

МЕХАНИЗМ И ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ НА СЛЯБАХ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ ТИТАНОМ

И.В. Фокин¹, Ю.А. Гудим²

¹ ЗАО «Аконт», г. Челябинск,

² ООО «Промышленная компания „Технология металлов“», г. Челябинск

Статья посвящена определению структуры потерь металла при выплавке нержавеющей стали, легированной титаном, и разлива данной стали на машине непрерывной разлива криволинейного типа. Описана гипотеза о механизме образования дефекта на поверхности непрерывнолитых слябов и приведены рекомендации по снижению объема зачистки дефектов. Рассмотрены работы других авторов, в которых выдвигались предположения, что данный дефект вызывается заворотом корки, аналогично разливу нержавеющей стали в изложницы; что он образуется из-за опускания в жидкий металл, находящийся в кристаллизаторе, грубых шлако-металлических корок, которые образуются при взаимодействии растворенного титана с кислородом и шамотной футеровки промковша; что существует связь между прокатной пленой и качеством разливочной шлаковой смеси для кристаллизатора и характером потоков металла в кристаллизаторе. Также приведена аргументированная критика версий о том, что для получения слябов с минимальным количеством поверхностных дефектов необходимо снижать количество растворенного в металле азота. Показано влияние растворенного азота и титана на уровень зачистки непрерывнолитых слябов, предложены способы снижения данного дефекта, а также описаны факторы, оказывающие влияние на его развитие.

Ключевые слова: потери металла; непрерывная разливка нержавеющей стали, содержащей титан; нержавеющая сталь, легированная титаном; механизм образования дефектов.

При непрерывной разливе нержавеющей стали, легированной титаном, получаемые слябы, как правило, поражаются глубокими поверхностными дефектами, чаще всего в специальной литературе называемыми «корки», «корочки», «завороты корки» и т. д. Наличие таких дефектов вызывает необходимость дополнительной зачистки слябов, увеличивающей потери высоколегированного металла.

Поэтому приходится либо увеличивать производство нержавеющей стали нелегированной титаном (насколько это возможно), либо изыскивать способы и приемы борьбы с глубокими поверхностными дефектами и реализовывать эти приемы в производственной практике. Разработке способов борьбы с глубокими поверхностными дефектами нержавеющей стали должно помочь исследование и уточнение механизма и причин образования таких дефектов при непрерывной разливе нержавеющей стали, легированной титаном.

В отечественной литературе этому вопросу посвящено сравнительно небольшое количество публикаций [1–10], так же как и в зарубежной. Малый объем публикаций по такому важному вопросу в нашей стране, скорее всего, вызван сравнительно небольшим количеством нержавеющей стали, производимой и разливаемой на МНЛЗ, также попытками производителей засекретить используемые приемы.

Высказывается мнение, что причиной образования глубоких поверхностных дефектов литых слябов при разливе нержавеющей стали, легированной титаном на МНЛЗ, как при разливе в изложницы является заворот грубой корки, образовавшийся на поверхности металла в кристаллизаторе и приварившейся к стенкам кристаллизатора, в результате охлаждения поверхностного слоя металла и осаждения на нем тугоплавких включений оксидов и нитридов титана и хрома [1]. Если принять такую точку зрения, то трудно объяснить, как и почему образовывается такая грубая корка с высоким содержанием тугоплавких включений на поверхности металла, покрытого слоем легкоплавкого шлака и практически полной изоляции струи металла, поступающего из сталеразливочного ковша через промежуточный ковш и погружной огнеупорный стакан в кристаллизатор.

В работах, выполненных под руководством Г.Н. Еланского [4–7], утверждается, что непосредственной причиной появления глубоких поверхностных дефектов на непрерывно литых слябах стали 08X17T, является опускание в жидкий металл, находящийся в кристаллизаторе, грубых шлако-металлических корок, образующихся на границе покровного шлака и зеркала металла. Авторы [7] считают, что причиной образования грубой шлакометаллической корочки в слое шлака на зеркале металла являются оксиды титана TiO_2 . Оксиды титана возникают в результате взаимодействия

растворенного в стали титана с кислородом, а также нитридов титана с кремнеземом шамотной футеровки промковша и твердым кремнеземом еще не растворившейся ШОС (шлакообразующей смеси).

