

Оригинальная статья

УДК 669.187

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-2(48)-127-135

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПРОДУВКИ
РАСПЛАВА РЕЛЬСОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ
НА АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ**

© 2024 г. Л. В. Думова, Е. В. Протопопов, А. А. Уманский

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. С использованием моделирования процесса продувки расплава в сталеразливочном ковше, проведенного применительно к условиям электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК», определены закономерности влияния интенсивности продувки на параметры, характеризующие интенсивность перемешивания металла: мощность перемешивания и эффективный коэффициент диффузии. Показано, что повышение интенсивности продувки инертным газом в широких пределах варьирования данного показателя увеличивает мощность перемешивания вне зависимости от режима истечения газовых струй и направления переноса. При этом влияние удельного расхода вдуваемого в расплав инертного газа на интенсивность перемешивания более выражено для струйного режима продувки по сравнению с пузырьковым, что позволяет определить характеристики процесса гомогенизации расплава при расчете эффективного коэффициента диффузии. На основании статистических исследований определено, что в условиях рассматриваемого цеха увеличение длительности периодов продувки рельсовой стали с интенсивностью более 1,1 м³/мин оказывает значимое влияние на уменьшение отбраковки рельсов из-за наличия неметаллических включений. Полученные результаты теоретических и аналитических исследований явились базой для разработки усовершенствованного режима продувки рельсовой стали инертным газом в процессе обработки на агрегате ковш-печь. Отличительной особенностью усовершенствованного режима является наличие во второй половине продувки периода с повышенной до 1,2 – 1,6 м³/мин интенсивностью подачи инертного газа с продолжительностью не менее 10 мин. Опытнo-промышленное опробование разработанного режима продувки инертным газом подтвердило его эффективность с точки зрения рафинирования рельсовой стали от неметаллических включений. В серии из 110 опытных плавок зафиксировано снижение отбраковки рельсов из-за наличия неметаллических включений на 0,6 %.

Ключевые слова: рельсовая сталь, продувка инертным газом, неметаллические включения, численное моделирование, перемешивание расплава

Для цитирования: Думова Л.В., Протопопов Е.В., Уманский А.А. Исследование и совершенствование режимов продувки расплава рельсовой электростали в процессе обработки на агрегате ковш-печь. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;2(48):127–135. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-127-135](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-127-135)

Original article

**RESEARCH AND IMPROVEMENT OF MODES FOR BLOWING ELECTRIC RAIL
STEEL MELT DURING PROCESSING ON THE LADLE-FURNACE UNIT**

© 2024 L. V. Dumova, E. V. Protopopov, A. A. Umanskii

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Using simulation of the melt purging process in a steel ladle, carried out in relation to the conditions of the electric steel melting shop of JSC EVRAZ ZSMK, the regularities of the influence of the intensity of purging on the parameters characterizing the intensity of metal mixing: mixing power and effective diffusion coefficient were determined. It is shown that an increase in the intensity of purging with an inert gas within a wide range of variation of this indicator increases the mixing power, regardless of the mode of outflow of gas jets and the direction of transfer. At the same time, the effect of the specific flow rate of the inert gas injected into the melt on the mixing intensity is more pronounced for the jet purge mode compared with the bubble mode, which makes it possible to determine the characteristics of the melt homogenization process when calculating the effective diffusion coefficient. Based on statistical studies, it was determined that in the conditions of the workshop under consideration, an increase in the duration of periods of purging of rail steel with an intensity of more than 1.1 m³/min. It has a significant effect on reducing rail rejection due to the presence of non-metallic inclusions. The obtained results of theoretical and analytical studies were the basis for the development of an improved mode of purging rail steel with inert gas during processing on the bucket furnace unit. A distinctive feature of the improved mode is the presence in the second half of the purge period with an increased to 1.2 – 1.6 m³/min intensity of inert gas supply with a duration of at least 10 minutes. Pilot testing of the developed inert gas purge mode has confirmed its effectiveness in terms of refining rail steel from non-metallic inclusions. In a series of 110 experimental smelters, a decrease in rail rejection due to the presence of non-metallic inclusions was recorded by 0.6 %.

