

УДК 621.74.047: 620.191.355

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СЛЕДОВ КАЧАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

Смирнов А.Н.¹, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник (stalevoz@i.ua)

Куберский С.В.², к.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов (skuberskiy@yandex.ru)

Головчанский А.В.², аспирант кафедры металлургии черных металлов (golovchansky_ant@mail.ru)

Максаев Е.Н.³, мастер участка (evgenijj-maksaev@rambler.ru)

Ухин В.Е.⁴, к.т.н., доцент кафедры металлургии стали (lemvladimir@i.ua)

¹ Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины
(03680, Украина, г. Киев-142, ГСП, бульвар Академика Вернадского, 34/1)

² Донбасский государственный технический университет
(94204, Украина, Луганская обл., г. Алчевск, пр. Ленина, 16)

³ ПАО «Алчевский металлургический комбинат»
(94202, Украина, Луганская обл., г. Алчевск, ул. Шмидта, 4)

⁴ Донецкий национальный технический университет
(83001, Украина, Донецк, ул. Артема, 58)

Аннотация. Выполнено моделирование процесса формирования следов качания на поверхности непрерывнолитых заготовок на холодной модели при переливе жидкой фазы через твердую корочку. Показано, что формирующаяся вблизи стенки кристаллизатора твердая корочка состоит преимущественно из мелких равноосных кристаллов, что объясняется повышенной интенсивностью отвода тепла в этой зоне. Проанализированы процессы роста твердой корочки в районе мениска в период первичной кристаллизации заготовки. Показано, что среди процессов, сопряженных с формированием следов качания на поверхности непрерывнолитой заготовки, особого внимания заслуживают явления, происходящие в области мениска. Частичное затвердевание мениска, имеющего выпуклую поверхность, обеспечивает формирование твердой корочки в виде гребенка, который внедряется в жидкую ванну при переливе, обусловленном повышением уровня в кристаллизаторе в результате его движения вверх.

Ключевые слова: непрерывная разливка, моделирование, качание, мениск, перелив, следы, прочность, трещины, качество.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-4-226-231

Процесс непрерывной разливки стали сопровождается возвратно-поступательным движением кристаллизатора, которое предназначено для предупреждения прилипания твердой корочки при ее намерзании на поверхность. При возвратно-поступательном движении кристаллизатора происходит определенная совокупность физико-механических процессов, в результате чего на поверхности непрерывнолитой заготовки формируются волнообразные складки, которые чаще называют следами качания [1 – 4]. Следы качания имеют важное значение в плане обеспечения качества отлитых заготовок и конечной продукции, поскольку они являются причиной возникновения поперечных трещин [5 – 7]. 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 [8, 9].

Соответственно сокращение количества горизонтальных трещин и повышение качества поверхности заготовки представляется актуальной практической

задачей, для решения которой необходимо расширение представлений непосредственно о механизме формирования следов качания. При этом геометрическая форма следов качания и характер их проникновения в глубь тела заготовки во многом определяют также явление захвата металлом шлаковых включений и пузырьков аргона [10]. Ключом к достижению высокого качества поверхности заготовки является контроль происходящих в области мениска физико-механических явлений, которые в значительной степени влияют на формирование твердой корочки, ее деформацию и подплавление.

Среди существующих теорий, описывающих или объясняющих механизмы формирования следов качания, наиболее вероятным, на наш взгляд, является механизм, основанный на затвердевании твердой корочки непосредственно на мениске и переливе через нее порции жидкого металла при поднятии уровня вверх [3, 10 – 12]. 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 [13].

Визуальное наблюдение процесса формирования следа качания в промышленных условиях при разливе жидкой стали технически представляется крайне затруднительным. Это объясняется высокими температурами в области формирования твердой корочки и высокой скоростью протекания процессов колебания и затвердевания. Более широкие возможности для визуализации этих процессов могут быть созданы в ходе физического моделирования [14]. Наиболее важным при этом является выбор моделирующего вещества: оно 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 моделирующего вещества по дендритному механизму и возможность пластической деформации корочки при наложении внешних воздействий [14, 15].