Грубые шлакометаллические корки, аналогичные описанным в [5–7], периодически обнаруживаются и при непрерывной разливке стали 12X18H10T на слябовой криволинейной МНЛЗ с качающимся кристаллизатором и периклазовой футеровкой промковша [2, 3, 8].

Тезис о возможности опускания грубых шлакометаллических корок в жидкий металл, находящийся в кристаллизаторе [5–7] вызывает сомнения, так как кажущуюся плотность такой корки, определенная нами, колебалась в пределах 6,0–6,5 кг/дм³, что заметно ниже плотности жидкой стали.

Можно согласиться с тем, что тугоплавкие оксиды титана участвуют в процессе образования грубых шлакометаллических корок, но трудно согласиться с тем, что оксиды титана являются причиной образования этих корок. Взаимодействие нитридов титана с кремнеземом ШОС термодинамически возможно, но с точки зрения кинетики процесса – маловероятно.

Имеющиеся данные [9] о влиянии содержания кислорода в металле на качество поверхности листов коррозионноустойчивых титаносодержащих сталей, полученных из слитков, отлитых в чугунные изложницы, подтверждают косвенно тезис о влиянии оксидов титана на количество и размеры поверхностных дефектов слитка.

В работе [10] приведены результаты изучения причин образования плен, вызванных скоплениями неметаллических включений на поверхности слябов нелегированной стали в условиях ММК. Показано, что спектрограмма шлака из кристаллизатора наиболее близка к спектрограмме образца проката с дефектом «плена слиточная по скоплениям неметаллических включений», и утверждается, что наиболее вероятным источником неметаллических включений в прокате может являться ШОС, используемый в кристаллизаторе. Указывается, что причиной попадания частиц ШОС в металл может быть временный переход жидкой (гомогенной) ШОС в гетерогенное состояние вследствие пониженной температуры разливаемого металла, недостаточным расходом ШОС, повышенным загрязнением разливаемого металла, всплывающими в шлак оксидными неметаллическими включениями, повышенной влажностью шлакообразующей смеси.

Данные приведенные в [10] показывают, что даже при непрерывной разливке сталей нелегированных титаном, возможно образование поверхностных дефектов, аналогичных поверхностным дефектам слябов нержавеющей стали и очень сильное влияние на процессы образования таких дефектов оказывают свойства и состояние ШОС на

поверхности металла в кристаллизаторе.

Авторы [11] установили зависимость между возникновением поверхностных дефектов непрерывно литых заготовок, неудовлетворительным качеством шлакообразующей смеси и характером потоков металла в кристаллизаторе.

Следует отметить, что, несмотря на использование различной терминологии при описании глубоких поверхностных дефектов непрерывно литой нержавеющей стали разными авторами, как правило, дефекты представляют собой скопления неметаллических включений, проникшие в металл на значительную глубину. В составе этих скоплений обычно присутствуют типично шлаковые экзогенные включения и некоторое количество эндогенных включений взаимодействия титана с кислородом и азотом. Отличается также наличие некоторого количества включений глинозема, часто в составе сложных неметаллических включений. В прокатном листовом металле неудаленные скопления включений присутствуют в виде строчек, снижающих качество металла и вызывающих отбраковку тонкого листа.

Исходя из этого, в производственной практике рекомендуется мероприятия, снижающие количество азота и кислорода в металле, исключающие возможность вторичного окисления металла при разливке и попадании шлака из сталеразливочного ковша в кристаллизатор.

Наши исследования не выявили заметного влияния содержания азота, углерода и титана в нержавеющей стали, легированной титаном, на степень развития поверхностных дефектов на слябах и объем зачистки (величину «съёма») металла (рис. 1, 2).