Keywords: rail steel, purging with inert gas, non-metallic inclusions, numerical modeling, melt mixing

For citation: Dumova L.V., Protopopov E.V., Umanskii A.A. Research and improvement of modes for blowing electric rail steel melt during processing on the ladle-furnace unit. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;2(48):127–135. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-127-135](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-127-135)

Введение

Опыт производства железнодорожных рельсов свидетельствует, что одной из ключевых характеристик их качества, оказывающих определяющее влияние на эксплуатационную стойкость, является загрязненность неметаллическими включениями [1 – 3]. Неметаллические включения выступают в роли центров зарождения контактно-усталостных дефектов, возникающих при прохождении по рельсам железнодорожных составов [4, 5]. В результате имеет место преждевременный вывод рельсов из эксплуатации или их аварийные изломы [6, 7]. В связи с этим требования по допустимым размерам и концентрации неметаллических включений в рельсах постоянно ужесточаются. Данный факт можно проиллюстрировать на примере основного нормативного отечественного документа на производство рельсов – ГОСТ Р 51685. В редакции указанного ГОСТ за 2000 г. для рельсов общего назначения допустимые размеры строчечных включений ограничивались пределами не более 2,0 – 8,0 мм в зависимости от их категории, а в редакциях от 2013 г. и 2022 г. для рельсов специального назначения – пределами не более 500 мкм (0,5 мм). Аналогичная картина имеет место и для рельсов специального назначения, для которых допустимая длина строчечных включений в рельсах в указанный период снижена с 0,5 мм (500 мкм) до 353 мкм. При этом в редакции указанного ГОСТ от 2013 г. впервые введены дополнительные требования по допустимой величине коэффициента загрязненности рельсов от-

дельными глобулярными и строчечными включениями, которые впоследствии ужесточены в редакции стандарта от 2022 г. применительно к рельсам для высокоскоростного движения.

С целью уменьшения загрязненности рельсов неметаллическими включениями на металлургических предприятиях, являющихся основными производителями этого вида металлопроката, постоянно проводятся исследования по совершенствованию технологических режимов выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки стали. Значительное внимание уделяется совершенствованию химического состава рельсовых сталей [8, 9], оптимизации состава металлозавалки плавильных агрегатов [10, 11], режимов раскисления [12, 13] и модифицирования стали в ковше [14, 15], внедрению новых способов обработки стали в процессе ее непрерывной разливки [16 – 18].

Следует констатировать, что одним из эффективных и при этом низкзатратных методов уменьшения концентрации неметаллических включений в рельсовой стали, а, следовательно, и в готовых рельсах является совершенствование режимов продувки расплава в ковше. Обеспечение оптимальной длительности и интенсивности продувки расплава инертным газом позволяет существенно повысить эффективность удаления неметаллических включений из металла в шлак [19, 20]. Однако при этом выбор оптимальных значений указанных параметров продувки расплава необходимо проводить с учетом конструкционных и технологических

особенностей основных агрегатов, что закономерно обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований.

Методика проведения исследований

Исследования, проведенные в условиях электроплавильного цеха (ЭСПЦ) АО «ЕВРАЗ ЗСМК», включали в себя два этапа. На первом этапе выполнено моделирование процесса продувки расплава инертным газом через донные фурмы с использованием предложенной модельной схемы расчета, что позволило провести анализ влияния интенсивности продувки металла на показатели перемешивания. В качестве параметров, характеризующих эффективность гомогенизации расплава, использовали мощность перемешивания и определение значений коэффициентов эффективной диффузии.

Мощность перемешивания определяли с учетом использования законов сохранения энергии и количества движения:

$$N_{\Pi} = \sum_{m=2}^m J_i l_i, \quad (1)$$

где J_i – секундный импульс газовых струй, действующих на расплав, кг·м/с; l_i – «масштаб движения» (или характерный размер), равный 1/3 размера всплывающих пузырей, м.

Следует отметить, что в технической литературе, например, [21], существуют стандартные методики определения удельной мощности перемешивания.

Так, $\varepsilon = 0,01 (VT/Q) \lg[1 + (H \cdot 10^5)/(1,46P)]$ (где ε – удельная мощность перемешивания, кВт/т; V – расход газа, м³/т; P – давление газа, Па; Q – масса металла в ковше, т; T – температура металла, К; H – глубина газовой выделенности, м).

Однако такие расчеты не обеспечивают высокой точности результатов, поскольку не учитывают специфику различных режимов истечения газовых струй. Поэтому определенная данным методом удельная мощность перемешивания, как правило, используется для ориентировочного расчета времени перемешивания, необходимого для достижения гомогенизации расплава [21]:

$$\tau = (600 \pm 100) \varepsilon^{-0,40},$$

где τ – время перемешивания, необходимое для 95 % гомогенизации расплава при донной продувке, с.