При физическом моделировании процессов формирования твердой корочки в кристаллизаторе МНЛЗ решались следующие задачи: определение наиболее характерных стадий процесса образования твердой корочки в кристаллизаторе; количественная оценка параметров продвижения фронта затвердевания; исследование влияния параметров охлаждения на трещинообразование в твердой 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-метилтен-бициклогептан), который также, как и сталь, является дендритокристаллизующимся материалом. Это позволило моделировать процессы и явления, происходящие в двухфазной зоне. Основные физические и теплофизические свойства камфена следующие [14]: температура солидус $33\text{ }^{\circ}\text{C}$, ликвидус $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, теплота кристаллизации $40,2\text{ кДж/кг}$, теплоемкость в жидком состоянии $2,4$ и твердом $2,1\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, температуропроводность $1,3\cdot 10^{-8}\text{ м}^2/\text{с}$, поверхностное натяжение $0,021\text{ Н/м}$, кинематическая вязкость $7,2\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$.

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 1. При этом стенка, имитирующая рабочую поверхность кристаллизатора (поз. 2), была изготовлена из полого алюминиевого профиля, что обеспечивало высокую интенсивность отвода тепла в процессе затвердевания корочки. Для усиления эффекта намерзания моделирующего вещества профиль наполняли водой и замораживали в холодильнике до температуры от -10 до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 твердой корочки визуально и фиксировать его на видеокамеру. Температура заливки камфена составляла $38 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. По полученным видеороликам осуществлялась количественная оценка кинетики формирования твердой корочки.

Исследования динамики формирования следов качания проводили в такой последовательности:

- камфен разогревали на паровой бане до температуры $38 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, которую определяли лабораторным термометром, имеющим диапазон измерения от нуля до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и цену деления $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- съемный алюминиевый профиль, наполненный водой, помещали в холодильник для охлаждения до температуры от -10 до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ с целью увеличения интенсивности теплоотвода от моделируемой жидкости;
- модель со стороны параллельных стенок из органического стекла подогревали галогенными лампами (до температуры $32 - 33\text{ }^{\circ}\text{C}$) 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 охлажденный алюминиевый профиль и быстро заливали камфен, а затем фиксировали толщину и конфигурацию растущей корочки;
- по истечении $60 - 65\text{ с}$, когда твердая корочка камфена вырастала до $1,5 - 2,0\text{ мм}$, осуществляли перелив жидкого камфена через затвердевший

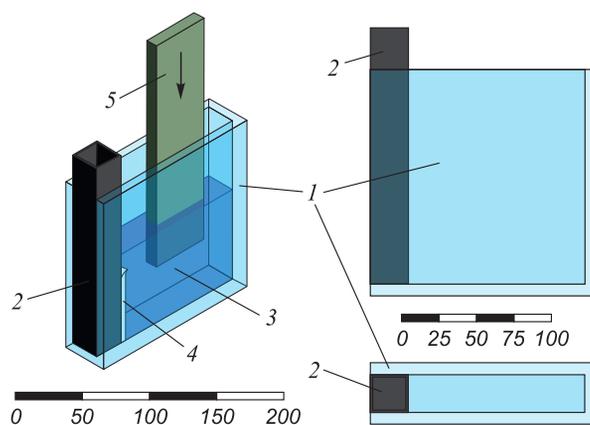


Рис. 1. Физическая модель для моделирования формирования следов качания:

- 1 – стенки из оргстекла; 2 – алюминиевый охлаждаемый профиль; 3 – жидкий камфен; 4 – кристаллизующаяся корочка камфена; 5 – погружаемый стержень

Fig. 1. Physical model for modeling of the oscillation tracks formation: 1 – walls of organic glass; 2 – aluminum cooled profile; 3 – liquid camphene; 4 – crystallized crust of camphene; 5 – submergeable bar

мениск путем повышения уровня расплава в модели за счет погружения в него стержня из оргстекла.

