

В.А. Кравец, И.Ю. Мотрошилов, А.Г. Горохов и др. // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2007. – Вип. 2(64). – С. 42-47.

Надійшла до редакції 19.09.2012

Рецензент канд. техн. наук, доц. В.В. Кочура

В.А. Кравець \*, В.А. Темнохуд \*\*, Ю.В. Насанова \*

\*Донбаська національна академія будівництва й архітектури, Макіївка,

\*\*Донецький національний технічний університет, Донецьк

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАФІТОВМІСНОГО ПИЛУ МЕТАЛУРГІЙНИХ ЗАВОДІВ

При переливах чавуну в доменних і сталеплавильних цехах, десульфурації чавуну й у ході деяких інших технологічних процесів виділяється графітовмісний пил, який може бути коштовною сировиною для одержання матеріалів, що використовуються в авіаційній, космічній і електротехнічній промисловості. У зв'язку із цим проведені дослідження властивостей цього пилу й складу включень.

Ключові слова: чавун, крапельки металу, графіт, пил, бурий дим, гетерогенні включення, спектральний аналіз, експериментальне дослідження.

V.A. Kravets \*, V.A. Temnokhud \*\*, Y.V. Nasanova \*

\*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka

\*\*Donetsk National Technical University, Donetsk

#### CARBON-CONTAINING DUST OF METALLURGICAL PLANTS

The process of cast-iron treatment in blast furnace and steel-melting departments, cast iron desulfurization and some other technological processes lead to graphite-containing dust emission. This dust can be used to obtain materials for aviation, space and electrotechnical industries. In this connection the properties of this dust are discussed.

Keywords: cast iron, metal drops, graphite, dust, brown smoke, spectral analysis, experimental investigation.

#### УДК 621.74.047

**А.Н. СМІРНОВ\***(д-р техн.наук, проф.),

**С.В. КУБЕРСКИЙ\*\***(канд.техн.наук, доц.),

**А.В. ГОЛОВЧАНСКИЙ\*\***(аспірант), **В.А. ГОЛОВАТЫЙ\***(аспірант)

\* Донецкий национальный технический университет, Донецк,

\*\*Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск

#### АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ СЛЕДОВ КАЧАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

В работе проведен анализ основных механизмов формирования следов качания, а также подповерхностных «гребешков» в непрерывнолитых заготовках. Такие дефекты могут приводить к появлению поперечных трещин на поверхности заготовок, значительно ухудшая их качество. Установлено, что наиболее эффективным направлением, способствующим повышению качества поверхности непрерывнолитых заготовок, мо-

жет быть уменьшение интенсивности теплоотвода в районе жидкого мениска за счет использования различных покрытий или керамических материалов в верхней части кристаллизатора.

Ключевые слова: следы качания, «гребешок», перелив, корочка, затвердевание, ШОС.

### **Введение**

В последнее время в практике непрерывной разливки стали получили распространение механизмы качания кристаллизатора с гидравлическим приводом, позволяющие задавать практически любой режим его возвратно-поступательного движения. Использование данных механизмов качания позволяет улучшить качество поверхности непрерывнолитых заготовок и повысить надежность процесса непрерывной разливки [1]. Негативным моментом при осцилляции кристаллизатора является формирование следов качания и подповерхностных «гребешков» в непрерывнолитых стальных заготовках. Глубина следов качания значительно влияет на качество заготовок вследствие повышенной сегрегации неметаллических включений у основания следов качания, а также возможного образования поперечных трещин на поверхности заготовок [2,3].

В настоящее время многие отечественные и зарубежные предприятия стремятся сократить прямые расходы и минимизировать энергетические потери за счет передачи непрерывнолитых заготовок от МНЛЗ к нагревательным печам без промежуточного охлаждения, позволяющего произвести осмотр их поверхности. Поэтому для обеспечения высокого качества конечной продукции необходима реализация технологических мероприятий, способствующих уменьшению глубины следов качания, а, следовательно, и вероятности образования дефектов, следствием которых они являются.

Одним из основных приемов, способствующих достижению высокого качества поверхности заготовок, является контроль процессов и поведения металла в районе жидкого мениска, которые в значительной степени влияют на образование и формирование следов качания.

### **Цель работы**

Целью данной работы является анализ основных известных механизмов формирования следов качания на поверхности непрерывнолитых заготовок и определение доминирующих критериев, влияющих на характер проникновения следов вглубь тела заготовки.

### **Основная часть**

В теории непрерывной разливки не существует единого мнения о механизмах формирования следов качания на поверхности отливаемых заготовок. Однако их можно условно разделить на 3 основных группы.

