

По материалам конференции
«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ»
им. академика А.М. Самарина – 2022

Materials of the Conference
«PHYSICO-CHEMICAL FOUNDATIONS
OF METALLURGICAL PROCESSES»
named after Academician A.M. Samarin – 2022



УДК 669.046.558.6

DOI 10.17073/0368-0797-2023-3-337-343



Оригинальная статья

Original article

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ИНЖЕКЦИОННОЙ ПРОВОЛОКИ С НАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО КАЛЬЦИЯ НА ЭТАПЕ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

А. Д. Хорошилов¹, С. А. Сомов², В. Д. Католиков¹, В. А. Мурысев²,
Р. Е. Бочерилов³, М. Р. Ярмухаметов²

¹ ООО «Русатом МеталлТех» (Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 49)

² АО «Выксунский металлургический завод» (Россия, 607060, Нижегородская обл., Выкса, ул. Бр. Баташевых, 45)

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

✉ vdkatolikov@yandex.ru

Аннотация. Алюминий является одним из наиболее распространенных раскислителей, при его использовании в расплаве образуются тугоплавкие включения глинозема. Присутствие данных неметаллических включений негативно влияет на чистоту жидкой стали, механические свойства, затрудняет разливку вследствие затягивания сталеразливочной фурнитуры. Модифицирование включений оксида алюминия кальцием способствует образованию жидких алюминатов кальция, что приводит к ускорению их удаления из металла ввиду более высокой скорости всплытия. Обладая высоким сродством к сере, кальций связывает ее, образуя сульфиды, тем самым уменьшая вредное влияние серы и снижая анизотропию свойств стали при дальнейшей прокатке. Для обработки стали кальцием используют инъекционные проволоки с кальцийсодержащим наполнителем. В качестве наполнителя могут быть использованы электролитический кальций, силикокальций, алюмотермический кальций, феррокальций. В данной работе описаны результаты проведенных испытаний кальцийсодержащей проволоки с наполнителем из электролитического кальция и силикокальция. Показано, что расход кальция при использовании силикокальциевой проволоки в среднем на 35 % выше в сравнении с кальциевой инъекционной проволокой с наполнителем из электролитического кальция. Проведена оценка коэффициента усвоения кальция для различных сортов сталей при использовании кальцийсодержащих проволок разных дизайнов и наполнителя. Выполнен анализ разливаемости стали, где в качестве определяющего параметра рассмотрена зависимость изменения положения штока стопора промежуточного ковша от содержания кальция в металле по пробе с установки непрерывной разливки стали. Установлено, что проволока с наполнителем из электролитического кальция показывает более эффективный результат в сравнении с силикокальциевой проволокой.

Ключевые слова: внепечная обработка стали, кальцийсодержащая инъекционная проволока, кальций, электролитический кальций, силикокальций

Для цитирования: Хорошилов А.Д., Сомов С.А., Католиков В.Д., Мурысев В.А., Бочерилов Р.Е., Ярмухаметов М.Р. Опыт применения кальцийсодержащей инъекционной проволоки с наполнителем из электролитического кальция на этапе внепечной обработки стали. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(3):337–343. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-337-343>

USING CALCIUM-CONTAINING INJECTION WIRE FILLED WITH ELECTROLYTIC CALCIUM IN STEEL LADLE TREATMENT

A. D. Khoroshilov¹, S. A. Somov², V. D. Katolikov¹, V. A. Murysev²,
R. E. Bocherikov³, M. R. Yarmukhametov²

¹ LLC “Rusatom MetalTech” (49 Kashirskoe Route, Moscow 115409, Russian Federation)

² JSC “Vyksa Metallurgical Plant” (45 Br. Batashevych Str., Vyksa, Nizhny Novgorod Region 607060, Russian Federation)