Для лучшей визуализации формирующегося гребенка и имитации захвата шлака в след качания на затвердевшем мениске размещали тонкую прослойку из черного материала (изолянты или ткани).

На рис. 2 приведена характерная кинограмма динамики формирования гребенка твердой корочки, представляющего собой затвердевший участок мениска. Операция перелива расплава через твердую корочку была выполнена по истечении 65 с. После этого над гребенком сформировался новый мениск, а верхушка гребенка оказалась в жидкой ванне. В дальнейшем на участке, расположенном выше гребенка, наблюдалось быстрое наращивание твердой фазы, а вершина гребенка подплавлялась, что примерно к 120 с привело к выравниванию фронта затвердевания твердой корочки. Следует отметить, что в ряде выполненных экспериментов отмечалось не только подплавление вершины гребенка, но также и его обламывание, что можно связывать с воздействием на гребенок потока расплава. Отломившаяся часть гребенка в дальнейшем либо расплавлялась, либо перемещалась в глубь жидкой ванны.

Обобщая полученные результаты, можно утверждать, что формирующаяся вблизи алюминиевой стенки твердая корочка состоит преимущественно из мелких равноосных кристаллов, что объясняется повышенной интенсивностью отвода тепла в этой зоне. По мере удаления от охлаждающей поверхности уровень теплоот-

вода снижается, и начинают преобладать столбчатые кристаллы, оси первого порядка которых располагаются перпендикулярно к фронту кристаллизации под небольшим углом к горизонтальной плоскости как это показано на рис. 3.

Для осуществления сравнительных количественных оценок динамики наращивания твердой корочки в зависимости от времени использовалась широко известная эмпирическая зависимость

$$\delta = k\sqrt{\tau},$$

где δ – толщина твердой корочки, мм; τ – время затвердевания, с; k – определяемый экспериментально коэффициент затвердевания, мм/с^{0,5}.

При этом динамика процессов затвердевания легко оценивается по значению коэффициента k , поскольку толщина твердой корочки для заданного времени затвердевания определяется в ходе физического моделирования. На рис. 4, а представлены результаты расчетов значений коэффициента затвердевания, выполненные для эксперимента, в котором перелив расплава был выполнен 3 раза, что обеспечило формирование четырех различных участков затвердевания, включающих три следа качания (СК на рис. 4, б).

Как видно из приведенных данных, значения k изменяются в достаточно широком диапазоне. При этом в начальный момент контакта расплава с алюминиевой стенкой коэффициент затвердевания достигает максимальных значений. В дальнейшем его величина замет-