Заметное влияние содержание азота на степень развития поверхностных дефектов непрерывно литой нержавеющей стали возможно лишь при высоких концентрациях азота, но применяемые варианты технологии производства позволяют исключить возможность получения таких высоких концентраций. Поэтому борьба за снижение степени развития поверхностных дефектов должна проходить в основном в процессе разливки стали.

Анализ литературных данных и результатов наших исследований позволяет описать механизм и причины образования глубоких поверхностных дефектов непрерывно литой нержавеющей стали, следующим образом.

На поверхности металла в кристаллизаторе в результате подстуживания этой поверхности сверху шлаком и сбoku стенками кристаллизатора образуется тонкие слои («корочки») остывшего затвердевшего металла.

Если такие корочки не загрязнены или не очень загрязнены прилипшими частицами шлака, то они, опускаясь в месте с жидким металлом, попадают в тело формирующегося непрерывного слитка и там практически бесследно усваиваются

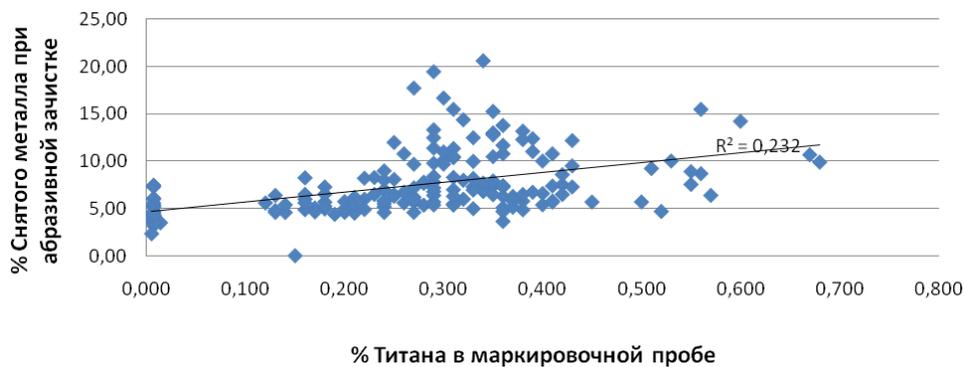


Рис. 1

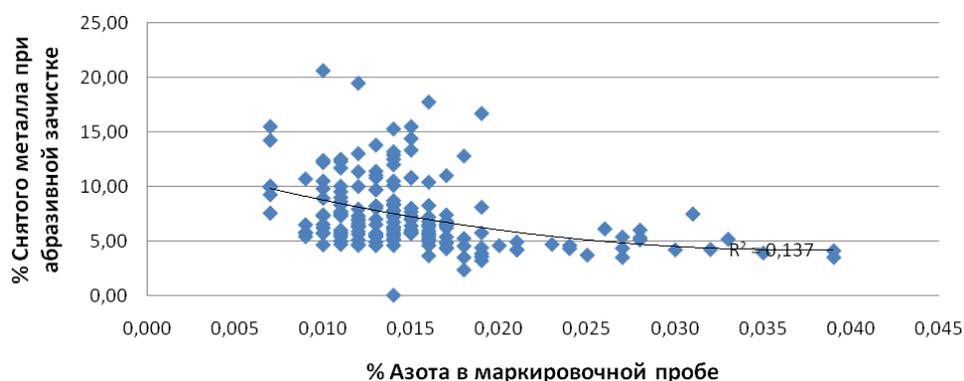


Рис. 2

металлом. Такая картина наблюдается при нормальной работе участка разливки.

В отдельных случаях затвердевающая металлическая корочка на поверхности жидкого металла в кристаллизаторе может превратиться в шлакометаллическую корочку вследствие прилипания к ней частиц жидкого шлака и нерастворившейся ШОС. Шлакометаллическая корочка на поверхности металла в кристаллизаторе может образоваться, если:

- адгезия шлака к металлу велика или в какой-то момент возрастает вследствие изменения состава шлака;

- на поверхность металла попадают не расплавленные частицы ШОС;

- в какой-то момент в результате сильного охлаждения тонкий поверхностный слой металла станет твердым и к нему приварятся частицы жидкого шлака и ШОС, и на нем будут осаждаться из металла включения TiO_2 и TiN .