³ National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

✉ vdkatolikov@yandex.ru

Abstract. Aluminum is one of the most common deoxidizers; when it is used in the melt, refractory inclusions of alumina are formed. The presence of these non-metallic inclusions negatively affects the purity of liquid steel, mechanical properties, makes casting difficult due to tightening of the steel-pouring fittings. The modification of alumina inclusions with calcium promotes the formation of liquid calcium aluminates, which leads to an acceleration of their removal from the metal due to a higher ascent rate. Having a high affinity for sulfur, calcium reduces its harmful effect by binding it with the formation of calcium sulfides, reducing the anisotropy of steel properties during further rolling. For steel treatment with calcium, injection wires with a calcium-containing filler are used. As a filler can be used: electrolytic calcium, silicocalcium, aluminum-tremic calcium, or ferrocacium. The paper describes results of the tests carried out on a calcium-containing wire filled with electrolytic calcium and silicocalcium. It is shown that the consumption of calcium when using silicocalcium wire is on average 35 % higher in comparison with calcium injection wire filled with electrolytic calcium. The calcium recovery rate for different steel grades was evaluated using calcium-containing wires of different designs and filler. In this work, the steel pourability was analyzed. As a determining parameter, dependence of change in position of the tundish stopper rod on calcium content in the metal was considered in the sample from CCM. It was established that a wire filled with electrolytic calcium shows a more effective result in comparison with a silicocalcium wire.

Keywords: steel ladle treatment, calcium-containing injection wire calcium, electrolytic calcium, silicocalcium

For citation: Khoroshilov A.D., Somov S.A., Katolikov V.D., Murysev V.A., Bocherikov R.E., Yarmukhametov M.R. Using calcium-containing injection wire filled with electrolytic calcium in steel ladle treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(3):337–343.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-337-343>

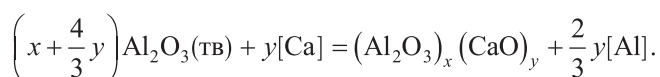
ВВЕДЕНИЕ

Свойства металлопроката во многом зависят от чистоты стали по содержанию таких примесных элементов, как сера, фосфор, азот, водород и других, а также от образующихся в процессе производственного цикла выплавки стали неметаллических включений (НВ). Их химический состав, количество, характер распределения и морфология оказывают ключевое влияние на качество и свойства стали.

В настоящее время финальное раскисление большинства марок сталей осуществляют алюминием, который является хорошим технологическим раскислителем. Однако продукт раскисления глинозем (Al_2O_3) может образовывать включения неправильной формы, которые образуют кластеры [1]. Такие скопления могут являться причиной образования поверхностных дефектов в прокате [2] и затягивания сталеразливочной фурнитуры [3 – 5].

Эффективным способом, позволяющим нивелировать данные негативные эффекты, является модифицирование химического состава НВ. Одним из наиболее распространенных элементов, являющимся наполнителем проволоки и весьма активно применяемым для модифицирования, является кальций [6 – 9]. Использование кальция при получении стали позволяет управлять химическим и фазовым составом НВ, улучшать способность стали к глубокой вытяжке, способствует уменьшению склонности стали к водородному растрескиванию [10 – 13].

При попадании в жидкий расплав кальций растворяется в объеме металла, происходит реакция модифицирования включений Al_2O_3 [14; 15] до жидкого состояния [16]. Тем самым повышается скорость рафинирования жидкого расплава за счет более высокой скорости всплытия жидких включений. Образование алюминатов кальция можно описать реакцией [17; 18]



Кальций, обладающий высоким сродством к сере, образует сульфидные и окисульфидные НВ (в том числе на фронте кристаллизации). В отсутствие достаточного количества кальция сера, обладающая высокой степенью ликвации, скапливается в осевой области непрерывнолитой заготовки. В результате образуются протяженные включения сульфида марганца. Пораженная НВ и микронесплошностями осевая зона может являться причиной отсортировки плоского проката по дефектам ультразвукового контроля и водородному растрескиванию при эксплуатации стали в коррозионных средах [19].

Процесс модифицирования НВ кальцием достаточно сложный. Основной трудностью достижения оптимальных условий модифицирования является узкий диапазон концентрации кальция в расплаве, а также нестабильное усвоение кальция. Помимо этого, кальций имеет высокую упругость пара и в процессе обработки вызывает бурное кипение, что может повлечь за собой выбросы металла из ковша. Вследствие этого необходимо уделить внимание способу ввода кальция в жидкий металл, обеспечить его ввод на глубину расплава, где ферростатическое давление будет уравнивать давление паров кальция [20]. Ввиду воздействия большого количества факторов, таких как химический состав стали и шлака, температура [21] и масса стали, скорость ввода проволоки и других, влияющих на эффективность использования кальцийсодержащей проволоки, важную роль играют дизайн и состав наполнителя используемой проволоки.