Для вычисления значений эффективных коэффициентов диффузии использовали выражение

$$D_{\varepsilon} = \frac{\rho_m g V_{\Gamma} h_b \sqrt{S}}{w_{\text{вспл}} Q}, \quad (2)$$

где ρ_m – плотность металла, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; V_{Γ} – объемный расход инертного газа, м³/с; h_b – высота металла в ковше, м; S – площадь поверхности ванны в спокойном состоянии, м²; m – количество донных пористых пробок; $w_{\text{вспл}}$ – скорость всплытия газовых пузырей, м/с; Q – масса металла в ковше, кг.

В соответствии с общепринятыми характеристиками режимов истечения [19] и расчетов скоростей потока моделирование проводили для пузырькового и струйного режимов истечения газовых струй при варьировании интенсивности продувки в пределах 10 – 85 м³/ч (0,2 – 1,4 м³/мин), что несколько шире фактического интервала изменения расхода инертного газа на продувку для реальных производственных условий, составляющих обычно 10 – 65 м³/ч (0,2 – 1,1 м³/мин).

На втором этапе исследований выполнен детальный статистический анализ влияния интенсивности продувки расплава рельсовой стали в ковше на отбраковку рельсов вследствие скопления неметаллических включений. В качестве объекта анализа использовали выборку из 115 плавок стали марки Э76ХФ. Исследовали влияние продолжительности периодов с интенсивностью продувки, превышающей 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0 и 1,1 м³/мин соответственно на величину отбраковки рельсов по причине скопления неметаллических включений.

В дальнейшем на основе полученных результатов проведены опытно-промышленные плавки по усовершенствованным режимам продувки рельсовой стали инертным газом в процессе обработки на агрегате ковш-печь (АКП).

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам моделирования определено, что увеличение интенсивности продувки расплава инертным газом в рассматриваемых пределах ее изменения обуславливает увеличение мощности перемешивания по линейному закону как для струйного, так и для пузырькового режима продувки (рис. 1). При этом более интенсивно мощность перемешивания возрастает по мере увеличения расхода инертного газа на продувку при реализации струйного режима продувки.

Выполненные расчеты показывают анало-

гичную картину применительно к определению значений эффективных коэффициентов диффузии с той лишь разницей, что зависимость данных коэффициентов от интенсивности продувки носит выраженный нелинейный характер (рис. 2). Очевидно, что полученные результаты свидетельствуют о зависимости величины эффективных коэффициентов диффузии в значительной степени от направления переноса. Зафиксировано, что при аналогичной интенсивности продувки эффективный коэффициент диффузии для случая вертикального переноса (рис. 2, а) выше этого показателя при реализации горизонтального переноса (рис. 2, б) в среднем в 2,2 раза, а относительно радиального переноса (рис. 2, в) разница значений коэффициентов в среднем составляет до 4 единиц.

На основании проведенного регрессионного анализа влияния интенсивности продувки расплава рельсовой стали инертным газом на отбраковку рельсов из-за наличия неметаллических включений установлено, что увеличение продолжительности периодов продувки с расходом инертного газа более $1,1 \text{ м}^3/\text{мин}$ оказывает значимое влияние на снижение указанной отбраковки; при этом изменение продолжительности периодов с меньшими значениями расхода инертного газа на продувку не оказывает влияния на отбраковку рельсов (см. таблицу).

На основании вышеприведенных результатов статистических исследований и моделирования можно сделать вывод, что для условий рассматриваемого электросталеплавильного цеха пороговым значением интенсивности продувки рельсового металла инертным газом в ковше, обеспечивающим эффективное рафинирование расплава от неметаллических включений, является расход газа $1,1 \text{ м}^3/\text{мин}$ на две фурмы (в среднем $0,55 \text{ м}^3/\text{мин}$ на одну фурму). В соответствии с общепринятыми представлениями о механизме удаления неметаллических включений из расплава при продувке инертным газом достижение указанного порогового значения интенсивности продувки обеспечивает активное обновление и эмульгирование шлака по поверхности с металлом, что способствует интенсивному переходу включений, находящихся на межфазной границе, с их последующей ассимиляцией шлаком. Полученные результаты показывают, что, как и в работе [22], удаление крупных неметаллических включений, как правило, происходит за счет их всплывания на поверхность, при этом мелкие включения

удаляются за счет флотации всплывающими пузырьками. Основной причиной отбраковки рельсов в настоящее время являются скопления относительно мелких неметаллических включений (размерами до 10 мкм), что, в частности, показано в работе [22]. Таким образом, основной механизм удаления неметаллических включений из рельсовой стали напрямую связан с интенсивностью ее продувки инертным газом в ковше.