Образовавшаяся на поверхности металла шлакометаллическая корочка затягивается и опускается вместе с металлом в тело кристаллизующегося слитка в результате воздействия струй металла, выходящих из погружного стакана, которые частично размывают корочку и заливают ее жидким металлом (рис. 3).

Шлакометаллическая корочка фиксируется в теле кристаллизующегося слитка, металлическая часть корочки «улавливается» металлом, а шлако-

вые компоненты корочки и осевшие на них в процессе кристаллизации металла включения TiO_2 , TiN , Al_2O_3 и образуют поверхностный дефект. Глубина проникновения этого дефекта в тело слитка определяется величиной исходной корочки и ее расположением на поверхности металла относительно стенок кристаллизатора.

Часть образовавшейся на поверхности металла шлакометаллической корочки может иногда временно прилипнуть к стенке кристаллизатора. Прилипшая корочка увеличивается в объеме в результате продолжающегося налипания на ее поверхность шлаковых частиц и тугоплавких неметаллических включений. В теле увеличившейся корочки протекают процессы с образованием газообразных продуктов. Возможно, это взаимодействие углерода ШОС с кремнеземом, менее вероятно, взаимодействие TiN с кремнеземом [5], возможно, даже просто испарение влаги, содержащейся в ШОС. В теле крупной шлакометаллической корки образуются газовые пузыри, уменьшающие ее плотность. В результате этого, а также воздействия восходящих потоков металла, выходящих из погружного стакана, крупная шлакометаллическая корка отрывается от стенки кристаллизатора и оказывается в покровном шлаке, плавая на поверхности металла. Образуется тело, называемое производственными «корж», которое периодически извлекается из покровного шлака разливщиками.

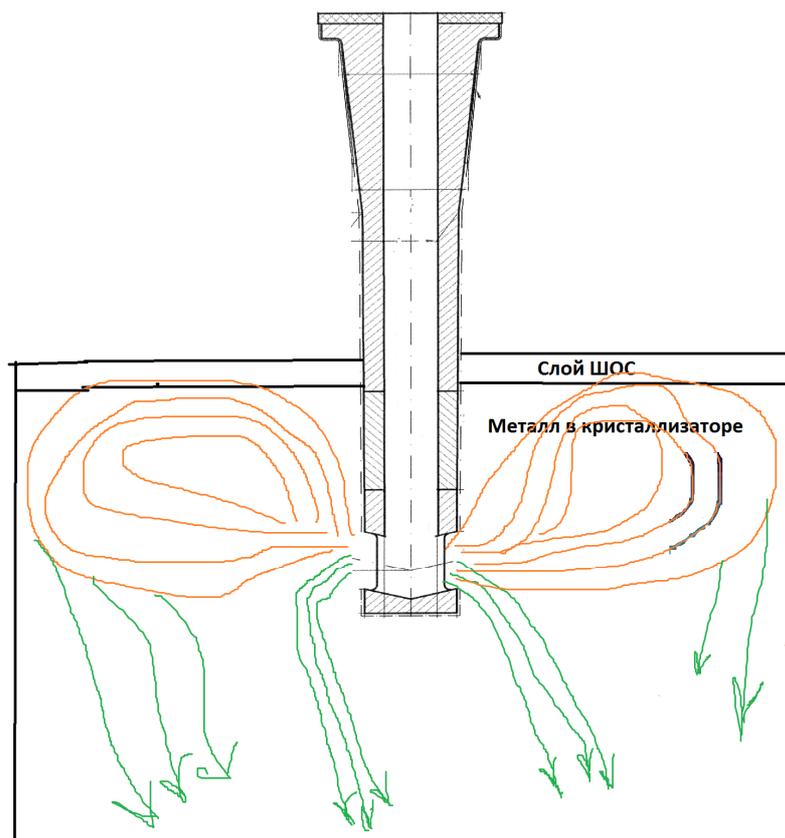


Рис. 3. Направление потоков металла, выходящих из погружного стакана, в кристаллизаторе

Полностью исключить процесс образования шлакометаллических корочек на поверхности металла в кристаллизаторе и попадание их в тело кристаллизующегося слитка, а также последующие выделение на них тугоплавких неметаллических включений нельзя.