Наполнитель проволоки заключен в стальную оболочку, которая выполняет следующие функции [22; 23]:

– защищает наполнитель проволоки от контакта с атмосферой и влагой во время транспортировки и хранения;

– предотвращает возможность окисления наполнителя при прохождении через слой шлака на поверхности металла;

– обеспечивает требуемую жесткость проволоки, необходимую для прохождения шлакового слоя;

– предупреждает прямой контакт наполнителя проволоки с жидким металлом, что позволяет путем изменения скорости введения и толщины оболочки проволоки регулировать глубину ввода элементов.

Основными параметрами дизайна проволоки являются:

- внешний диаметр проволоки;
- диаметр кальцийсодержащего материала;
- толщина стальной оболочки;
- тип соединения стальной оболочки.

На сегодняшний день в качестве наполнителя таких проволок используют порошкообразный и монолитный кальций:

- электролитический кальций;
- алюмотермический кальций;
- феррокальций (смесь алюмотермического кальция и порошка железа);
- силикокальций.

Каждый из приведенных выше наполнителей имеет свои особенности и различия. Например, по содержанию металлического кальция в наполнителе, содержанию сопутствующих примесных элементов и, как следствие, коэффициенту усвоения. Данные обстоятельства затрудняют получение стабильного результата модифицирования стали.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа работы и ключевых эксплуатационных показателей кальцийсодержащих проволок с наполнителем из чистого электролитического кальция с наполнителем из силикокальция.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На установке ковш–печь проведены испытания кальциевой инжекционной проволоки (КИП) с наполнителем из чистого монолитного кальция, полученного

Физические характеристики используемой проволоки

Physical characteristics of the wire

Показатель	Дизайн проволоки, мм		
	10×0,8	11×0,8	10×1,0
Масса наполнителя, кг	675	666	598
Коэффициент заполнения, %	25	27	21
Номинальное наполнение в 1 м проволоки, г	74	94	67
Номинальная масса 1 м проволоки, г	295	342	323
Расход кальция, г/т	95	99	113

электролитическим способом, следующих дизайнов:

– проволока диаметром 10 мм с толщиной оболочки 0,8 мм (10×0,8);

– проволока диаметром 11 мм с толщиной оболочки 0,8 мм (11×0,8);

– проволока диаметром 10 мм с толщиной оболочки 1,0 мм (10×1,0).

Скорость ввода проволоки корректировалась для каждого дизайна индивидуально (от 120 до 180 м/мин).

Состав наполнителя проволоки приведен ниже, %:

Ca	Al	Si	Mg	K + Na
99,300	<0,001	<0,010	0,010	<0,010

Физические характеристики КИП приведены в таблице.

Опытная проволока использовалась на 43 плавках, из которых 51 % составил среднеуглеродистый (содержание углерода от 0,14 до 0,22 %) сортament, 37 % – низкоуглеродистый ($[C] < 0,14 \%$) и 12 % – низкоуглеродистая низкокремнистая сталь. Проволока подавалась в ковш с металлом с помощью трайб-аппарата, обрывов проволоки во время применения зафиксировано не было. Полученные результаты сравнивали с данными, полученными после обработки порошковой проволокой СК40.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ используемых проволок начали с определения среднего расхода непосредственно вводимого количества проволоки на плавку и расхода кальция (рис. 1, 2). Видно, что расход проволоки СК40 в среднем больше расхода КИП с наполнителем из электролитического кальция на 30 – 45 %, расход непосредственно самого кальция выше на 30 – 40 %.

Проведен анализ разливаемости стали с целью определения эффективности обработки стали КИП с точки зрения достижения стабильно удовлетворительной разливаемости стали, без застывания сталеразливочной фурнитуры НВ. Данную оценку проводили, исходя из изменения положения уровня штока стопора промежуточного ковша в процессе разливки стали (рис. 3).

