МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕСС ЗАРАСТАНИЯ КАНАЛА КОВШОВОГО ЗАТВОРА

С. П. ЕРОНЬКО, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Механическое оборудование заводов черной металлургии”, ersp@meta.ua;

М. Ю. ТКАЧЕВ, канд. техн. наук, доцент кафедры “Механическое оборудование заводов черной металлургии”;

*Е. А. ПОНАМАРЕВА, аспирант кафедры “Механическое оборудование заводов черной металлургии”
(Донецкий национальный технический университет, Украина, г. Донецк)*

Аннотация. Проблема затягивания выпускного канала сталеразливочного ковша, несмотря на многочисленные исследовательские работы, проводившиеся с целью установления факторов, способствующих интенсивному уменьшению живого сечения потока жидкости и поиску путей устранения этого явления, с которым столкнулись производственники после замены стопорных устройств шиберными затворами, до настоящего времени остается нерешенной и весьма актуальной.

Проанализированы причины и механизм формирования отложений на стенках канала шиберных затворов, обеспечивающих регулируемый перелив стали из разливочных и промежуточных ковшей. Рассмотрены разработанные ранее меры по снижению интенсивности зарастания канала разливочного стакана.

Приведены результаты проверки на физической модели шиберного затвора возможности активного влияния на механику процесса затягивания его канала динамического воздействия, осуществляемого на корпус разливочного устройства с помощью вибратора, возбуждающего колебания низкой частоты в вертикальной плоскости. Эксперименты проведены для двух вариантов положения подвижной плиты затвора: при полном перекрытии его канала и при отсутствии дросселирования струи. Плоская модель затвора выполнена из органического стекла в масштабе 1:2 по отношению к натурному образцу. Направленный отвод тепла в боковом направлении от стенок канала разливочного стакана обеспечивали за счет циркуляции воды по двум параллельно расположенным вертикальным полостям. В качестве материала, имитирующего разливаемую сталь, использовали расплав тиосульфата натрия, нагреваемый до температуры 95 °С.

Полученные экспериментальные данные позволили установить влияние частоты и амплитуды колебаний, возбуждаемых в системе модели шиберного затвора, на скорость увеличения толщины слоя отложений на стенках его канала. При одинаковой интенсивности вибрационного воздействия количество кристаллов, разрушаемых в слое отложений, в большей мере зависит от частоты колебаний и в меньшей степени от их амплитуды. Для достижения положительного эффекта от использования вибрационного воздействия на систему ковшового затвора в производственных условиях необходимы новые технические решения, обеспечивающие органическое встраивание в нее узла возбуждения колебаний, который бы одновременно отвечал комплексу требований: компактность, простота и безопасность подвода энергоносителя, возможность гибкого регулирования значений параметров колебательного процесса.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш; модель шиберного затвора; зарастание канала шиберного затвора; разливочный стакан; вибратор.

Ссылка для цитирования. Еронько С.П., Ткачев М.Ю., Понамарева Е.А. Модельные исследования влияния вибрационного воздействия на процесс зарастания канала ковшового затвора // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 1. С. 51–57.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-11-51-57

Проблема затягивания выпускного канала сталеразливочного ковша, с которой столкнулись производственники после замены стопорных устройств шиберными затворами, до настоящего времени остается нерешенной, несмотря на многочисленные исследовательские работы, проводившиеся за последние 50 лет с целью установления факторов, способствующих интенсивному уменьшению живого сечения потока жидкости, и поиска путей устранения этого явления. Полученные при этом теоретические и экспериментальные данные позволили сделать вывод о том, что главные причины и механизм формирования отложений на стенках канала ковшового затвора (рис. 1) обусловлены протекающими в нем гидродинамическими, тепловыми

и химическими процессами [1–3]. Поэтому в качестве действенных мер, направленных на исключение негативных последствий, вызванных указанными процессами, ранее предлагалось:

- использовать ковшовые стаканы со специальным профилем канала, минимизирующим гидравлическое сопротивление потоку металла [4];
- наносить на стенки канала огнеупорных элементов шиберного затвора специальное покрытие, материал которого способен вступить в химическое взаимодействие с отложениями и образовывать при этом легкоплавкие соединения, смыываемые потоком жидкой стали [5–8];
- применять разливочные стаканы с газопроницаемой стенкой, позволяющей осуществлять подачу в сталевыпускной канал под избыточным

давлением инертного газа, пузырьки которого, проникая через поры, должны разрушать слой отложений [1, 9];

- осуществлять подогрев корпуса разливочного стакана за счет тепла, выделяемого при сгорании специальной газовой смеси, вдуваемой через пористый элемент нижней огнеупорной плиты затвора при кратковременном перекрытии его выпускного канала [10, 11];

- поддерживать необходимый тепловой баланс в канале ковшового стакана путем наружного обогрева его корпуса с помощью встроенного в гнездовой блок разливочного узла ковша спирального элемента, к которому подается электропитание [12].

Рис. 1. Продольный разрез настыва, образовавшейся в канале разливочного стакана при его зарастании

Fig. 1. Longitudinal section of scab, formed in the nozzle channel at its clogging

Анализ литературных данных об эффективности отмеченных предложений по снижению числа случаев применения кислорода для промывки канала ковшового затвора из-за уменьшения его проходного сечения свидетельствует о том, что данный вопрос по-прежнему следует считать актуальным и поиски его решения следует продолжить. Одним из путей дальнейших исследований в данной области является изучение возможности активного влияния на механику процесса формирования отложений на стенках канала ковшового затвора вибрационного воздействия с целью разрушения связей между центрами кристаллизации, которые находятся на поверхности огнеупора, контактирующей с расплавом, и формирующимися дендритами. Нарушая их рост, можно предположить снижение скорости увеличения толщины слоя образующихся отложений.

Для качественной оценки такой возможности использовали метод физического моделирования. С этой целью изготовили эксперименталь-

ную установку (рис. 2), включавшую выполненную в масштабе 1:2 плоскую прозрачную модель шибера затвора 6. К ее конструктивной особенности следует отнести наличие двух вертикальных полостей 5, параллельно расположенных относительно разливочного канала по его бокам. Подаваемая по трубкам 7 в полости из напорной емкости 10 вода, имевшая температуру 20 °С, интенсифицировала направленный отвод тепла от стенок разливочного канала, контактирующих с жидкостью, имитирующей металлический расплав. Проходящая через полости вода по трубкам 4 сливалась в расположенный под моделью сосуд 2, из которого затем с помощью насоса 1 закачивалась в напорную емкость 10. Имитатором жидкого металла служил расплав тиосульфата натрия, нагреваемый до температуры 95 °С.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для моделирования процесса зарастания канала ковшового затвора:

1 — насос; 2 — приемная емкость для воды; 3 — приемный желоб для имитатора жидкой стали; 4 — сливной трубопровод; 5 — полости для охлаждающей воды; 6 — плоская модель затвора; 7 — подающий трубопровод; 8 — электрический нагревательный элемент; 9 — ртутный термометр; 10 — напорная емкость с охлаждающей водой; 11 — напорный трубопровод; 12 — емкость с жидким тиосульфатом натрия

Fig. 2. Diagram of experimental facility for simulation of the ladle shutter channel clogging:

1 — pump; 2 — entry chamber for water; 3 — entry channel for the simulator of liquid steel; 4 — discharge pipe; 5 — cavities for cooling water; 6 — plane shutter model; 7 — supply pipe; 8 — electric heating element; 9 — mercury thermometer; 10 — pressure chamber with cooling water; 11 — pressure pipe; 12 — chamber with liquid sodium thiosulfate