Но уже сейчас известны и должны применяться и применяются в производственной практике следующие способы ведения процессов выплавки и непрерывной разливки нержавеющей стали, содержащих титан, позволяющие существенно снизить потери металла, вследствие развития поверхностных дефектов:

- использование шихтовых материалов, особенно ферросплавов с пониженным содержанием азота и других вредных примесей;

- исключение полностью или уменьшение контакта жидкого металла с воздухом в процессе выплавки, внепечной обработки и особенно непрерывной разливки стали;

- подбор оптимальной стартовой огнеупорной порошковой смеси для заполнения разливочного канала сталковша для открывания шибера затвора сталковшей на МНЛЗ автостартом. Для получения наилучшего результата необходимо испробовать не только различные физико-химические и гранулометрические рецепты стартовых смесей, но и подобрать оптимальную фа-

совку и способ подачи стартовой смеси в разливочный канал сталковша;

- тщательное (глубокое) раскисление металла до легирования титаном с целью уменьшения количества образующихся включений оксидов титана;

- использование сталеразливочных и промежуточных ковшей с высокоогнеупорной (периклазовой) футеровкой;

- использование при непрерывной разливке стали шлакообразующих смесей (ШОС) для промежуточного ковша и кристаллизатора оптимального состава;

- механизация или автоматизация подачи ШОС в кристаллизатор с рациональной скоростью;

- использование погружных стаканов, подающих металл из промежуточного ковша в кристаллизатор, рациональной конструкции;

- рациональная скорость вытягивания слитка и рациональная скорость качания кристаллизатора.

Использование этих способов оказывает реальное влияние на объем зачистки непрерывнолитых сляб. При зачистке разделяют плавки по характеристикам разливки в зависимости от следующих факторов: открывание сталковша автостартом или прожигание сталеразливочного канала кислородной трубкой, были ли колебания уров-

ня металла в кристаллизаторе, соответствовали ли температура и скорость разливки стали нормам для данной МНЛЗ. В зависимости от нарушения или соблюдения данных параметров рекомендуется зачищать слябы по разному. В случае отсутствия нарушений – использовать зачистку только мелким зерном, в случае нарушений – использовать комбинированную зачистку. Как показывает опыт, на плавках без нарушений объем зачистки составляет порядка 3,7 %, а на плавках с нарушением не менее 5,5 % от массы слябов.

Заключение

Исследование причин образования глубоких поверхностных дефектов на слябах при непрерывной разливке нержавеющей стали, легированных титаном, показало, что решающее значение в борьбе за снижение потерь металла вследствие зачистки поверхности сляб имеет качество выполнения работ на участке разливки стали. Соблюдение и качественное выполнение уже известных технологических приемов может существенно уменьшить потери металла при зачистке непрерывнолитых слябов нержавеющей стали.