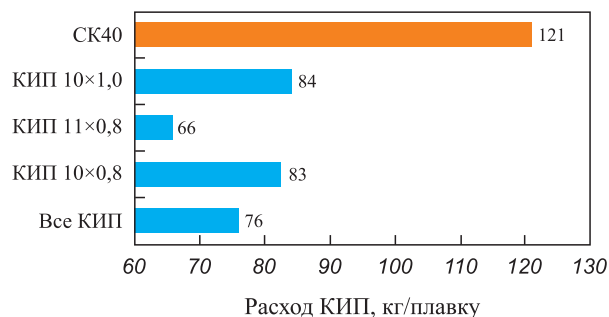


Рис. 1. Расход кальцийсодержащей проволоки на плавку

Fig. 1. Consumption of calcium-containing wire for melting

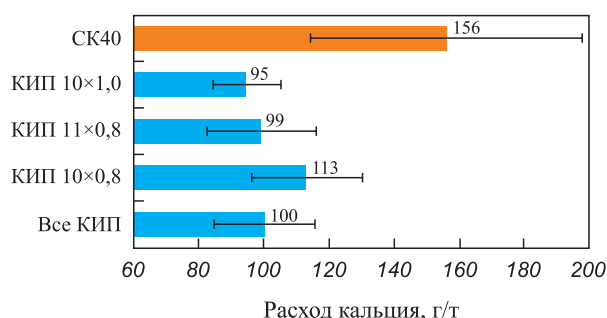


Рис. 2. Расход кальция на плавку

Fig. 2. Calcium consumption for melting

Положительные значения данного параметра могут свидетельствовать о начале развития процесса отложения НВ, отрицательные – об эрозии огнеупорных элементов стальной проводки. Сравнительный анализ данных с испытаний между КИП с наполнителем из электролитического кальция и СК40 показывает, что при использовании КИП 10×1,0 и 11×0,8 уровень штока стопора находится в отрицательной области, что позволяет говорить о возможности снижения расхода проволоки данных дизайнов при использовании по сравнению с КИП 10×0,8 и СК40.

Анализ зависимости разливаемости стали от содержания кальция по данным аттестационной пробы для используемых дизайнов КИП представлен на рис. 4. Видно, что для КИП 10×1,0 и 11×0,8 наблюдается следующая зависимость: при увеличении содержания кальция дельта штока стопора промежуточного ковша смещается в область отрицательных значений. Данный

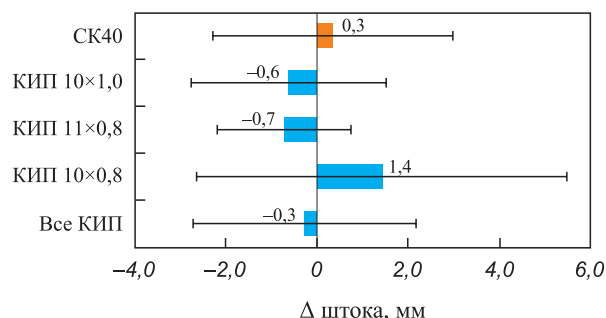


Рис. 3. Изменение положения штока стопора промежуточного ковша

Fig. 3. Changing the tundish stopper position

результат полностью согласуется с анализом, приведенным на рис. 3. Однако необходимо отметить наличие достаточно высокой дисперсии величины дельта штока, что позволяет говорить о наличии иных влияющих факторов.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3 и 4, позволил оценить оптимальное содержание кальция в жидком металле, обеспечивающее стабильную разливаемость стали для сравниваемых КИП. Полученные данные приведены на рис. 5.

Результаты оценки коэффициента усвоения кальция для каждого вида проволоки, используемого в работе, в зависимости от сортамента стали, приведены на рис. 6. Установлено, что наибольший коэффициент усвоения на низкоуглеродистой и углеродистой стали показывает КИП 11×0,8, для низкокремнистого сортамента лучшие показатели наблюдаются у КИП 10×1,0. В среднем коэффициент усвоения для КИП с напол-