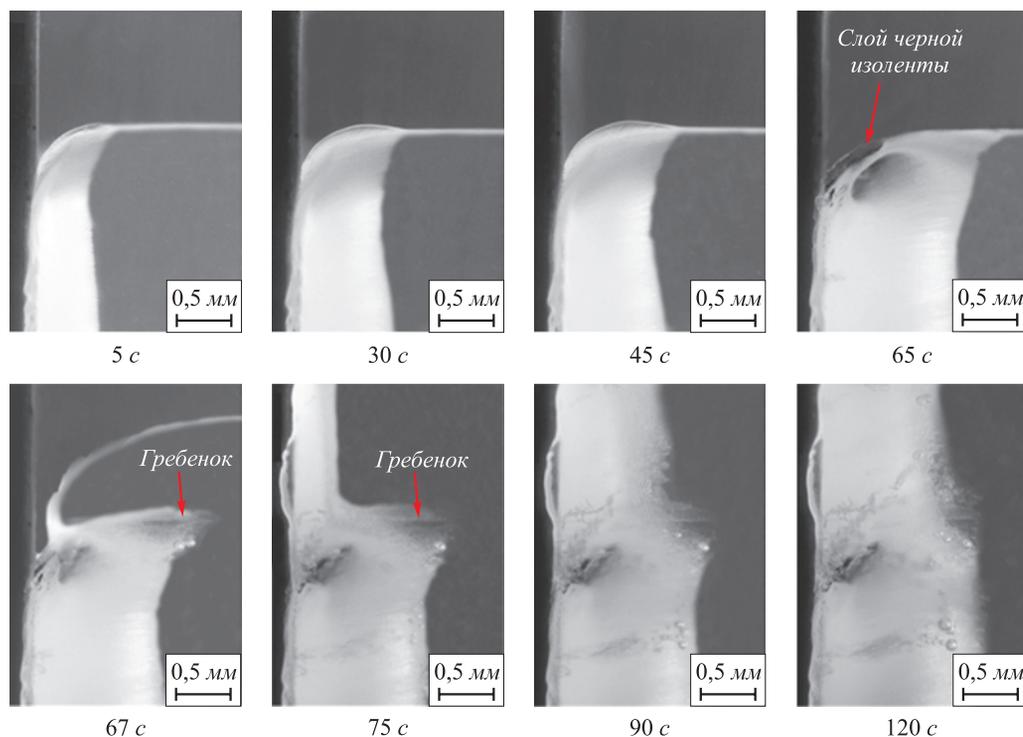


Рис. 2. Динамика роста твердой корочки и формирования следа качания при переливании

Fig. 2. Increase dynamics of a hard crust and the formation of an oscillation track at pouring

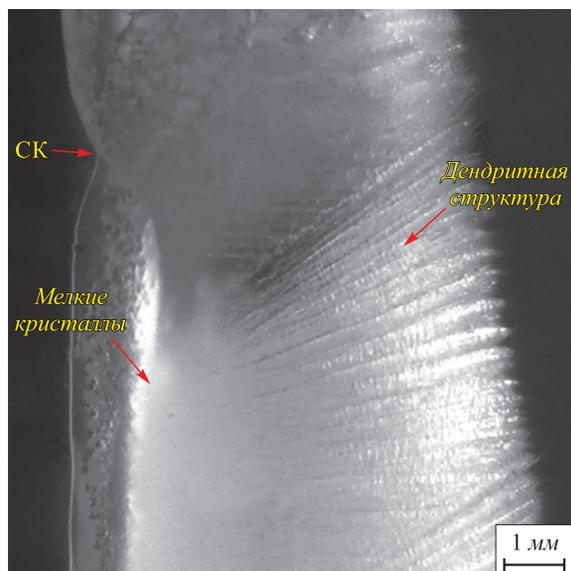


Рис. 3. Кристаллическая структура твердой корочки в области расположения следа качания

Fig. 3. Crystal structure of a hard crust in the location zone of an oscillation track

но уменьшается. Такая закономерность изменения коэффициента затвердевания обеспечивает сглаживание фронта затвердевания по мере продвижения заготовки вниз. Некоторое различие значений коэффициента затвердевания в правой части кривых, видимо, следует объяснять частичным нагревом поверхности алюминиевой стенки в процессе затвердевания.

Установлено, что на коэффициент затвердевания в значительной степени оказывает влияние перегрев расплава, что доказано в ходе физического моделирования. Исследования были проведены для трех значений температур камфена при заливке (37, 38 и 39 °С). Отмечено, что в первые моменты кристаллизации (до 15 с) не наблюдается особых различий в динамике измене-

ния коэффициента затвердевания, а через 20 – 30 с для температуры камфена 37 °С наблюдается наибольшее значение коэффициента затвердевания. При этом для температур камфена 38 и 39 °С значения коэффициента затвердевания уменьшаются соответственно на 9 и 13 %. В дальнейшем эта разница увеличивается еще больше. Например, через 60 с она достигла 12 – 15 и 25 – 30 % соответственно и до окончания проведения опыта (350 – 400 с) практически не изменялась.