В качестве возбудителя вертикальных колебаний, действующих на плоскую прозрачную модель ковшового затвора, использовали жестко прикрепляемый к ее нижней части, специально изготовленный двухдебалансный вибратор направленного действия (рис. 3). Он включал два параллельных вала, установленных в подшипниковых опорах, синхронизированных между собой парой зубчатых колес с одинаковым числом зубьев и несущих на консольных хвостовиках дебалансы. Крутящий момент каждому валу передавался посредством клиноременной передачи от отдельного микродвигателя постоянного тока с регулируемой частотой вращения. Вибратор был укомплектован набором съемных дебалансов с целью реализации ступенчатого изменения обеспечиваемой им возмущающей силы за счет варьирования числа закрепляемых на его валах грузов со смещенным центром массы.

Рис. 3. Вибратор для возбуждения колебаний в модели шиберного затвора

Fig. 3. Vibrator for oscillations exciting in the slide shutter model

Вибрационную нагрузку, прилагаемую к модели ковшового затвора, задавали частотой колебаний и амплитудой. Амплитуду A вычисляли, используя выражение

$$A = m\varepsilon/m_b,$$

где m — масса дебалансов вибратора; ε — эксцентриситет вибратора; m_b — масса вибратора.

Интенсивность вибрационного воздействия, оцениваемую виброускорением, определяли как

$$W = A\omega^2,$$

где ω — угловая скорость дебалансов.

Многолетняя практика применения шиберных затворов свидетельствует о том, что процесс затягивания разливочного стакана ковша наиболее интенсивно развивается в те периоды, когда его сталевыпускной канал перекрыт, что характерно для условий эксплуатации затворов в литейных

цехах, поскольку перед началом перемещения ковша к каждой последующей литейной форме шиберное устройство переводят в закрытое положение.

При непрерывной разливке стали процесс уменьшения эффективного сечения сталевыпускного канала особо остро проявляется у промежуточных ковшей, оборудованных шиберными затворами, когда металл разливают большими сериями. В связи с этим было принято решение в первую очередь смоделировать работу шиберной системы для указанных производственных условий.

На первом этапе модельных исследований планировалось выполнить проверку влияния вибрационного воздействия на скорость роста толщины слоя отложений в условиях отсутствия движущихся потоков металла, способных смыть их с контактной поверхности огнеупора.

Опыты проводили последовательно по двум вариантам имитации процесса разливки. В первом из них моделировали развитие процесса отложения на стенках канала модели слоя частиц с видеофиксацией его толщины через равные промежутки времени при отсутствии вибрационного воздействия (рис. 4, а).

Рис. 4. Форма слоев имитатора настилы, образовавшихся в канале плоской модели затвора в случае отсутствия (а) и наличия вибрационного воздействия на нее (б) при нахождении в перекрытом состоянии в течение 2 мин (левый столбец), 5 мин (средний столбец) и 10 мин (правый столбец)

Fig. 4. Shape of the scull simulator layers, formed in the channel of plane shutter model in the absence of vibration action (a) and with vibration action (б), state closed within 2 minutes (left column), 5 minutes (middle column) and 10 minutes (right column)

Во втором опыте при моделировании процесса зарастания канала шиберного затвора его модель подвергали воздействию вибрации с фиксированными частотой и амплитудой возбуждаемых колебаний, генерируемых вибратором направленного действия. Для условий проводившегося эксперимента значения параметров вибратора составляли: $m = 45$ г; $\varepsilon = 10$ мм; $m_b = 450$ г; $A = 1$ мм; $\omega = 30$ с⁻¹.

Информация, полученная после завершения первого этапа модельных исследований, свидетельствовала о том, что вибрация наиболее эффективна для разобщения образующихся кристаллов со стенкой канала разливочного стакана в начальный период развития процесса его зарастания (см. рис. 4, б, слева). По мере роста толщины слоя отложений влияние вибрационного воздействия на данный процесс ослабляется (см. рис. 4, б, центр). Отделяемые во время вибрационного воздействия от стенок канала стакана частицы при закрытом разливочном канале накапливаются над верхней неподвижной плитой модели затвора (см. рис. 4, б, справа), что в производственных условиях может препятствовать нормальному продолжению разливки металла при последующем открытии затвора, поэтому длительность перекрытия канала при включенном вибраторе должна быть минимально возможной.