К первой группе следует отнести механизмы, сущность которых основывается на разрыве и последующем росте корочки слитка, образовавшейся на начальной стадии кристаллизации. Так, согласно работе [4] непрочный верхний край корочки прилипает к поверхности кристаллизатора и происходит ее разрыв вследствие непрерывного вытягивания заготовки (хрупкое разрушение из-за низкой пластичности при высоких температурах) и движения кристаллизатора вверх в течение времени положительного опережения. В дальнейшем происходит рост и залечивание разорванных краев корочки, что приводит к образованию следа качания.

В работах [5] и [6] предполагается, что в месте разрыва создается вторичный мениск, из которого, в течение времени положительного опережения в место разрыва поступает жидкая сталь, застывающая при контакте со стенками кристаллизатора. В течение времени отрицательного опережения этот зазор исчезает, поскольку два твердых разорванных края свариваются вместе, создавая след качания (рисунок 1).

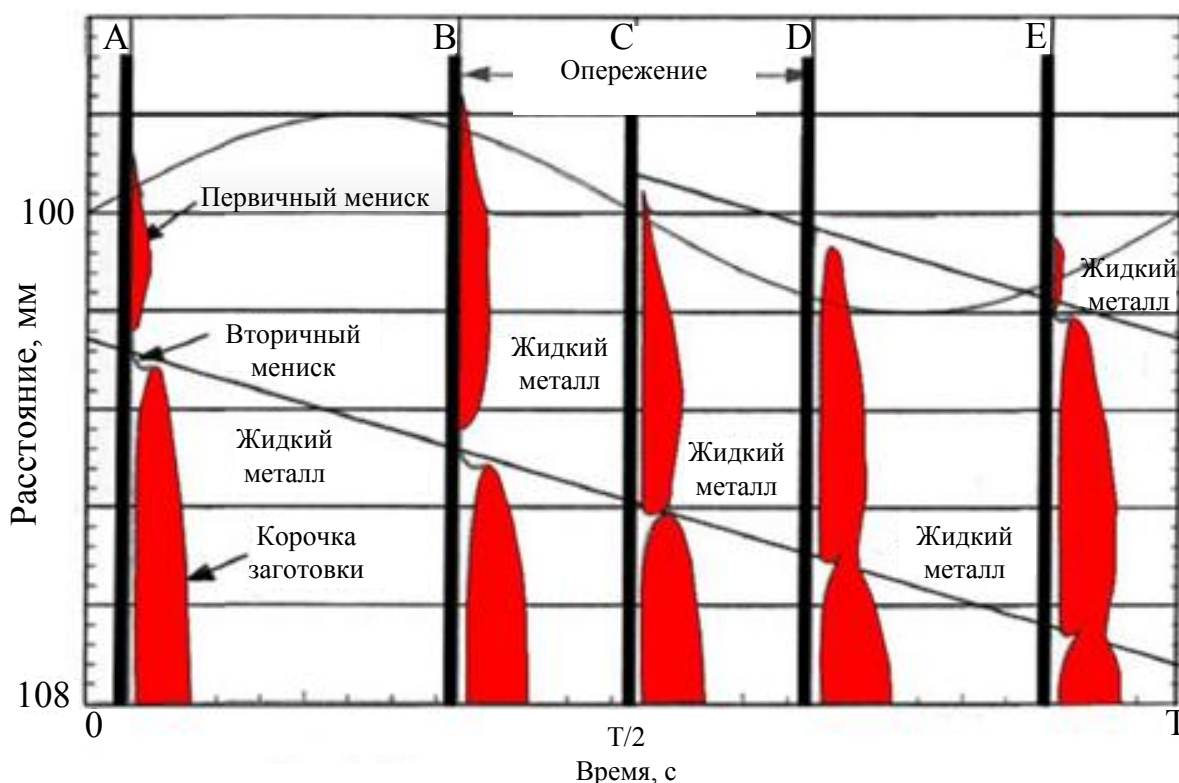


Рисунок 1 – Схема формирования следов качания по механизму, предложенному в работах [5,6].