Результаты проведенных исследований явились теоретической базой для разработки усовершенствованного режима продувки рельсовой стали в процессе обработки на АКП. Отличительной особенностью нового режима продувки является наличие периода продолжительностью не менее 10 мин с увеличенным до $35 - 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,6 - 0,7 \text{ м}^3/\text{мин}$) расходом аргона через каждую донную фурму. Указанный период может быть единым (рис. 3, а) или включать два подпериода продолжительностью 5 мин каждый (рис. 3, б), при этом вне зависимости от варианта реализации усовершенствованного режима указанный период (или периоды) должны завершаться не позднее, чем за 10 мин до остановки продувки. Выбор указанных параметров продувки в данном случае обусловлен техническими ограничениями оборудования рассматриваемого цеха.

Опытно-промышленное опробование усовершенствованного режима продувки рельсовой стали инертным газом в ковше (110 плавов) стали марки Э76ХФ, показало снижение отбраковки рельсов из-за скоплений неметаллических включений в среднем на 0,6 %.

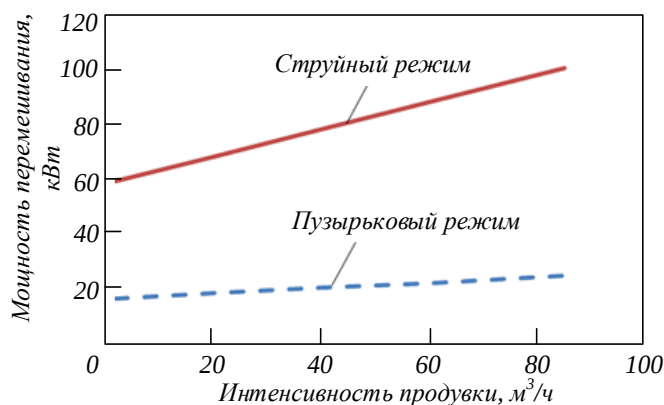


Рис. 1. Влияние интенсивности продувки расплава инертным газом в ковше на мощность перемешивания
Fig. 1. The effect of the intensity of the melt purge with an inert gas in the ladle on the mixing power