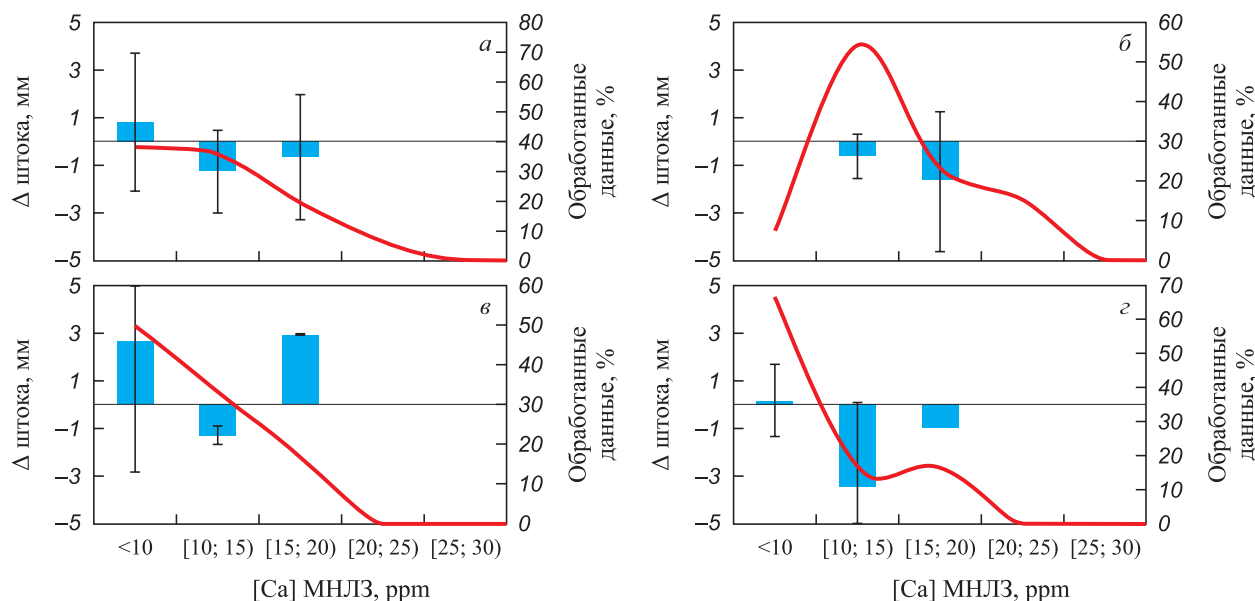


Рис. 4. Зависимость положения штока стопора промежуточного ковша от содержания кальция по данным аттестационной пробы:

а – все КИП; б – 11,5×0,8; в – 10×0,8; г – 10×1,0; ■ – Δ штока, мм; — – данные, %

Fig. 4. Dependence of the tundish stopper rod from calcium according to the certification piece:

а – all calcium injection wires (CIW); б – 11,5×0,8; в – 10×0,8; г – 10×1,0; ■ – Δ ram, mm; — – data, %

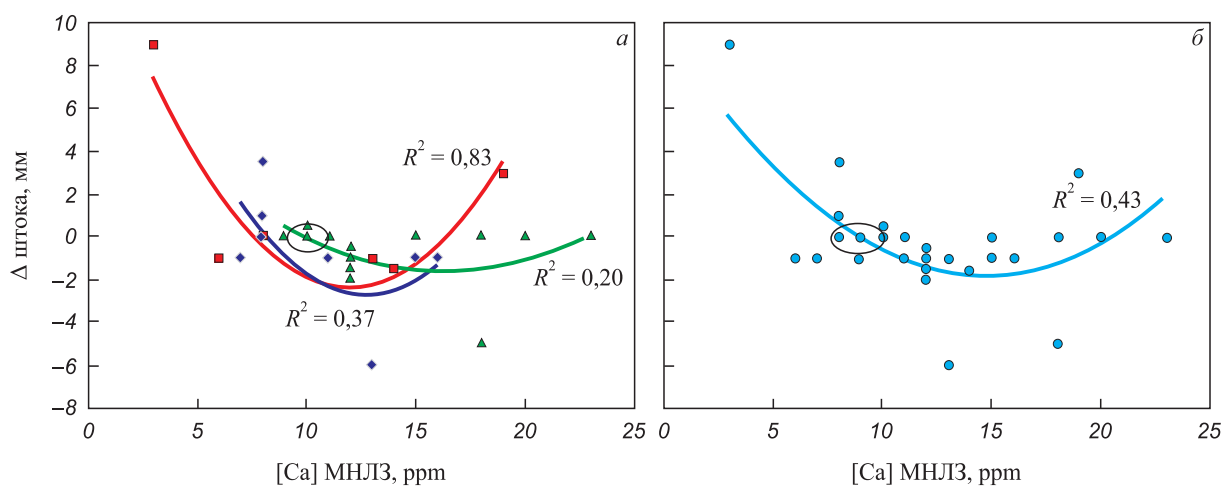


Рис. 5. Оптимальное содержание кальция в металле:

■ – КИП 10×0,8, ◆ – КИП 10×1,0, ▲ – КИП 11×0,8 (а); ● – все КИП (б)

Fig. 5. Optimal calcium content in the metal:

■ – CIW 10×0,8, ◆ – CIW 10×1,0, ▲ – CIW 11×0,8 (а); ● – all CIWs (б)

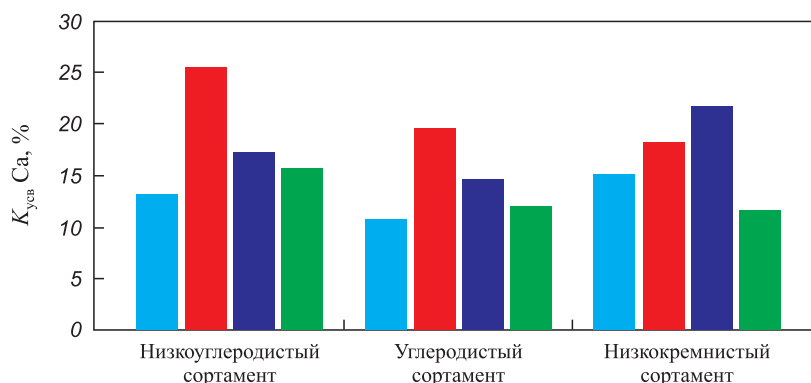


Рис. 6. Коэффициент усвоения кальция для различных кальцийсодержащих проволок:

■ – 10×0,8; ■ – 11×0,8; ■ – 10×1,0; ■ – SK40

Fig. 6. Calcium recovery rate for various calcium-containing wires:

■ – 10×0,8; ■ – 11×0,8; ■ – 10×1,0; ■ – SK40

нителем из электролитического кальция на 35 – 45 % выше, чем для проволоки марки СК40.

Необходимо отметить, что основной целью обработки стали кальцием является улучшение разливаемости стали и качества проката. Параметр усвоения кальция необходим для расчета получения кальция в расплаве целевой концентрации для конкретных условий.

Выводы

Проведен сравнительный анализ работы КИП с наполнителем из электролитического кальция и кальцийсодержащей проволоки марки СК40. Показано, что расход КИП в среднем на 30 – 45 % меньше (в зависимости от дизайна), чем для СК40. Выполнен анализ разливаемости стали, где в качестве критерия, определяющего разливаемость, применялось изменение уровня стопора промежуточного ковша. Определено мини-

мальное содержание кальция в металле при использовании КИП, обеспечивающее стабильную разливаемость стали, которое составило 10 – 12 ppm. Показано, что для оценки работы кальцийсодержащей проволоки целесообразно использовать параметр разливаемости стали, например, по изменению положения штока стопора промежуточного ковша.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Wasai K., Mukai K., Miyanaga A. Observation of inclusion in aluminum deoxidized iron. *ISIJ International*. 2002;42(5):459–466. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.459>
- Зайцев А.И., Родионова И.Г., Хорошилов А.Д., Мезин Ф.И., Семернин Г.В., Мишней П.А., Жиронкин М.В., Бикин К.Б. Анализ природы возникновения поверхностных дефектов холоднокатаного проката из IF-сталей. *Электрометаллургия*. 2012;(7):36–40.