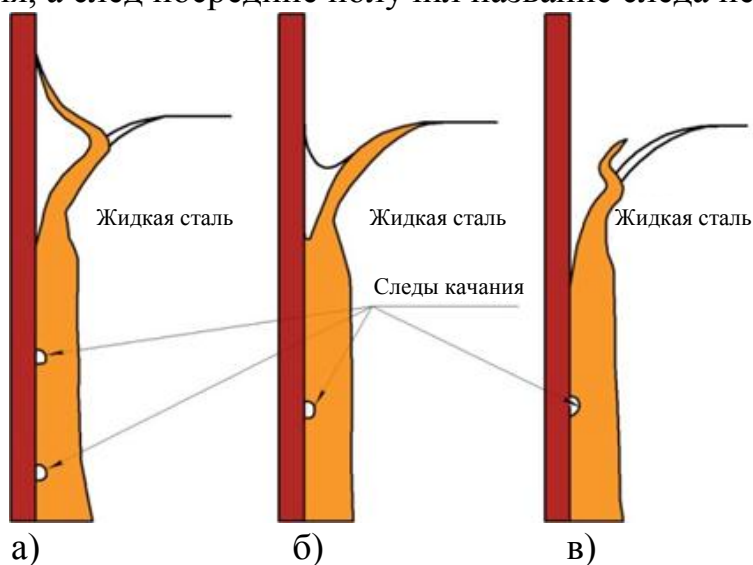
Такой механизм может иметь место при разливке с жидкими смазками, когда корочка формирующейся заготовки непосредственно контактирует с поверхностью кристаллизатора и прилипает к ней. Менее вероятен он при разливке стали с использованием шлакообразующей смеси (ШОС) в кристаллизаторе, когда равномерный устойчивый слой ШОС между об-

разовавшейся корочкой и поверхностью кристаллизатора предотвращает их непосредственный контакт.

О механизмах, основанных на деформации и изгибе верхнего края корочки непрерывнолитой заготовки, в течение периода отрицательного опережения, и переливе через него металла впервые было упомянуто в работе [3].

Причины изгиба, как правило, обусловлены вязкопластической термической деформацией [7], снижением уровня металла в кристаллизаторе [8], и механическим взаимодействием между «носиком» ШОС и краем корочки. Последующий перелив жидкой стали через изогнутую поверхность корочки, во время периода положительного опережения одновременно образует «гребешок» и след качания [3].

Согласно механизму, описанному в работе [9] следы качания образуются по причине кристаллизации мениска и снижения скорости отвода тепла в верхней части кристаллизатора, значительно уменьшает вероятность их возникновения. В работе [10] данная теория рассматривается более подробно. В этой работе предполагается, что следы качания формируются, когда в результате осцилляции восстанавливается контакт жидкого металла со стенкой кристаллизатора. Последнее происходит при переливе жидкого металла через мениск или изгибе корочки к стенке кристаллизатора посредством ферростатического давления. Также возможно одновременное протекание двух этих процессов [10]. На рисунке 2 представлены различные способы контакта жидкой стали со стенкой кристаллизатора выше затвердевшего мениска. След слева обычно называется складчатым следом качания, а след посередине получил название следа перелива.



а) поднимающаяся жидкость отодвигает твердую корочку по направлению к стенке; б) жидкость перетекает за твердую корочку; в) комбинация способов а) и б)

Рисунок 2 – Механизмы образования следа качания, предложенные в работе [10]

Эти механизмы включают две независимых теории формирования в кристаллизаторе «гребешка» до перелива жидкого металла через мениск: механический изгиб верхнего края корочки или его термическая деформация. Между тем, изгиб представляется маловероятным явлением, потому что механическое воздействие слоя жидкой ШОС недостаточно, чтобы согнуть сталь в форму, соответствующую застывшему мениску.

Необходимое для этого большее механическое воздействие приведет к разрушению корочки. Непрочный «гребешок» восприимчив к горячему разрыву, поскольку для хрупкого излома полутвердого металла необходимо всего ~1% напряжения [11]. Так, авторы работ [12,13] наблюдали около усеченного «гребешка» его отделенный кончик.

К третьей группе можно отнести механизмы, основанные на затвердевании мениска и переливе жидкого металла через его край [2,14,15]. Изогнутый мениск затвердевает в течение периода отрицательного опережения, а в течение периода положительного опережения, перелив металла через застывший его край формирует «гребешок» и связанный с ним след качания.

Авторами работы [16] были проведены эксперименты с органическими веществами. Исследователи наблюдали формирование поверхностных следов и пришли к выводу, что в основе образования двух типов следов – складчатых следов и следов качания (следов перелива) – лежат разные причины. При этом следы качания образуются при воздействии сжимающей силы на мениск частицами, прилипающими к стенке кристаллизатора, а складчатые следы формируются без влияния качаний. Для вычисления формы мениска использовалось уравнение, выведенное в работе [17], а характеристики следов качания связывались с несоответствием между наблюдаемой формой мениска и расчетной [16].