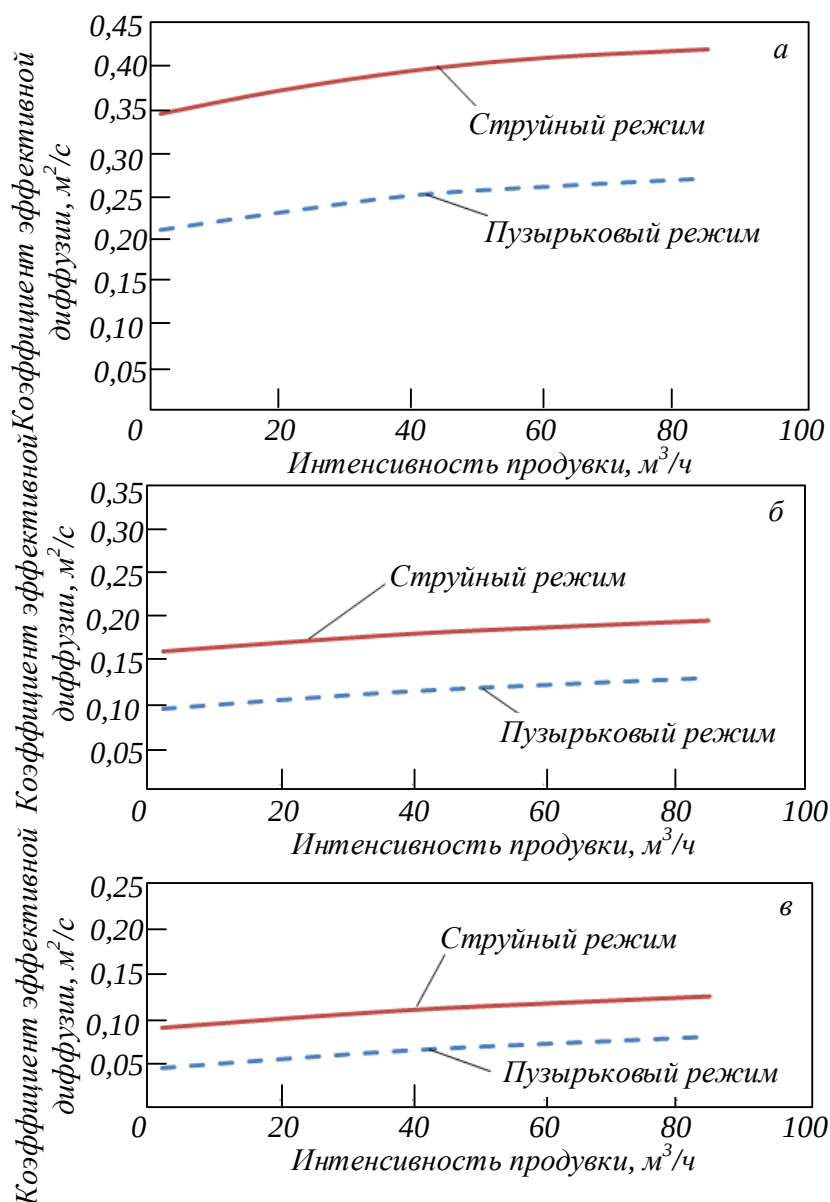


Рис. 2. Зависимость коэффициента эффективной диффузии от интенсивности продувки инертным газом в ковше для вертикального (а), горизонтального (б) и радиального (в) переноса
 Fig. 2. Dependence of the effective diffusion coefficient on the intensity of inert gas purging in the bucket for vertical (a), horizontal (б) and radial (в) transport

**Влияние интенсивности продувки инертным газом при обработке на АКП
 на отбраковку рельсов по неметаллическим включениям
 The effect of the intensity of inert gas purging during automatic transmission processing
 on the rejection of rails by non-metallic inclusions**

Показатель	Интенсивность продувки не менее, $m^3/мин$					
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
Диапазон длительности периода с заданной интенсивностью продувки, мин	0 – 56	0 – 42	0 – 27	0 – 25	0 – 12	0 – 9
Количеством плавок с наличием периода с заданной интенсивностью продувки, шт. / % от общего количества	101/89	82/73	63/56	48/42	34/30	22/19
Коэффициент корреляции с отбраковкой рельсов по модулю	0,12	0,02	–0,04	–0,12	–0,13	–0,24
Критическое значение коэффициента корреляции (по модулю)	0,19					

Выводы

Комплекс исследований, включающих статистический анализ, моделирование и натурные эксперименты в условиях ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК», позволил определить закономерности влияния интенсивности продувки расплава рельсовой стали в ковше на эффективность рафинирования стали от неметаллических включений. Определено пороговое значение параметров продувки, обеспечивающее значимое уменьшение загрязненности рельсовой стали и готовых рельсов неметаллическими включениями. На основе полученных данных разработан усовершенствованный режим продувки рельсовой стали инертным газом при обработке на АКП, применение которого позволило снизить отбраковку рельсов на 0,6 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang H., Liu C., Lin Q., Wang B., Liu X., Fang Q. Formation of plastic inclusions in U71Mn High-speed heavy-rail steel refined by CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO slag. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2019;50(1):459–470. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1451-0>
2. Dhua S.K., Ray A., Sen S.K., Prasad M.S., Mishra K.B., Jha S. Influence of nonmetallic inclusion characteristics on the mechanical properties of rail steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2000;9(6):700–709. <https://doi.org/10.1361/105994900770345584>
3. Kalisz D., Gerasin S., Bobrowski P., Zak P.L., Skowronek T. Computer simulation of microsegregation of sulphur and manganese and formation of MnS inclusions while casting rail steel. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016;61(4):1939–1944.
4. Козырев Н.А., Уманский А.А., Бойков Д.В. Разработка технологии внепечной обработки рельсовой электростали, обеспечивающей повышение эксплуатационной стойкости рельсов. *Черные металлы*. 2015;(4(1000)):29–33.

