердевания корочки на охлаждаемой алюминиевой стенке, перелив жидкого камфена производили через разные промежутки времени. На рис. 4 показана различная глубина проникновения следа качания в зависимости от времени от начала кристаллизации до перелива жидкого расплава. Также, с повышением времени до перелива жидкого расплава, характерным является увеличение толщины растущей корочки.

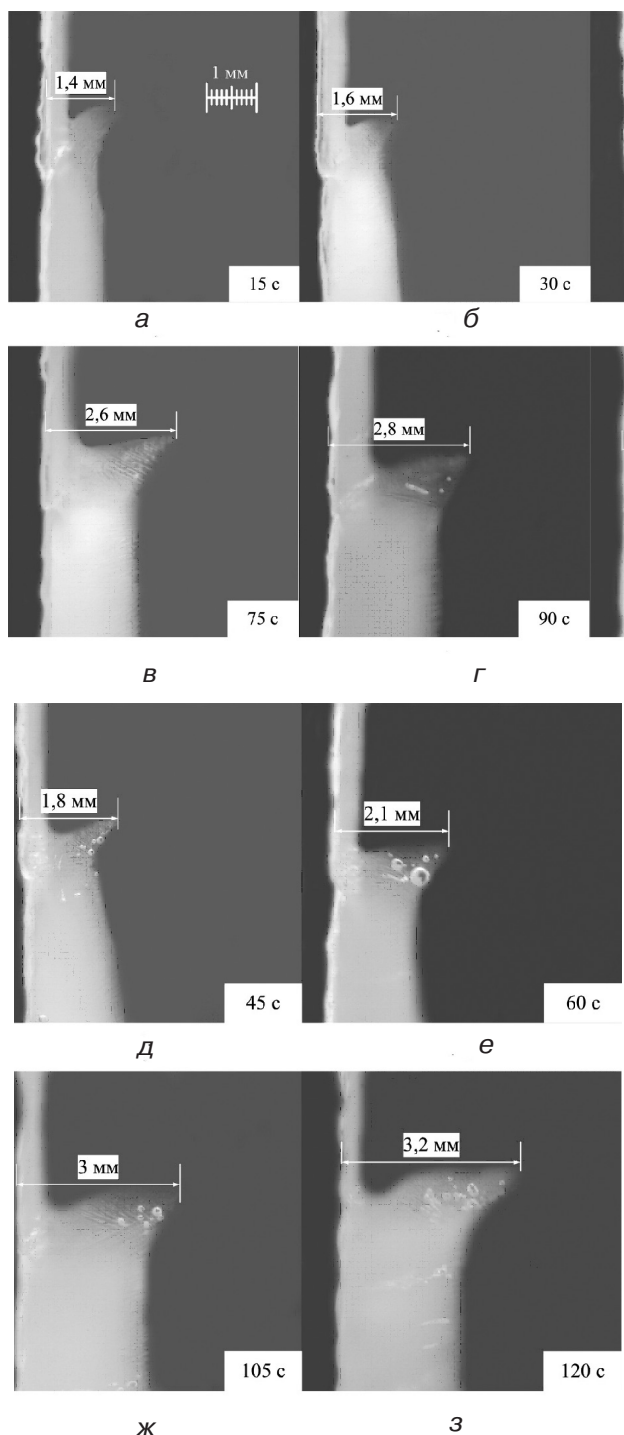


Рис. 4. Изменение глубины проникновения следа качания в тело слитка в зависимости от времени от начала кристаллизации до перелива жидкого расплава через мениск

Выводы

- Среди процессов, сопряжённых с формированием следов качания на поверхности непрерывнолитой заготовки, особого внимания заслуживают явления, происходящие в области мениска. Частичное затвердевание мениска, имеющего выпуклую поверхность, обеспечивает формирование твёрдой корочки в виде гребешка, который внедряется в жидкую ванну при переливе, обусловленном повышением уровня в кристаллизаторе в результате его движения вверх.
- Установлено, что образцы корочки со следами качания имеют прочность на 14-30 % меньше, чем образцы без следов качания. Причём наименьшие значения прочности соответствуют образцам, нагруженным перпендикулярно направлению вытягивания заготовки. Полученные данные подтверждают значимость следов качания, образующихся при формировании твёрдого каркаса в кристаллизаторе, и их влияние на его прочность. При этом большое уменьшение толщины корочки в основании следа качания может служить причиной образования поперечной трещины или прорыва.
- Использование гидравлической системы качания кристаллизатора, обеспечивающей возвратно-подступательное его движение по треугольному закону в зависимости от температурно-скоростных параметров непрерывной разливки, позволяет значительно улучшить качество заготовок за счёт получения более ровной поверхности и меньшей глубины образующихся следов качания.



Список литературы

1. Смирнов А. Н. Непрерывная разливка стали: Учебник / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ. – 2011. – 482 с.
2. Thomas B., Sengupta J., Ojeda C. Mechanism of Hook and Oscillation Mark Formation In Ultra-Low Carbon Steel / Second Baosteel Biennial Conference, May 25-26, 2006, Shanghai. – Shanghai: PRC. – 2006. – Vol. 1. – P. 112-117.
3. Takeuchi E. Brimacombe J. The Formation of Oscillation Marks in the Continuous Casting of Steel Slabs / Metallurgical Transaction D. – 1984. – Vol. 15B. – № 9. – P. 493-509.
4. Sengupta J., Thomas B., Shin H. A New Mechanism of Hook Formation during Continuous Casting of Ultra-low Carbon Steel Slabs/ Metallurgical and Materials Transactions A. – 2006. – Vol. 37A. – № 5. – P. 1597-1611.
5. Cho Y.-W., Oh Y.-J., Chu S.-H. Mechanism of Surface Quality Improvement in Continuous Cast Slab with Rectangular Cold Crucible Mold / ISIJ International. – 1998. – Vol. 38. – № 7. – P. 723-729.
6. Bo K. Mechanism of Oscillation Mark Formation in Continuous Casting of Steel / Journal of University of Science and Technology Beijing. – 2000. – Vol. 7. – № 3. – P. 189-192.
7. Смирнов А. Н. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокопроизводительной МНЛЗ / А. Н. Смирнов, В. Е. Ухин, Е. Ю. Жибоедов // Процессы литья. – 2009. – № 1. – С. 33-42.
8. Putz O., Breitfeld O., Rodl S. Investigations of Flow Conditions and Solidification in Continuous Casting Moulds by Advanced Simulation Techniques / Steel Research. – 2003. – Vol. 74. – № 11-12. – P. 686-692.
9. Смирнов А. Н. Достоинства и возможности механизмов качания кристаллизатора с гидравлическим приводом / А. Н. Смирнов, О. В. Антыкуз, А. Ю. Цупрун // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – № 4. – С. 33-38.

Поступила 11.02.2015