Согласно уравнениям (1-3) [17], в отсутствие любых поверхностных волн или динамического движения, равновесная форма мениска определяется балансом сил поверхностного натяжения и силы тяжести:

$$x - x_0 = -\sqrt{2a^2 - z^2} + \frac{a}{\sqrt{2}} \ln \frac{a\sqrt{2} + \sqrt{2a^2 - z^2}}{z}, \quad (1)$$

$$x_0 = a - \frac{a}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

$$a = \sqrt{\frac{2\Delta\gamma}{\Delta\rho g}}. \quad (3)$$

где,  $x$  – перпендикуляр расстояния к стенке кристаллизатора, м;  $z$  – расстояние вдоль стенки кристаллизатора, м;  $\Delta\gamma$  – разница поверхностных натяжений жидких стали и шлака, Н·м<sup>-1</sup>;  $\Delta\rho$  – разница плотностей жидких стали и шлака, кг·м<sup>-3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести (9,81 м·с<sup>-2</sup>).

Изменение давления жидкой ШОС в зазоре между корочкой заготовки и стенкой кристаллизатора и ее влияние на поведение мениска в течение времени отрицательного опережения рассмотрено в работе [2]. На рисунке 3 схематически представлен механизм формирования двух типов следов качания со смежными подповерхностными «гребешками» (рисунок 3 а) и без них (рисунок 3 б).

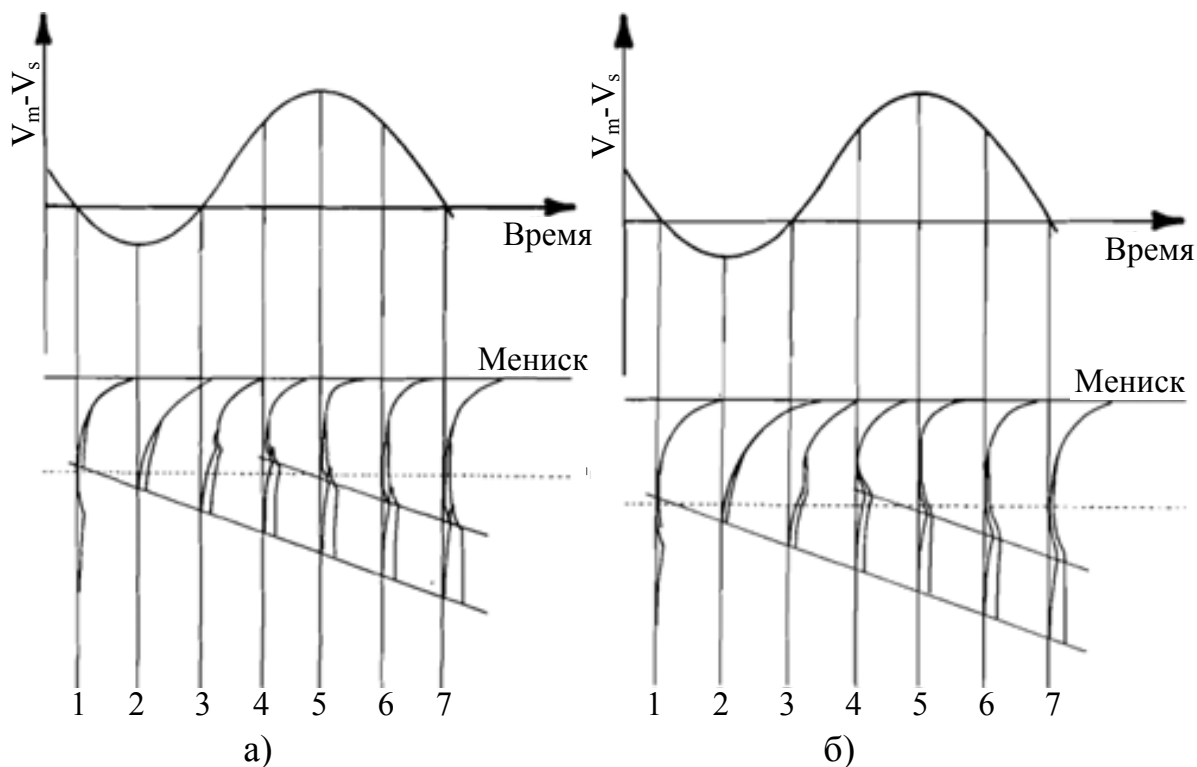


Рисунок 3 – Механизмы формирования следов качания согласно данных работы [2]

В обоих случаях мениск одинаково реагирует на качание кристаллизатора и давление ШОС. В течение времени отрицательного опережения (стадии 1-3), когда кристаллизатор движется вниз быстрее, чем заготовка, мениск отклоняется положительным давлением жидкой ШОС от стенки кристаллизатора. В период последующего положительного опережения (стадии 4-7), мениск придвигается к стенке кристаллизатора. Частично затвердевший мениск перемещается неоднородно, потому что верхняя часть его корочки наиболее удалена от стенки кристаллизатора и является наиболее горячей и слабой.

Как результат верхняя часть корочки будет больше перемещаться к стенке отрицательным давлением ШОС и силой инерции поступающей жидкой стали. В этом случае различие между двумя типами следов качания обусловлено механической прочностью корочки мениска.