Важнейшим следствием образования следов качания является то, что твердая корочка в основании следа становится несколько тоньше вследствие уменьшения скорости затвердевания, по крайней мере, в той части заготовки, которая находится в кристаллизаторе. В настоящей работе выполнены сравнительные испытания прочности на сжатие корочки камфена со следом качания и без него. Для этого из затвердевшего слитка вырезались образцы размером 10×10×10 мм (36 штук). Испытание на сжатие проводили путем приложения нагрузки по трем основным направлениям. Установлено, что образцы твердой корочки со следами качания имеют прочность на 14 – 30 % меньше, чем образцы без следов качания. Причем наименьшие значения прочности соответствуют образцам, нагруженным перпендикулярно направлению вытягивания заготовки. Полученные данные еще раз подтверждают большое влияние следов качания на формирование твердого 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 пе-

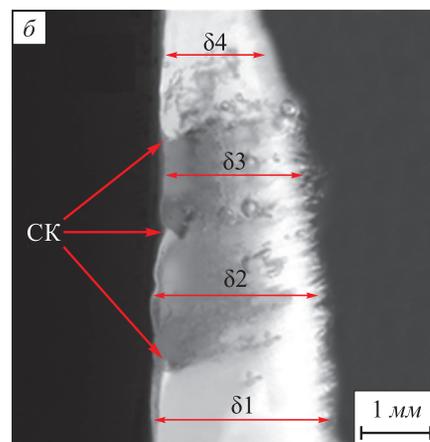
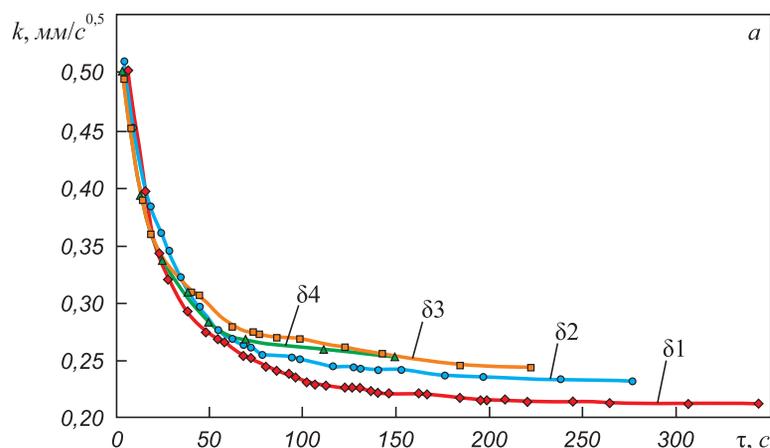


Рис. 4. Изменение коэффициента затвердевания для четырех исследованных участков твердой корочки (а), полученных при трех переливах в процессе затвердевания (б)

Fig. 4. Change of the hardening coefficient for the four researched zones of a hard crust (a), obtained at the three spills in the hardening process (b)

реливы расплава через затвердевший гребенок. Например, если кристаллизатор начинает совершать движение вверх сразу при достижении максимальной высоты мениска, перелив будет предотвращен.