При организации и проведении второго этапа эксперимента предполагалось изучение влияния интенсивности вибрационного воздействия на процесс зарастания канала модели ковшового затвора, находящегося в открытом положении, т. е. при наличии в нем потоков имитатора жидкого металла.

Температуру используемого в жидком состоянии тиосульфата натрия, поступавшего из емкости 12 в канал модели шиберного затвора, контролировали по показаниям термометра 9 и поддерживали в интервале 92–95 °С с помощью вмонтированного электрического нагревательного элемента 8. Имитатор жидкой стали, истекавший из канала модели затвора, накапливался в приемном желобе 3, откуда его с помощью

сменных емкостей порциями переливали обратно в емкость 12.

В соответствии с планом второго этапа эксперимента в ходе проводившихся опытов, длительность которых составляла 20 мин, варьировали значения амплитуды и частоты колебаний, в совокупности определяющих интенсивность вибрационной нагрузки на модель ковшового затвора. Для каждого из опробованных режимов вибрационного воздействия на модель контролировали массу отложений на стенках ее разливочного стакана. С этой целью после проведения каждого опыта модель разбирали и тщательно соскабливали со стенок ее канала отложения тиосульфата натрия, массу которых затем определяли с помощью точных весов. Результаты измерений приведены в таблице. Они свидетельствуют о том, что процесс зарастания канала модели ковшового затвора замедляется с увеличением интенсивности вибрационного воздействия на разливочную систему. Для наглядности на рис. 5 показаны фотографии слоев отложений на стенках модели затвора, зафиксированные при истечении имитатора жидкого металла за одинаковые промежутки времени в случаях отсутствия и наличия вибрационного воздействия на модель разливочной системы. Сопоставив форму и толщину слоев отложений, образовавшихся при различных вариантах имитации процесса разливки, можно констатировать факт влияния потоков жидкости, моделирующей разливаемую сталь, на скорость изменения проходного сечения канала, что выражается в снижении интенсивности налипания частиц благодаря их смыванию. При этом наибольшую толщину слоя отложений на стенках канала модели затвора наблюдали в зонах расположения имевшихся неровностей и выступов, увеличивающих местное сопротивление жидкостному потоку, что особо проявлялось в местах стыковки огнеупорных элементов. Причем масса отложений при отсутствии внешнего воздействия на модель шиберного затвора составила 54 г, т. е. была заметно больше значений, полученных во время моделирования разливки с применением вибрации (см. таблицу).

ЗАФИКСИРОВАННАЯ МАССА ОТЛОЖЕНИЙ НА СТЕНКАХ КАНАЛА МОДЕЛИ ШИБЕРНОГО ЗАТВОРА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕЕ

FIXED WEIGHT OF DEPOSITS ON THE WALLS OF THE CHANNEL OF THE SLIDE SHUTTER MODEL AT VARIOUS VIBRATION IMPACT INTENSITY ON IT

Номер опыта	Угловая скорость дебалансов, с ⁻¹	Амплитуда колебаний, мм	Интенсивность вибрационного воздействия, м/с ²	Масса отложений, г
1	15	0,7	0,16	39
2		1,3	0,29	36
3		2,0	0,45	34
4	30	0,7	0,63	30
5		1,3	1,17	26

Номер опыта	Угловая скорость дебалансов, с^{-1}	Амплитуда колебаний, мм	Интенсивность вибрационного воздействия, м/с^2	Масса отложений, г
6	50	2,0	1,81	21
7		0,7	1,75	17
8		1,3	3,25	13
9		2,0	5,00	10

Рис. 5. Форма и толщина слоев отложений на стенках канала модели шиберного затвора при отсутствии внешнего воздействия на нее (а) и в случае наложения вибрации низкой частоты (б)