Литература

1. Особенности непрерывной разливки коррозионностойкой стали / В.М. Пашин, А.В. Ларин, И.И. Шейнфельд и др. // *Металлург.* – 2001. – № 10. – С. 43–46.
2. Токовой, О.К. Исследование дефекта «корж» непрерывнолитой аустенитной нержавеющей стали / О.К. Токовой, Д.В. Шабуров // *Известия вузов. Черная Metallургия.* – 2013. – № 7. – С. 19–22.
3. Токовой, О.К. К вопросу о механизме образования дефекта «корж» в непрерывнолитой аустенитной нержавеющей стали и методы его уменьшения / О.К. Токовой, Д.В. Шабуров // *Известия вузов. Черная Metallургия.* – 2013. – № 9. – С. 22–25.
4. Сургаева, Е.В. Влияние условий формирования заготовки в кристаллизаторе при непрерывной разливке на качество холоднокатаной ленты / Е.В. Сургаева, Г.Н. Еланский, М.П. Галкин // *Электрометаллургия.* – 2001. – № 10. – С. 31–37.
5. Исследование шлакометаллической корочки, образующейся в кристаллизаторе при непрерывной разливке стали 08X17T / Е.В. Сургаева, Г.Н. Еланский, М.П. Галкин и др. // *Электрометаллургия.* – 2002. – № 5. – С. 22–25.
6. Сургаева, Е.В. Работа шлакообразующей смеси в кристаллизаторе при разливке на УНРС коррозионностойких титаносодержащих сталей / Е.В. Сургаева, М.П. Галкин, Г.Н. Еланский // *Труды седьмого конгресса сталеплавыльщиков.* – М., 2003. – С. 524–529.
7. Еланский, Г.Н. Причины возникновения плен и шлакометаллических корочек при разливке титаносодержащих коррозионностойких сталей / Г.Н. Еланский, С.Н. Падерин, Е.В. Сургаева // *Сталь.* – 2005. – № 9. – С. 17–19.
8. Фокин, И.В. Структура потерь металла в процессе выплавки нержавеющей стали / И.В. Фокин, Ю.А. Гудим // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Metallургия».* – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 33–37.
9. Влияние кислорода на качество поверхности листов коррозионностойких титаносодержащих сталей / В.П. Павлов, А.П. Данилов, И.А. Козырев и др. // *Сталь.* – 2002. – № 2. – С. 32–34.
10. Изучение причин образования дефекта «плен» из-за неметаллических включений в слябах на прокате / Е.П. Лозовский, С.Н. Ушаков, Д.В. Юречко и др. // *Сталь.* – 2009. – № 10. – С. 26–28.
11. Шоне Дж. Дефекты поверхности непрерывнолитой нержавеющей стали / Дж. Шоне, О. Гриндер, П. Хассельстром // *Чистая сталь: сб.* – М.: Metallургия, 1987. – С. 251–271.

Фокин Игорь Владимирович, старший научный сотрудник, ЗАО «Аконт», г. Челябинск; ferrousmetallurgy@mail.ru.

Гудим Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, ООО «Промышленная компания „Технология металлов“», г. Челябинск; kontakt-ru@technologya-metallrov.com.

Поступила в редакцию 21 марта 2016 г.

MECHANISM AND REASONS OF DEEP SURFACE DEFECT FORMATION ON CONTINUOUSLY CAST SLABS OF STAINLESS STEELS WITH TITANIUM

I.V. Fokin¹, ferrousmetallurgy@mail.ru,
Yu.A. Gudim², kontakt-ru@technologiya-metallov.com

¹ JSC "Akort", Chelyabinsk, Russian Federation,

² LLC "Industrial Company "Technologiya Metallov", Chelyabinsk, Russian Federation

The paper considers the structure of metal losses in melting stainless steel with titanium and casting the steel in curved-type continuous casting machine. A hypothesis on the mechanism of surface defect formation on continuously cast slabs is described and recommendations to decrease the amount of trimming of defects are given. In other authors' works it was supposed that this defect is caused by rippled surface like in ingot casting of stainless steel by uphill teeming; by sinking into liquid metal of raw slag-metal shells formed by interaction of dissolved titanium with oxygen and chamotte refractory lining of tundish; that there is relation between surface defects and the quality of slag mix for continuous casting machine mould and the character of distribution of metal streams in the mould. Arguments to criticize the versions that decreasing the amount of dissolved nitrogen is the key factor in obtaining better slab surface quality are also presented. Effect of dissolved nitrogen and titanium on trimming level of continuously cast slabs is shown, the ways to decrease this defect are proposed and the factors affecting its appearance are described.