Выводы. Среди процессов, сопряженных с формированием следов качания на поверхности непрерывнолитой заготовки, особого внимания заслуживают явления, происходящие в области мениска. Частичное затвердевание мениска, имеющего выпуклую поверхность, обеспечивает формирование твердой корочки в виде гребенка, который внедряется в жидкую ванну при переливе, обусловленном повышением уровня в кристаллизаторе в результате его движения вверх. Формирующаяся вблизи стенки кристаллизатора твердая корочка состоит преимущественно из мелких равноосных кристаллов, что объясняется повышенной интенсивностью отвода тепла в этой зоне. По мере удаления от охлаждающей поверхности уровень теплоотвода снижается и начинают преобладать столбчатые кристаллы, оси первого порядка которых располагаются перпендикулярно к фронту кристаллизации под небольшим углом к горизонтальной плоскости. Образцы корочки со следами качания имеют прочность на 14 – 30 % меньше, чем образцы без следов качания. Причем наименьшие значения прочности соответствуют образцам, нагруженным перпендикулярно направлению вытягивания заготовки. Полученные данные подтверждают значимость следов качания, образующихся при формировании твердого каркаса в кристаллизаторе и их влияния на его прочность. При этом большое уменьшение толщины корочки в основании следа качания может служить причиной образования поперечной трещины или прорыва.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали: Учебник. – Донецк: изд. ДонНТУ, 2011. – 482 с.
- Thomas B.G., 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.
- Takeuchi E. Brimacombe J.K. The Formation of Oscillation Marks in the Continuous Casting of Steel Slabs // Metallurgical Transaction D. 1984. Vol. 15B. № 9. P. 493 – 509.
- Цупрун А.Ю., Кубкин Д.А., Антыкуз О.В., Колоколов А.В., Пильгаев В.М. Системы диагностики процесса качания кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок. – В кн.: Сборник научных трудов конференции. «50 лет непрерывной разливки стали в Украине». – Донецк: ДонНТУ. 2010. С. 247 – 253.
- Wolf M. M. Mold oscillation guidelines // Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME. 1991. Vol. 74. P. 51 – 71.
- Ботников С.А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла. Изд. 2-е. – Волгоград: Панорама, 2011. С. 72 – 78.
- Непрерывная разливка сортовой заготовки / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, А.Л. Подкорытов и др. – Алчевск: ДонГТУ, 2012. – 449 с.
- Смирнов А.Н., Антыкуз О.В., Цупрун А.Ю. Достоинства и возможности механизмов качания кристаллизатора с гидравлическим приводом // Металлургические процессы и оборудование. 2009. № 4. С. 33 – 38.
- Emi T. Influence of Physical and Chemical Properties of Mold Powders on the Solidification and Occurrence of Surface Defects of Strand Cast Slabs. Proceedings of National Open Hearth and Basic Oxygen Steel Conference. 1978 (61). P. 350 – 361.
- Sengupta J., Thomas B.G., Shin H.J. 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.
- 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.
- 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.
- Tomono H., Elements of Oscillation Mark Formation and their Effect on Transverse Fine Cracks in Continuous Casting of Steel: PhD Thesis. – Kyoto: EPFL, 1979. – 132 p.
- Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Жибоедов Е.Ю. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокопроизводительной МНЛЗ // Процессы литья. 2009. № 1. С. 33 – 42.
- 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.

Поступила 18 марта 2014 г.

THE RESEARCH OF FORMING OF OSCILLATION TRACKS ON THE SURFACE OF CONTINUOUS CAST BILLET

A.N. Smirnov¹, S.V. Kuberskii², A.V. Golovchanskii²,
E.N. Makshev³, V.E. Ukhin⁴

¹Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

²Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine

³PJSC “Alchevsk Metallurgical Plant”, Alchevsk, Ukraine

⁴Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

Abstract. The article describes the fulfilled modeling of the formation process of oscillation tracks on the surface of continuous casting billets on

a cool model when splitting the liquid phases through the hard crust. It has been shown that the forming hard crust near the walls of a crystallizer consists predominately of fine equiaxial crystals; that can be explained by the increased intensity of heat removal in this area. The growth processes of hard crust in the area of meniscus have been analyzed in the period of prime crystallization of billets. It has been shown that among the processes, connected with the formation of oscillation tracks on the surface of continuous casting billets, special attention deserves the phenomenon, occurring in the area of meniscus. The partial hardening of meniscus, which has a convex surface, provides the formation of hard crusts in the form of crista, which is introduced into

a molten-pool at splitting, caused by the increase of the level in the crystallizer in the result of its movement upwards.