В случае образования следов качания с подповерхностными «гребешками» (рисунок 3, а) твердая корочка является относительно прочной

вследствие большей ее толщины (низкий перегрев металла, отсутствие областей турбулентности) и низкого содержания углерода [2]. Таким образом, вершина корочки сопротивляется изгибу к стенке кристаллизатора, и жидкая сталь переливается через нее (стадия 4, рисунок 3, а), формируя подповерхностный «гребешок». Формирование следов качания, не имеющих подповерхностных «гребешков», имеет место при наличии слабой и легкодеформируемой корочки металла, вершина которой, в начале положительного опережения, легко перемещается к стенке кристаллизатора, что исключает перелив жидкой стали (стадия 4, рисунок 3, б).

В работе [18] предложена оригинальная модель образования следов качания на основе механизма перекрытия. В этом случае поверхностное натяжение мениска уравнивается с корочкой движущейся вверх, в то время как затвердевающая корочка растет внутрь (рисунок 4).

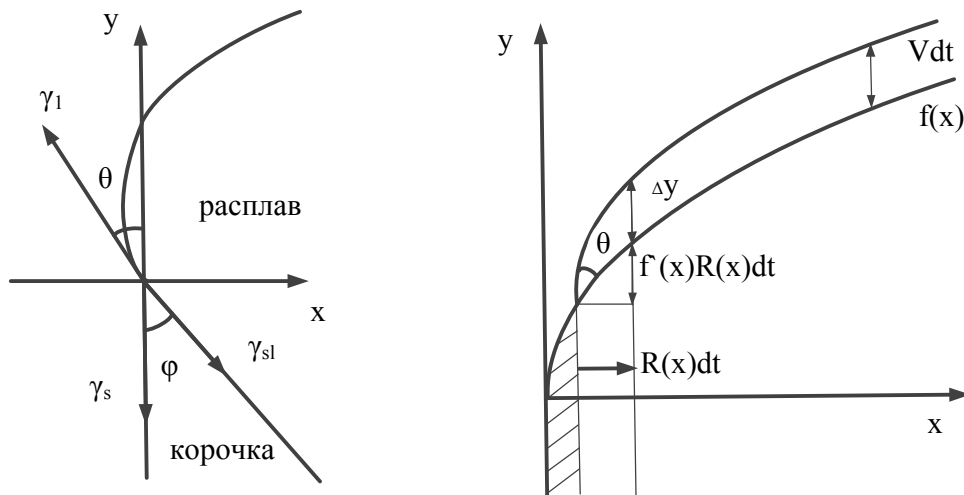
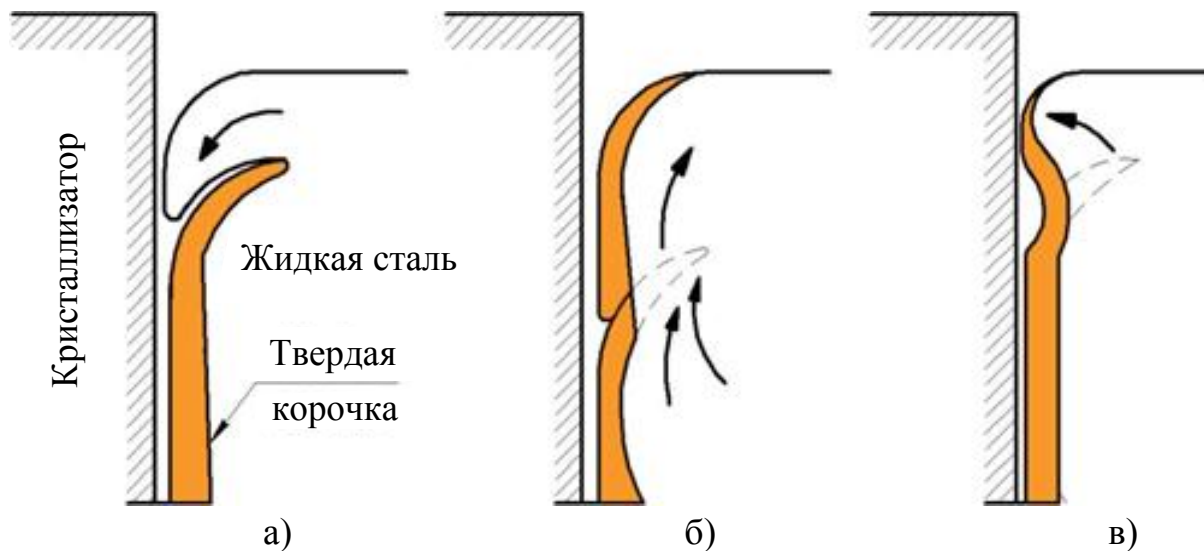