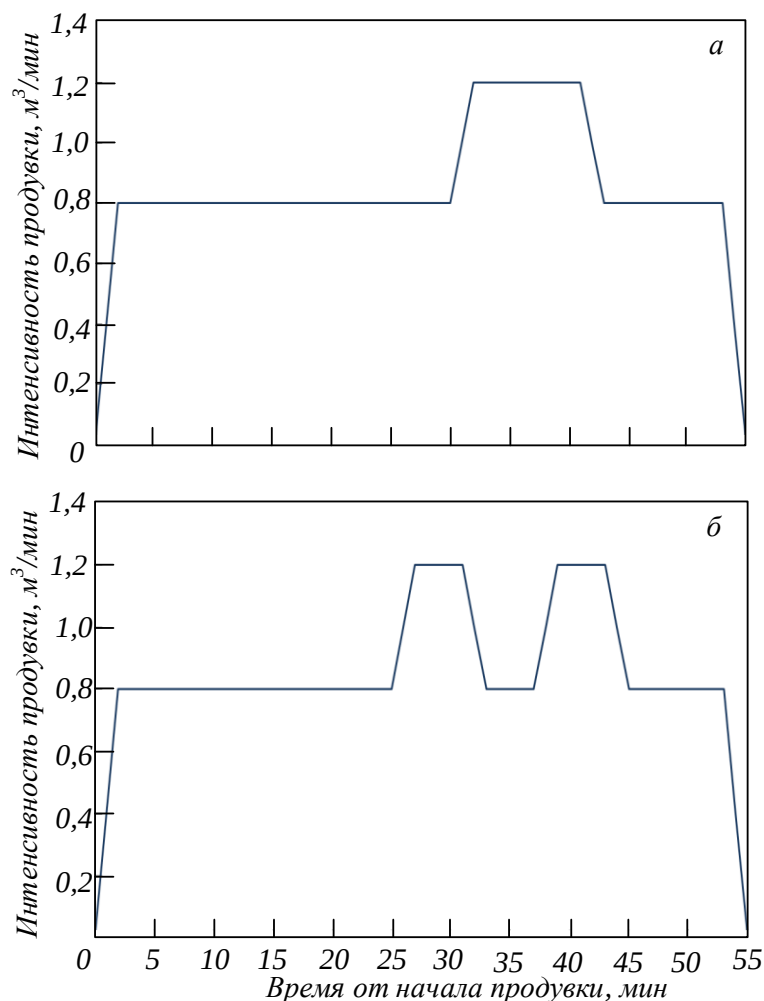


Рис. 3. Усовершенствованный режим продувки расплава рельсовой стали аргоном в ковше с одним (а) и двумя (б) периодами повышенной интенсивности вдувания газа

Fig. 3. Improved mode of purging the melt of rail steel with argon in a bucket with one (a) and two (b) periods of increased gas injection intensity