Keywords: continuous casting, modeling, oscillation, meniscus, overflow, tracks, strength, crack, quality.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-4-226-231

REFERENCES

- Smirnov A.N., Kuberskii S.V., Shtepan E.V. *Nepreryvnaya razlivka stali: Uchebnik* [Continuous casting of steel: Textbook]. Donetsk: izd. DonNTU, 2011, 482 p. (In Russ.).
- Thomas B.G., 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, pp.112–17.
- Takeuchi E. Brimacombe J.K. The Formation of Oscillation Marks in the Continuous Casting of Steel Slabs. *Metallurgical Transaction D*. 1984, vol. 15B, no. 9, pp. 493–509.
- Tsuprun A.Yu., Kubkin D.A., Antykuz O.V., Kolokolov A.V., Pil'gaev V.M. Diagnostic systems of the oscillation process of the crystallizer of the CCM. In: *Sbornik nauchnykh trudov konferentsii "50 let nepreryvnoi razlivke stali v Ukraine"* [Collection of scientific works of the Conf. "50 years of continuous casting of steel in Ukraine"]. Donetsk: DonNTU. 2010, pp. 247–253. (In Russ.).
- Wolf M. M. Mold oscillation guidelines. *Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME*. 1991, vol. 74, pp. 51–71.
- Botnikov S.A. *Sovremenniy atlas defektov nepreryvnolitoi zagotovki i prichiny vozniknoveniya proryvov kristallizuyushchetsya korochki metalla* [Modern defect atlas of continuous casting blank and the causes of the appearance of runout of a crystallized metal crust]. Volgograd: Panorama, 2011, pp. 72–78. (In Russ.).
- Smirnov A.N., Kuberskii S.V., Podkorytov A.L., Ukhin V.E., Kravchenko A.V., Orobtshev A.Yu. *Nepreryvnaya razlivka sortovoi zagotovki* [Continuous casting of billets]. Alchevsk: DonGTU, 2012, 449 p. (In Russ.).
- Smirnov A.N., Antykuz O.V., Tsuprun A.Yu. Advantages and possibilities of the oscillation crystallizer mechanisms with hydraulic drive. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*. 2009, no. 4, pp. 33–38. (In Russ.).
- Emi T. Influence of Physical and Chemical Properties of Mold Powders on the Solidification and Occurrence of Surface Defects of Strand Cast Slabs. *Pro-ceedings of National Open Hearth and Basic Oxygen Steel Conference*. 1978 (61), pp. 350–361.
- Sengupta J., Thomas B.G., Shin H.J. A New Mechanism of Hook Formation during Continuous Casting of Ultra-low Carbon Steel Slabs. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2006, vol. 37A, no. 5, pp. 1597–1611.
- ChoY.-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, no. 7, pp. 723–729.
- Bo K. Mechanism of Oscillation Mark Formation in Continuous Casting of Steel. *Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2000, vol. 7, no. 3, pp. 189–192.
- Tomono H. *Elements of Oscillation Mark Formation and their Effect on Transverse Fine Cracks in Continuous Casting of Steel: PhD Thesis*, Kyoto: EPFL, 1979, 132 p.
- Smirnov A.N., Ukhin V.E., Zhiboedov E.Yu. Physical modeling of the for-mation conditions of continuous casting billets in the crystallizer of a highly productive continuous-casting plant. *Protsessy lit'ya*. 2009, no. 1, pp. 33–42. (In Russ.).
- 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, no. 11–12, pp. 686–692.

Information about the authors:

A.N. Smirnov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher (stalevoz@i.ua)

S.V. Kuberskii, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Ferrous Metallurgy" (skuberskiy@yandex.ru)

A.V. Golovchanskii, Postgraduate of the Chair "Ferrous Metallurgy" (golovchansky_ant@mail.ru)

E.N. Maksaev, Foreman (evgenijj-maksaev@rambler.ru)

V.E. Ukhin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Steel Metallurgy" (lemvladimir@i.ua)

Received March 18, 2014

СООБЩЕНИЕ

В опубликованном № 11, 2015 г. на стр. 793 допущена серьезная опечатка в написании инициалов автора. Соавтором статьи является Орелкина Дарья Ивановна, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий НИТУ «МИСиС».

Редакция приносит свои извинения автору за допущенную ошибку.