Рисунок 4 – Формирование следов качания согласно механизму, представленному в работе [18]

В работе [18] высказывается мнение о двух видах следов качания: следов перелива и складчатых следов, иными словами следов качания с наличием подповерхностных «гребешков», и без них. Основой формирования обоих видов следов качания являются переливы жидкого металла через затвердевающий мениск. Различия во внешнем виде таких следов качания объясняются местом их формирования в цикле качания. Следы перелива образуются во время движения кристаллизатора вниз, а складчатые следы – во время движения кристаллизатора вверх. В работе также высказывается мнение о возможности предупреждения формирования следов качания, для чего необходимо предупреждать переливы с помощью использования «идеальной» частоты качания кристаллизатора.

В работе [19] предложено три различных механизма формирования следов качания, обусловленных кристаллизацией мениска (рисунок 5). Ис-

следователи считают, что размер и форма следов качания зависят от отвода теплоты, характеристик качания и свойств поверхности раздела.



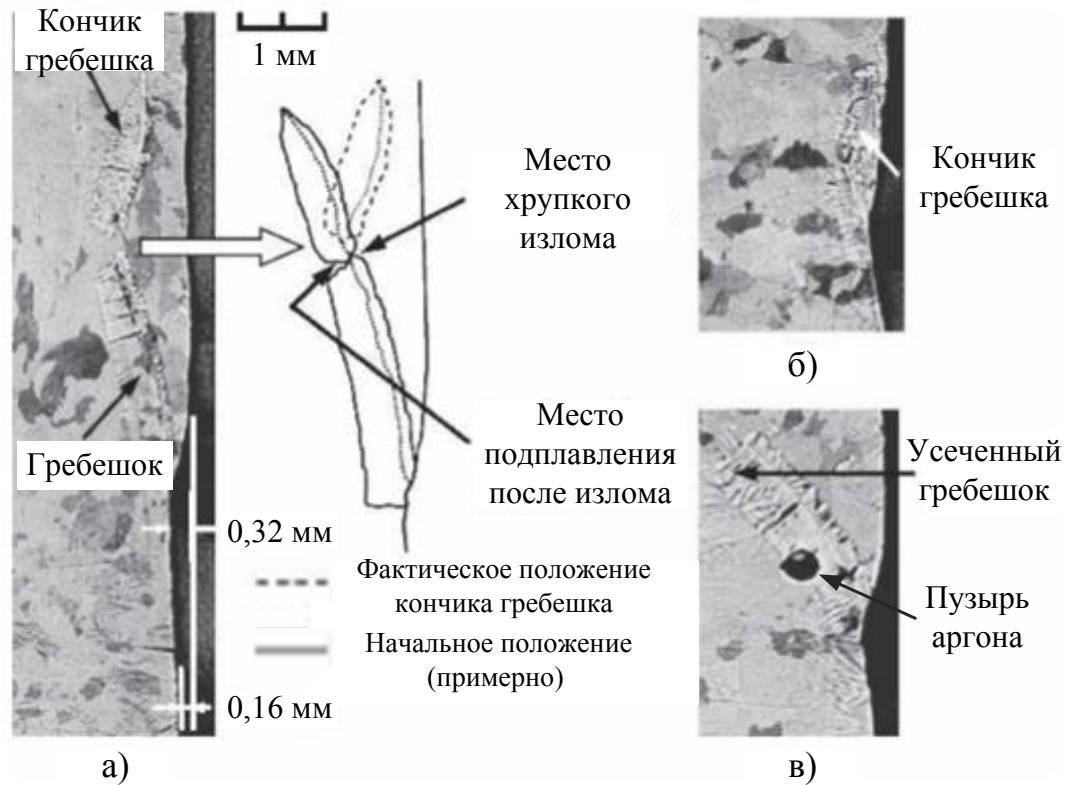
а) качания кристаллизатора и вытягивание заготовки приводят к переливу жидкого металла на твердый заворот; переливная жидкость кристаллизуется вдоль стенки, образуя новую верхушку корочки; б) подобно (а), но с частичным либо полным расплавлением верхушки корочки; в) ферростатическое давление изгибает затвердевшую корочку назад к стенке кристаллизатора

Рисунок 5 – Механизмы формирования следов качания согласно данным работы [18]

Механизм застывания мениска и перелива металла подтвержден современными металлографическими исследованиями, проводимыми на специально травленых образцах ультранизкоуглеродистой стали [13], на которых ясно были видны дендриты, происходящие из различных мест образования центров кристаллизации, расположенных на или около линии зарождения «гребешка» (рисунок 6). Эта линия является мгновенной формой застывшего мениска, основанного на геометрическом сопоставлении между измеренными на практике изогнутыми формами «гребешка» и формой мениска, рассчитанной по уравнениям 1-3 [17]. Таким образом, застывание мениска способствует формированию изогнутых «гребешков» в ультранизкоуглеродистой стали.