Fig. 5. Shape and thickness of the depositions on the channel walls of the slide shutter model at the absence of external influence (a) and at low frequency vibration imposing (б)

Следует учесть, что проведенные модельные исследования позволили имитировать формирование слоя отложений в канале затвора, обусловленное только гидродинамическими и тепловыми процессами, протекающими в нем при контакте потоков стали, истекающих из ковша, со стенками огнеупорных элементов его разливочной системы. Явления, связанные с химическими реакциями между компонентами расплава и самих огнеупоров, при данной методике проведения эксперимента не учитывали из-за невозможности симуляции в ходе моделирования химических процессов, имеющих развитие в реальных производственных условиях.

Выводы

Результаты модельных исследований свидетельствуют о возможности активного влияния на развитие процесса зарастания канала ковшового затвора посредством низкочастотных колебаний,

Стоит также отметить, что успех реализации предлагаемого технического решения будет во многом зависеть от совершенства конструктивного исполнения ковшового затвора, оборудованного специальными вибраторами направленного действия, возбуждающими колебания, которые должны препятствовать быстрому росту кристаллов на рабочих стенках сталевыпускного канала. Эксплуатация такого затвора сопряжена с необходимостью подвода энергии, требуемой для функционирования вибратора. Результаты предварительной проработки данного вопроса показали, что из трех широко известных вибрационных систем (электрохимической, электромагнитной и пневматической) для оборудования шиберного затвора в наибольшей мере подходит вибратор, работающий от сжатого воздуха, так как он соответствует таким предъявляемым требованиям, как компактность, безопасность и удобство в эксплуатации. Это обусловлено тем, что у современных ковшовых затворов кассетного типа для прижатия огнеупорных плит применяют блоки тарельчатых или витых пружин, в обязательном порядке охлаждаемых во время разливки стали воздухом, подаваемым по трубопроводу под избыточным давлением от цеховой магистрали. Поэтому этот воздух можно одновременно использовать в качестве энергоносителя для приведения в действие возбудителя колебаний ковшового затвора. При этом параметры колебательного процесса, реализуемого в системе шиберного затвора, можно регулировать путем изменения в нужных пределах давления воздуха, подаваемого к вибратору, а также выбирая соответствующую жесткость его пружин. Число таких вибраторов и геометрические размеры их подвижных элементов, возбуждающих колебательные процессы в ковшовом затворе, должны быть рассчитаны с учетом основных положений теории динамики машин с последующей экспериментальной проверкой на натурных образцах разливочных устройств шиберного типа.

возбуждаемых в нем в вертикальной плоскости с помощью специального вибратора.

Вибрационное воздействие на разливочный узел ковша целесообразно начинать непосред-

ственно в момент открытия шибера затвора, т. е. в период выравнивания температур поверхностей стенок канала и омывающего их потока жидкого металла.

Толщина слоя отложений в канале ковшового затвора снижается с увеличением интенсивности вибрационного воздействия на него, направленного вертикально вверх с заданными значениями частоты и амплитуды.