5. Zhao K.-w., Zeng J.-h., Wang X.-h. Nonmetallic Inclusion Control of 350 km/h high speed rail steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2009;16(3): 20–26. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60038-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60038-8)
6. Кузнецова Н.В. Статистический анализ изъятий рельсов с контактно усталостными видами дефектов. *Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство*. 2021;17(17):41–47. EDN: SDWNGJ
7. Коган А.Я., Абдурашитов А.Ю. Прогнозирование отказов рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения. *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2014;(4):3–7. EDN: TOLHFD
8. Кушнарев А.В., Киричков А.А., Добужская А.Б., Белокурова Е.В. Разработка химического состава рельсовой стали бейнитного класса и технологии производства из нее рельсов в ОАО "ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат". *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2013;(2(1358)):58–62. EDN: PZPWNT
9. Юрьев А.Б., Годик Л.А., Нугуманов Р.Ф., Козырев Н.А., Корнева Л.В. Производство и качество рельсов из стали марки Э90АФ. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2009;(8):34–37.
10. Shabanov P.A., Volkov K.V., Kuznetsov E.P., Aleksandrov I.V. Changing the technical-economic indices of rail-steel production by sorting scrap based on its content of residual elements. *Metallurgist*. 2014; 58 (5-6):500–503.
11. Уманский А.А., Думова Л.В. Исследование комплексного влияния параметров выплавки рельсовой электростали на качество рельсовой продукции и технико-экономические показатели ее производства. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;61(11):876–883. EDN: YTHKNH <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-876-883>
12. Garber A.K., Arsenkin A.M., Grigorovich K.V., Shibaev S.S., Kushnarev A.V., Petrenko Y.P. Analysis of various versions of the deoxidation of rail steel at ОАО NTMK. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2009;7:581–586.
13. Yurev A.B., Godik L.A., Devyatkin Yu.D., Kozыrev N.A., Tokarev A.V. Reduction of rail steel by calcium carbonate. *Steel in Translation*. 2008;38(4):312–314.
14. Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Добужская А.Б., Юнин Г.Н., Полевой Е.В., Бойков Д.В., Спирин С.А. Влияние модифицирования РЗМ на формирование неметаллических включений в высокоуглеродистых сталях. *Сталь*. 2016;(11):21–28.
15. Peng K., Yu D., Zhang P., Wang L., Liao Zh., Lu Zh., Wu G., Song Ch., Li Lu. Laminar plasma quenching-tempering: a rapid surface heat treatment technique for controllable modification of the rail steel. *Surface and Coatings Technology*. 2023;473.
16. Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Темлянцев М.В., Головатенко А.В. Повышение эффективности рафинирования рельсовой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ на основе рациональной организации гидродинамических процессов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(5):298–304. EDN: DURJZB. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-298-304>
17. Матвеев В.В., Федоров Л.К., Милютин Н.М., Белокурова Е.В. Новые шлакообразующие смеси для разливки рельсовой стали. *Сталь*. 2000;(5):26–27.
18. Ren Q., Zhang Y., Wang J., Wang Y., Ren Y., Zhang L., Chu Y. Prediction on the spatial distribution of the composition of inclusions in a heavy rail steel continuous casting bloom. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(3):5648–5665.
19. Chichkarev E.A. Modeling the coagulation and removal of nonmetallic inclusions during the injection of an inert gas into a melt. *Metallurgist*. 2010;54(3):236–243.
20. Чуманов В.И., Хартов В.Ю., Чуманов И.В. К вопросу оптимизации режима продувки металлического расплава инертным газом. *Электрометаллургия*. 2011;(12):25–28.
21. Коминов С.В., Семин А.Е., Чуйков В.Ф. Производство стали: обработка металла инертными газами. Москва: МИСиС; 2014:55.
22. Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С. Исследования неметаллических включений в рельсах из электросталей, легированных хромом. *Известия вузов. Черная Металлургия*. 2019;62(12):936–942. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-12-936-942>

REFERENCES

1. Zhang H., Liu C., Lin Q., Wang B., Liu X., Fang Q. Formation of Plastic Inclusions in U71Mn High-Speed Heavy-Rail Steel Refined by CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO Slag. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2019;50(1):459–470. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1451-0>
2. Dhua S.K., Ray A., Sen S.K., Prasad M.S., Mishra K.B., Jha S. Influence of nonmetallic inclusion characteristics on the mechanical properties of rail

- steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2000;9(6):700–709.
<https://doi.org/10.1361/105994900770345584>
3. Kalisz D., Gerasin S., Bobrowski P., Zak P.L., Skowronek T. Computer simulation of microsegregation of sulphur and manganese and formation of MnS inclusions while casting rail steel. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016;61(4):1939–1944.
 4. Kozyrev N.A., Umansky A.A., Boikov D.V. Development of technology for out-of-furnace processing of rail electric steel, which provides an increase in the operational stability of rails. *Ferrous metals*. 2015;4(1000):29–33. (In Russ.).
 5. Zhao K.-w., Zeng J.-h., Wang X.-h. Nonmetallic Inclusion Control of 350 km/h high speed rail steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2009;16(3): 20–26.
[https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60038-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60038-8)
 6. Kuznetsova N.V. Statistical analysis of rail withdrawals with contact fatigue types of defects. *The introduction of modern structures and advanced technologies in the track economy*. 2021;17(17):41–47. EDN: SDWNGJ (In Russ.).
 7. Kogan A.Ya., Abdurashitov A.Yu. Predicting rail failures based on defects of contact fatigue origin. *Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport*. 2014;(4):3–7. EDN: TOLHFD (In Russ.).
 8. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Dobuzhskaya A.B., Belokurova E.V. Development of the chemical composition of bainite-grade rail steel and technology for the production of rails from it at JSC EVRAZ Nizhnetagilsky Metallurgical Combine. *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2013;(2(1358)):58–62. EDN: PZPWNT (In Russ.).
 9. Yurev A.B., Godik L.A., Nugumanov R.F., Kozyrev N.A., Korneva L.V. Production and quality of 90AF steel rail. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2009;(8):34–37.
 10. Shabanov P.A., Volkov K.V., Kuznetsov E.P., Aleksandrov I.V. Changing the technical-economic indices of rail-steel production by sorting scrap based on its content of residual elements. *Metallurgist*. 2014; 58 (5-6):500–503.
 11. Umansky A.A., Dumova L.V. Investigation of the complex influence of the parameters of smelting of a rail electric steel on the quality of rail products and technical and economic indicators of its production. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2018;61(11):876–883. EDN: YTUHKH (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-876-883>
 12. Garber A.K., Arsenkin A.M., Grigorovich K.V., Shibaev S.S., Kushnarev A.V., Petrenko Y.P. Analysis of various versions of the deoxidation of rail steel at OAO NTMK. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2009;7:581–586.
 13. Yurev A.B., Godik L.A., Devyatkin Yu.D., Kozyrev N.A., Tokarev A.V. Reduction of rail steel by calcium carbonate. *Steel in Translation*. 2008;38(4):312–314.
 14. Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Dobuzhskaya A.B., Yunin G.N., Polevoy E.V., Boikov D.V., Spirin S.A. The effect of REM modification on the formation of non-metallic inclusions in high-carbon steels. *Steel*. 2016;(11):21–28. (In Russ.).
 15. Peng K., Yu D., Zhang P., Wang L., Liao Zh., Lu Zh., Wu G., Song Ch., Li Lu. Laminar plasma quenching-tempering: a rapid surface heat treatment technique for controllable modification of the rail steel. *Surface and Coatings Technology*. 2023;473.
 16. Protopopov E.V., Chislavlev V.V., Temyantsev M.V., Golovatenko A.V. Improving the efficiency of refining rail steel in intermediate buckets of the CML based on the rational organization of hydrodynamic processes. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2020;63(5):298–304. EDN: DURJZB. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-298-304>
 17. Matveev V.V., Fedorov L.K., Milyutin N.M., Belokurova E.V. New slag-forming mixtures for casting rail steel. *Steel*. 2000;(5):26–27. (In Russ.).
 18. Ren Q., Zhang Y., Wang J., Wang Y., Ren Y., Zhang L., Chu Y. Prediction on the spatial distribution of the composition of inclusions in a heavy rail steel continuous casting bloom. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(3):5648–5665.
 19. Chichkarev E.A. Modeling the coagulation and removal of nonmetallic inclusions during the injection of an inert gas into a melt. *Metallurgist*. 2010;54(3):236–243.
 20. Chumanov V.I., Khortov V.Yu., Chumanov I.V. On the issue of optimizing the mode of purging a metal melt with an inert gas. *Electrometallurgy*. 2011;(12):25–28. (In Russ.).
 21. Kominov S.V., Semin A.E., Chuikov V.F. *Steel production: metal processing with inert gases*. Moscow: MISiS; 2014:55. (In Russ.).
 22. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Simachev A.S. Nonmetallic inclusions in rails made of electro-steel alloyed with chromium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(12):936–942. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-12-936-942>

Сведения об авторах

Любовь Валерьевна Думова, ведущий инженер Центра коллективного пользования «Материаловедение» института металлургии и материаловедения, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: doumova@bk.ru
SPIN-код: 9466-1300

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: protopopov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7554-2168
SPIN-код: 9775-0226

Александр Александрович Уманский, д.т.н., доцент, директор института металлургии и материаловедения, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: umanskii@bk.ru
ORCID: 0000-0003-4403-9006
SPIN-код: 2374-4553

Information about the authors

Lyubov' Valeryevna Dumova, Leading engineer of the Center for Collective Use "Materials Science" of the Institute of Metallurgy and Materials Science, Siberian State Industrial University
Email: doumova@bk.ru
SPIN-код: 9466-1300

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
Email: protopopov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7554-2168
SPIN-код: 9775-0226

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Director of the Institute of Metallurgy and Materials Science, Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
Email: umanskii@bk.ru
ORCID: 0000-0003-4403-9006
SPIN-код: 2374-4553

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 13.05.2024
После доработки 06.06.2024
Принята к публикации 10.06.2024

Received 13.05.2024
Revised 06.06.2024
Accepted 10.06.2024