На рисунке 6 показаны три различных подповерхностных «гребешка» от образца сляба, свидетельствующие, что кончик «гребешка» может отламываться от затвердевшей корочки. Это вызвано хрупким изломом, обусловленным силами инерции и подъемной силы, действующими на кончик, когда расплавленная сталь переливается через кривой «гребешок».





а) хрупкий излом кончика «гребешка»; б) «гребешок» отодвинут к поверхности сляба, или расплавился/переместился вглубь заготовки; в) характерный усеченный «гребешок».

Рисунок 6 – Возможные виды образующихся «гребешков».

Края кончика «гребешка» и сломанного «гребешка» на рисунке 6 (а) выравниваются почти точно, за исключением небольшой части левого края, который очевидно подплавился поступающей жидкой сталью. Остальная часть кончика «гребешка» захватывается затвердевающей корочкой, растущей выше «гребешка». Сломанный кончик корочки на рисунке 6 (б) был перенесен перелившейся жидкостью на поверхность сляба. Подобный механизм объясняет присутствие усеченного края, наблюдаемого почти на всех «гребешках», как показано на рисунке 6 (в).

На рисунке 6 (в) также можно увидеть яркий пример того, что в районе формируемого подповерхностного «гребешка» часто содержатся захваченные пузыри аргона, а также частицы ШОС. В то же время, район «гребешка» является концентратором напряжений на поверхности непрерывнолитых слитков за счет повышенной сегрегации серы, фосфора и других неметаллических включений, что может вызвать появление поперечных трещин на поверхности непрерывнолитых заготовок и в конечном прокате.

## Выводы

Таким образом, практически во всех рассмотренных теоретических моделях высказывается предположение, что образование следов качания в различной степени зависит от параметров качания кристаллизатора, плотности контакта между корочкой заготовки и стенкой кристаллизатора, явления перелива стали, вызванного колебанием уровня металла в кристаллизаторе, а также от характеристик смазки и теплопередачи между стенкой кристаллизатора и заготовкой [2,12,16]. Управление вышеперечисленными параметрами непрерывной разливки, позволяет уменьшить глубину следов качания на поверхности непрерывнолитых заготовок.

Между тем существуют значительные различия в описании механизмов формирования следов качания, связанные со сложностью визуального наблюдения за процессом и множеством меняющихся во времени явлений, происходящих в области жидкого мениска в течение цикла качания, где затвердевающая корочка заготовки контактирует с водоохлаждаемой медной стенкой кристаллизатора. Наиболее вероятным, на наш взгляд, является механизм, основанный на затвердевании мениска и переливе жидкой стали через его край, при котором, как правило, формируются подповерхностные «гребешки», значительно ухудшающие качество поверхности непрерывнолитых заготовок.

Одним из наиболее эффективных направлений улучшения качества поверхности непрерывнолитого металла, за счет уменьшения глубины следов качания, является снижение теплоотвода в кристаллизаторе в зоне жидкого мениска формирующейся заготовки, что и необходимо проанализировать в ходе дальнейших исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Takeuchi, E. The Formation of Oscillation Marks in the Continuous Casting of Steel Slabs / E. Takeuchi, J.K. Brimacombe // *Metallurgical and Materials Transactions B*. –1984. – vol. 15B (3). – pp. 493-509.
3. Emi, T. Influence of Physical and Chemical Properties of Mold Powders on the Solidification and Occurrence of Surface Defects of Strand Cast Slabs / T. Emi // *Proceedings of National Open Hearth and Basic Oxygen Steel Conference*. – 1978 (61). – pp. 350–361.
4. Savage, J. Problem of Rupture of Billet in Continuous Casting of Steel / J. Savage, W.H. Pritchard // *Iron and Steel* – 1954. – vol. 27 (14) – pp. 649–652.
5. Sato, R. Powder Fluxes for Ingot Making and Continuous Casting / R. Sato // *Proceedings of National Open Hearth and Basic Oxygen Steel Conference* – 1979 (62). – pp. 48–67.
6. Szekeres, E.S. Overview of Mold Oscillation in Continuous Casting / E.S. Szekeres // *Iron and Steel Engineer*. – 1996. – vol. 73 (7). – pp. 29–37.