Дальнейшие исследования в данной области должны быть связаны с конструктивной разработкой шибера затвора, укомплектованного вибратором, отвечающим комплексу требований: компактность; простота и безопасность подвода энергоносителя, необходимого для возбуждения низкочастотной вибрации; возможность гибкого регулирования параметров колебательного процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аксельрод Л.М., Вяткин А.А., Вяткина Н.А. и др. Предотвращение процесса затягивания канала сталеразливочного узла промежуточного ковша МНЛЗ // Новые огнеупоры. 2007. № 2. С. 9–14.
2. Shusen L., Wei J., Lifeng Z. etc. Inclusions and nozzle clogging during steel continuous casting process // The Iron and Steel Technology Conference and Exposition (AISTech 2008) 5–8 May 2008. — Pittsburgh: Warrendale, 2008. P. 1247–1261.
3. Thomas B.G., Yuan Q., Zhang L. etc. Flow Dynamics and Inclusion Transport in Continuous Casting of Steel // Proceedings of NSF Conference “Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research” 6–9 January, 2003. — Birmingham: University of Alabama, 2003. P. 2328–2362.
4. Horiuchi T., Kajimura M. “MOGUL” — lined submerged entry nozzle // UNITECR'05: Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories, 9th Biennial Worldwide Congress on Refractories 8–11 November 2005. — Orlando, 2005.
5. Аксельрод Л.М., Мельникова Г.Г., Бодина Г.О. Разработка технологии изготовления огнеупорного материала, замедляющего процесс затягивания // Огнеупоры и техническая керамика. 2001. № 2. С. 22–25.
6. Song-Mook C., Thomas B.G., Sung-Kwang K. etc. Effect of nozzle clogging on surface flow and vortex formation // Iron and Steel Technology. 2012. № 7. P. 85–95.
7. Шарафутдинова А.С. Взаимодействие кальцийсодержащих материалов с огнеупорами при внепечной обработке и разливке стали // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. тр. 4-й Междунар. научно-практич. конф. 17 апреля 2014 г. — Курск: Университетская книга, 2014. С. 361–365.
8. Vermeulen Y., Coletti B., Blanpain B. etc. Material Evaluation to Prevent Nozzle Clogging during Continuous Casting of Al Killed Steels // ISIJ International. 2002. № 11. P. 1234–1240.
9. Герцык С.И., Шишимиров М.В., Василенко В.П. Особенности работы литейных ковшей с шибера затвором // Металлургия машиностроения. 2009. № 6. С. 2–5.
10. Кононов В.А., Василенко В.П., Алпатов А.А. Разработка шибера систем для разливки мелких слитков и фасонного литья // Новые огнеупоры. 2013. № 11. С. 18–24.
11. Кононов В.А., Василенко В.П., Герцык С.И. и др. Эффективность внедрения шибера разливки в литейном производстве // Литейщик России. 2010. № 11. С. 23–26.
12. Жилин Д.И. Повышение эффективности шибера затвора с дополнительным подогревом разливочного канала // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 11. С. 3–6.

MODEL STUDY OF VIBRATION ACTION INFLUENCE ON THE CLOGGING PROCESS OF LADLE SHUTTER CHANNEL

*S. P. EROKHO, HD (Tech), Professor, Head of Dpt “Mechanical equipment of steel-works”, ersp@meta.ua;
M. YU. TKACHEV, PhD (Tech), Associate Professor, Dpt “Mechanical equipment of steel-works”;
E. A. PONAMAREVA, postgraduate, Dpt “Mechanical equipment of steel-works”
(Donetsk National Technical University, Ukraine, Donetsk)*

Abstract. The problem of steel ladle outlet channel clogging is an unsolved task and very actual till present, despite numerous research works, aimed at factors determination, contributing intensive decrease of real liquid flow section and search of ways to eliminate the phenomena, which the production people came across after substitution of stopper-rod device by slide shutter.

Reasons and formation mechanisms of depositions at slide shutter channel walls, providing a steel controlled pouring from steel ladles and tundishes analysed. Elaborated earlier measures to decrease nozzle channel clogging intensity considered.

Results of a slide shutter physical model verification quoted to check active impact on the channel clogging process possibility by a dynamic action to be applied to casting device body by a vibrator, exciting low frequency vibrations in a vertical area. Experiments done for two variants of shuttle fixed plate state: at complete its channel closing and at absence of the stream throttling. The plane shutter model was made of organic glass in scale 1:2 relating to a natural sample. The intended heat rejection in a side direction from casting nozzle channel walls was provided by water circulation in two parallel located vertical cavities. Sodium thiosulfate melt, heated to 95 °C was used as the material to simulate the casting steel

Experiment data obtained, which allow to determine influence of vibrations frequency and amplitude excited in the slide shutter model system, on the velocity of precipitation layer thickness on the channel walls. At the same intensity of vibration action, the number of crystals, being destroyed in the precipitation layer, depends to a bigger extent on vibration frequency and to smaller extent – to its amplitude. To achieve a positive effect caused by vibration action on the slide shutter system in industrial conditions it is necessary new technical solutions to provide vibrations exciting unit organic implementation into it, which could meet at the same

time complex of requirements: to be compact, simple and safe for energy carrier input, to be flexible in vibration process parameters control.