- Zaitsev A.I., Rodionova I.G., Khoroshilov A.D., Mezin F.I., Semernin G.V., Mishnei P.A., Zhironkin M.V., Bikin K.B. Analysis of surface defects occurrence in cold-rolled products from IF-steels. *Elektrometallurgiya*. 2012;(7):36–40. (In Russ.).
3. Deng Z., Zhu M., Zhong B., Sichen D. Attachment of liquid calcium aluminate inclusions on inner wall of submerged entry nozzle during continuous casting of calcium-treated steel. *ISIJ International*. 2014;54(12):2813–2820. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2813>
4. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006;37:733–761. <https://doi.org/10.1007/s11663-006-0057-0>
5. Агарков А.Ю., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Бабин Г.В., Кириличев М.В., Морозов В.В. Выявление природы образующихся «наростов» на внутренней стенке разливочного стакана при непрерывной разливке стали марки C45E. *Теория и технология металлургического производства*. 2020;(1):11–17.
Agarkov A.Yu., Rutskii D.V., Zyuban N.A., Babin G.V., Kirilichev M.V., Morozov V.V. Identification of nature of the formed “growths” on inner wall of the nozzle during continuous casting of C45E steel. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2020;(1):11–17. (In Russ.).
6. Yang W., Zhang L., Wang X., Ren Y., Liu X., Shan Q. Characteristics of inclusions in low carbon Al-killed steel during ladle furnace refining and calcium treatment. *ISIJ International*. 2013;53(8):1401–1410. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.1401>
7. Higuchi Y., Numata M., Fukagawa S., Shinme K. Effect of method of calcium treatment on composition and shape of non-metallic inclusions. *Tetsu-to-Hagane*. 1996;82(8):671–676. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.82.8_671
8. Ren Y., Zhang L., Li S. Transient evolution of inclusions during calcium modification in linepipe steels. *ISIJ International*. 2014;54(12):2772–2779. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2772>
9. Кушнерев И.В., Серов Г.В., Тихонов С.М., Кузнецов Д.В., Аксельрод Л.М. Прогнозирование состава и количества неметаллических включений при производстве низколегированных трубных сталей. *Новые огнеупоры*. 2017;(12):36–41. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-12-36-41>
Kushnerev I.V., Serov G.V., Tikhonov S.M., Kuznetsov D.V., Aksel'rod L.M. The non-metallic inclusion's composition and quantity's prediction in the low-alloyed tube steel production. *Novye огнеупоры*. 2017;(12):36–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-12-36-41>
10. Choudhary S.K., Ghosh A. Thermodynamic evaluation of formation of oxide-sulfide duplex inclusions in steel. *ISIJ International*. 2008;48(11):1552–1559. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.1552>
11. Takahashi A., Ogawa H. Influence of microhardness and inclusion on stress oriented hydrogen induced cracking of line pipe steels. *ISIJ International*. 1996;36(3):334–340. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.334>
12. Brown A., Jones C.L. Hydrogen induced cracking in pipeline steels. *Corrosion*. 1984;40(7):330–336. <https://doi.org/10.5006/1.3593931>
13. Moon J., Kim S.-J., Lee C. Role of Ca treatment in hydrogen induced cracking of hot rolled API pipeline steel in acid sour media. *Metals and Materials International*. 2013;19(1):45–48. <https://doi.org/10.1007/s12540-013-1008-3>
14. Varma N., Pistorius P.C., Fruehan R.J., Potter M., Lind M., Story S. Transient inclusion evolution during modification of alumina inclusions by calcium in Liquid steel: Part I. Background, experimental techniques and analysis methods. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2011;42:711–719. <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9516-3>
15. Varma N., Pistorius P.C., Fruehan R.J., Potter M., Lind M., Story S. Transient inclusion evolution during modification of alumina inclusions by calcium in Liquid steel: Part II. Results and discussion. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2011;42:720–729. <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9517-2>
16. Guo J., Cheng S.-s., Guo H.-j., Mei Y.-g. Novel mechanism for the modification of Al_2O_3 – based inclusions in ultra-low carbon Al-killed steel considering the effects of magnesium and calcium. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2018;25(3):280–287. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1571-1>
17. Lind M. *Mechanism and kinetics of transformation of alumina inclusions in steel by calcium treatment: Doctoral Thesis*. Helsinki: Helsinki University of Technology Publications in Materials Science and Engineering; 2006:89.
18. Yang J., Wang X.-h., Jiang M., Wang W.-j. Effect of calcium treatment on non-metallic inclusions in ultra-low oxygen steel refined by high basicity high Al_2O_3 slag. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2011;(18):8–14. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60083-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60083-6)
19. Хорошилов А.Д., Салиханов П.А., Бызов Д.П., Жиронкин М.В., Бикин К.Б. Опыт применения кальцийсодержащей инъекционной проволоки с различными наполнителями при внепечной обработке стали. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021;77(4):432–444. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-4-432-444>
Khoroshilov A.D., Salikhanov P.A., Byzov D.P., Zhironkin M.V., Bikin K.B. Experience of application of calcium-containing cored wire with various fillers at steel ladle treatment. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2021;77(4):432–444. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-4-432-444>
20. Крупенников С.А., Филимонов Ю.П., Кузьменко А.Г., Мазуров Е.Ф. Определение оптимальной скорости ввода порошковой проволоки с силикокальциевым наполнителем в ковш с жидкой сталью. *Электromеталлургия*. 2000;(11):15–22.
Krupennikov S.A., Filimonov Yu.P., Kuz'menko A.G., Mazurov E.F. Determination of optimal input speed of flux-cored wire with silicocalcium filler in a ladle with liquid steel. *Elektrometallurgiya*. 2000;(11):15–22. (In Russ.).
21. Lind M., Holappa L. Transformation of alumina inclusions by calcium treatment. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2010;41:359–366. <https://doi.org/10.1007/s11663-009-9337-9>
22. Каблукровский А.Ф. и др. *Внепечная обработка стали порошковой проволокой*. Москва: Металлургиздат; 2006: 288.
23. Шалимов А.Г., Семин А.Е., Галкин М.П., Косырев К.Л. *Инновационное развитие электросталеплавильного производства*. Москва: Металлургиздат; 2014:308.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Андрей Дмитриевич Хорошилов, главный эксперт по продукту «КИП и легирующие элементы», ООО «Русатом МеталлТех»
E-mail: khoroshilovad@gmail.com