Keywords: metal losses; continuous casting of stainless steel with titanium; titanium-bearing stainless steel; mechanism of formation of surface defects.

References

1. Parshin V.M., Larin A.V., Sheinfel'd I.I., Korotkov B.A., Chigrinov A.M. Features of the Continuous Casting of Corrosion-Resistant Steel. *Metallurgist*, 2001, vol. 45, no. 9–10, pp. 391–396. DOI: 10.1023/A:1017980224693
2. Tokovoi O.K., Shaburov D.V. [Study of «Cake» Defect in Continuously Cast Austenitic Stainless Steel 18Cr–10Ni–1Ti. Report 1]. *Izvestiya VUZ. Chernaya metallurgiya*, 2013, no. 7, pp. 19–22. (in Russ.)
3. Tokovoi O.K., Shaburov D.V. [On the Mechanism of Formation of «Cake» Defect in Continuously Cast Austenitic Stainless Steel and Measures to Reduce It. Report 2]. *Izvestiya VUZ. Chernaya metallurgiya*, 2013, no. 9, pp. 22–25. (in Russ.)
4. Surgaeva E.V., Elanskii G.N., Galkin M.P. [Effect of Conditions of Billet Formation in Continuous Casting Crystallizer on the Quality of Cold-Rolled Band]. *Elektrometallurgiya*, 2001, no. 10, pp. 31–37. (in Russ.)
5. Surgaeva E.V., Elanskii G.N., Galkin M.P. et al. [Investigation of Slag-Metal Shell Forming in the Crystallizer During Continuous Casting of the 08Kh17T Steel]. *Elektrometallurgiya*, 2002, no. 5, pp. 22–25. (in Russ.)
6. Surgaeva E.V., Galkin M.P., Elanskii G.N. [Operation of Slag-Forming Mixture in the Crystallizer During Continuous Casting of Titanium-Bearing Corrosion-Resistant Steels]. *Trudy sed'mogo kongressa staleplavil'shchikov* [Proceedings of the 7th Congress of Steelmakers]. Moscow, 2003, pp. 524–529. (in Russ.)
7. Elanskii G.N., Paderin S.N., Surgaeva E.V. [Formation of Scabs and Slag-Metallic Shells During Casting the Stainless Steel]. *Stal'*, 2005, no. 9, pp. 17–19. (in Russ.)
8. Fokin I.V., Gudim Yu.A. [Structure of Metal Losses During Stainless Steel Production]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 33–37. (in Russ.)
9. Pavlov V.P., Danilov A.P., Kozyrev I.A. et al. [Effect of Oxygen on Surface Quality of Titanium-Bearing Corrosion-Resistant Steel Sheets]. *Stal'*, 2002, no. 2, pp. 32–34. (in Russ.)
10. Lozovskii E.P., Ushakov S.N., Yurechko D.V., Masal'skii T.S., Filippov A.V. Formation of flaws on account of nonmetallic inclusions in the slabs during rolling. *Steel in Translation*, 2009, vol. 39, no. 10, pp. 893–895. DOI: 10.3103/S096709120910012X

11. Chone J., Grindler O., Hasselström P. [Surface Defects of Continuously Cast Stainless Steel]. *Clean Steel. Proc. in English of the Second Int. Conf. on Clean Steel held on 1–3 June 1981 at Balatonfüred, Hungary.* London, The Metals Society, 1983.

Received 21 March 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Фокин, И.В. Механизм и причины образования глубоких поверхностных дефектов на слябах при непрерывной разливке нержавеющей стали, легированной титаном / И.В. Фокин, Ю.А. Гудим // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 56–62. DOI: 10.14529/met160308

FOR CITATION

Fokin I.V., Gudim Yu.A. Mechanism and Reasons of Deep Surface Defect Formation on Continuously Cast Slabs of Stainless Steels with Titanium. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 56–62. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160308