Key words: steel ladle; slide shutter model; slide shutter channel clogging; casting nozzle; vibrator.

For citation: Eron'ko S.P., Tkachev M.Yu., Ponamareva E.A. Model study of vibration action influence on the clogging process of ladle shutter channel. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 11, pp. 51–57. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-11-51-57

REFERENCES

1. Aksel'rod L.M., Vyatkin A.A., Vyatkina N.A. etc. Prevention of clogging process of CC tundish steel casting unit channel. *Novye ognepory*, 2007, no. 2, pp. 9–14. (In Russ.).
2. Shusen L., Wei J., Lifeng Z. etc. Inclusions and nozzle clogging during steel continuous casting process. *The Iron and Steel Technology Conference and Exposition (AISTech 2008) 5–8 May 2008*. Pittsburgh: Warrendale, 2008, pp. 1247–1261.
3. Thomas B.G., Yuan Q., Zhang L. etc. Flow Dynamics and Inclusion Transport in Continuous Casting of Steel. *Proceedings of NSF Conference "Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research" 6–9 January 2003*. Birmingham: University of Alabama, 2003, pp. 2328–2362.
4. Horiuchi T., Kajimura M. "MOGUL" – lined submerged entry nozzle. *UNITECR'05: Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories, 9th Biennial Worldwide Congress on Refractories 8–11 November 2005*. Orlando, 2005.
5. Aksel'rod L.M., Mel'nikova G.G., Bodina G.O. Technology development for refractory material manufacturing, slowing the clogging process. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2001, no. 2, pp. 22–25. (In Russ.).
6. Song-Mook C., Thomas B.G., Sung-Kwang K. etc. Effect of nozzle clogging on surface flow and vortex formation. *Iron and Steel Technology*, 2012, no. 7, pp. 85–95.
7. Sharafutdinova A.S. *Vzaimodeistvie kal'tsiisoderzhashchikh materialov s ogneporami pri vnepechnoi obrabotke i razlivke stali* [Interaction of calcium-containing materials with refractories at steel ladle treatment and casting]. *Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike: sb. nauch. tr. 4-i Mezhdunar. nauchno-praktich. konf. 17 aprelya 2014* [Modern innovations in science and technology: a collection of scientific. tr. 4th Intern. scientific and practical conf. April 17, 2014]. Kursk: Universitetskaya kniga, 2014, pp. 361–365. (In Russ.).
8. Vermeulen Y., Coletti B., Blanpain B. etc. Material Evaluation to Prevent Nozzle Clogging during Continuous Casting of Al Killed Steels. *ISIJ International*, 2002, no. 11, pp. 1234–1240.
9. Gertsyk S.I., Shishimirov M.V., Vasilenko V.P. Peculiarities of operation of steel ladles with a slide shutter. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2009, no. 6, pp. 2–5. (In Russ.).
10. Kononov V.A., Vasilenko V.P., Alpatov A.A. Development of slide shutter systems for steel casting into small ingots and shaped castings. *Novye ognepory*, 2013, no. 11, pp. 18–24. (In Russ.).
11. Kononov V.A., Vasilenko V.P., Gertsyk S.I. etc. The effectiveness of sliding shutter casting implementation in foundry. *Liteishchik Rossii*, 2010, no. 11, pp. 23–26. (In Russ.).
12. Zhilin D.I. Improving of efficiency of slide shutter with additional heating of casting channel. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2015, no. 11, pp. 3–6. (In Russ.).