Сергей Александрович Сомов, начальник отдела, АО «Выксунский металлургический завод»
E-mail: Somov_sa@vsw.ru

Владимир Дмитриевич Католиков, главный эксперт по продукту «КИП и легирующие элементы», ООО «Русатом МеталлТех»
ORCID: 0000-0001-7554-1467
E-mail: vdkatolikov@yandex.ru

Владимир Александрович Мurysev, главный специалист, АО «Выксунский металлургический завод»
E-mail: Murysev_va@vsw.ru

Роман Евгеньевич Бочерилов, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
ORCID: 0000-0002-7315-3222
E-mail: Romann961@gmail.com

Марат Рафхатович Ярмухаметов, технолог, АО «Выксунский металлургический завод»
E-mail: Jarmukhametov_mr@vsw.ru

Andrei D. Khoroshilov, Chief Expert on the Product “Calcium Injection Wire and Alloying Elements”, LLC Rusatom MetalTech
E-mail: khoroshilovad@gmail.com

Sergei A. Somov, Head of the Department, JSC “Vyksa Metallurgical Plant”
E-mail: Somov_sa@vsw.ru

Vladimir D. Katolikov, Chief Expert on the Product “Calcium Injection Wire and Alloying Elements”, LLC Rusatom MetalTech
ORCID: 0000-0001-7554-1467
E-mail: vdkatolikov@yandex.ru

Vladimir A. Murysev, Chief Specialist, JSC “Vyksa Metallurgical Plant”
E-mail: Murysev_va@vsw.ru

Roman E. Bocherikov, Postgraduate of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0002-7315-3222
E-mail: Romann961@gmail.com

Marat R. Yarmukhametov, Technologist, JSC “Vyksa Metallurgical Plant”
E-mail: Jarmukhametov_mr@vsw.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. Д. Хорошилов – формирование основной концепции работы, постановка цели работы, проведение расчетов, доработка текста, корректировка выводов.

С. А. Сомов – руководство при проведении промышленных плавов, доработка текста, обсуждение результатов.

В. Д. Католиков – обобщение результатов исследований, проведение расчетов, интерпретация результатов, формирование выводов.

В. А. Мurysev – анализ и систематизация промышленных данных, доработка текста, обсуждение результатов.

Р. Е. Бочерилов – подбор, анализ и обобщение литературных данных, обсуждение результатов.

М. Р. Ярмухаметов – проведение промышленных плавов, обсуждение результатов.

A. D. Khoroshilov – formation of the main concept of the article, setting the goal of the work, calculations, finalizing the text, correcting the conclusions.

S. A. Somov – guidelines for industrial melting, revision of the text, discussion of the results.

V. D. Katolikov – generalization and interpretation of the research results, calculations, formation of the conclusions.

V. A. Murysev – analysis and systematization of industrial data, revision of the text, discussion of the results.

R. E. Bocherikov – selection, analysis and generalization of literature data, discussion of the results.

M. R. Yarmukhametov – conducting industrial melting, discussion of the results.

Поступила в редакцию 15.02.2023

После доработки 20.02.2023

Принята к публикации 11.04.2023

Received 15.02.2023

Revised 20.02.2023

Accepted 11.04.2023