7. Schwerdtfeger, K. Depth of Oscillation Marks Forming in Continuous Casting of Steel / K. Schwerdtfeger, H. Sha // Metallurgical and Materials Transactions B – 2000. – vol. 31B. – pp. 813–826.
8. Thomas, B.G. Thermal Distortion of Solidifying Shell Near Meniscus in Continuous Casting of Steel / B.G. Thomas, H. Zhu // Solidification Science and Processing, ed. I. Ohnaka and D.M. Stefanescu (Warrendale, PA: TMS). – 1996. – pp. 197–208.
9. Saucedo, I.G. Conference on Solidification Technology in the foundry and cast house. / I.G. Saucedo, J. Beech, G. J. Davies // - Warwick, Coventry, 15-17 September 1980. – P. 93-101.
10. Saucedo, I.G. Early Solidification during the Continuous Casting of Steel / I.G. Saucedo // Steelmaking Conference Proceedings (Warrendale, PA: ISS-AIME). – 1991. – pp. 43–53.
11. Mizukami, H. High Temperature Deformation Behavior of Peritectic Carbon Steel during Solidification / H. Mizukami, A. Yamanaka, and T. Watanabe // ISIJ International. – 2002. – vol. 42 (9). – pp. 964–973.
12. Sengupta, J. Mechanism of Hook Formation during Continuous Casting of Ultra-low Carbon Steel Slabs / J. Sengupta // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2006. – 37A (5). – pp. 1597–1611.
13. Sengupta, J. Micrograph Evidence of Meniscus Solidification and Sub-Surface Microstructure Evolution in Continuous-Cast Ultra-Low Carbon Steels / J. Sengupta // Acta Materialia. – 2006. – 54 (4), pp. 1165–1173.
14. Bo, K. Mechanism of Oscillation Mark Formation in Continuous Casting of Steel / K. Bo // Journal of University of Science and Technology Beijing. – 2000. – 7 (3). – pp. 189–192.
15. Putz, O. Investigations of Flow Conditions and Solidification in Continuous Casting Moulds by Advanced Simulation Techniques / O. Putz, O. Breinfeld, and S. Rodl // Steel Research. – 2003. – 74 (11-12). – pp. 686–692.
16. 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.
17. Bikerman, J.J. Physical Surfaces / J.J. Bikerman. – New York: Academic Press, Inc., 1970. – 476 p.
18. Elfsberg, J. Oscillation Mark Formation in Continuous Casting Processes: Doctoral dissertation by permission from the Royal Institute of Technology set forth for public scrutiny for the Degree of Licentiate / J. Elfsberg. – Stockholm, 2003. – 56 p.
19. Delhalle, A. Control of the First Shell Formation During Continuous Casting of Steel / A. Delhalle, M. Larrecq, J. Petegnief and J.P. Radot // 4th Intl. Conf. on Continuous Casting Proc., 1, Brussels, Belgium, May 17–19, 1988, 38–48.

Надійшла до редакції 05.12.2012

Рецензент докт. техн. наук, проф. Є.М. Смірнов

О.М. Смирнов\*, С.В. Куберський\*\*, А.В. Головчанський\*\*, В.А. Головатий\*

\* Донецький національний технічний університет, Донецьк,

\*\* Донбаський державний технічний університет, Алчевськ

**АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ ФОРМУВАННЯ СЛІДІВ ХИТАННЯ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОЇ ЗАГОТОВКИ**

В роботі проведено аналіз основних механізмів формування слідів хитання, а також пі-

дповерхневих «гребінців» в безперервнолитих заготовках. Такі дефекти можуть призводити до появи поперечних тріщин на поверхні заготовок, значно погіршуючи їх якість. Встановлено, що найбільш ефективним напрямком, який сприяє підвищенню якості поверхні безперервнолитих заготовок, може бути зменшення інтенсивності тепловідведення у районі рідкого меніска за рахунок використання різних покриттів або керамічних матеріалів у верхній частині кристалізатора.

Ключові слова: сліди хитання, «гребінець», перелив, коринка, затвердіння, ШУС.

A.N. Smirnov\*, S.V. Kubersky\*\*, A.V. Golovchansky\*, V.A. Golovatyu\*\*

\* Donetsk National Technical University, Donetsk

\*\* Donbass State Technical University, Alchevsk

#### THE ANALYSIS OF THE MECHANISMS OF OSCILLATION MARK FORMATION OF CONTINUOUSLY CAST BILLETS

The analysis of the main mechanisms of oscillation mark formation and subsurface "hooks" in continuously cast billets is carried out in this work. Such defects can lead to appearance of transverse cracks on the billets surface, considerably worsening their quality. It is established that reduction of heat transfer intensity in the liquid meniscus region at the expense of using various coverings or ceramic materials in the top part of the mold can be the most effective direction promoting improvement of surface quality of continuously cast billets.

Keywords: oscillation mark, "hook", overflow, shell, solidification, mold flux.