

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 4, 2025 vol. 2

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



SLIB.UZ
Scientific library of Uzbekistan



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**
Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT
RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

**E-ISSN: 2181-2438
ISSN: 3060-5164**

**VOLUME 2, ISSUE 4
DECEMBER, 2025**



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 2, ISSUE 4 DECEMBER, 2025

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “Journal of Transport” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organization
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

Analysis of production technology for 20gl steel grade in an induction crucible furnace

N.K. Tursunov¹^a, A.A. Saidirakhimov¹^b

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract:

This work examines the implementation of a new technology with argon blowing in an induction crucible furnace. The processes of steel dephosphorization and desulfurization were analyzed. The results of the proposed technology were compared with the results of the existing technology. Technological changes in steel smelting in an induction crucible furnace are also shown.

Keywords:

refining agents: HYJ-90, HYJ-91, HJL-2, argon blowing, dephosphorization, deoxidation, and desulfurization of steel

Анализ технологии производства стали марки 20гл в индукционной тигельной печи

Турсунов Н.К.¹^a, Saidirakhimov А.А.¹^b

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация:

В данной работе рассмотрено внедрение новой технологии с продувкой аргоном в индукционной тигельной печи. Проанализированы процессы дефосфорации и десульфурации стали. Результаты предложенной технологии были сопоставлены с результатами существующей технологии. Также, показаны технологические изменения по выплавке стали в индукционной тигельной печи.

Ключевые слова:

рафинирующие агенты: HYJ-90, HYJ-91, HJL-2, продувка аргоном, дефосфорация, раскисление и десульфурация стали

1. Введение

Окисление элементов начинается уже в период плавления. Окисляются марганец, кремний, углерод, фосфор и другие активные элементы. После плавления необходимо скачивание шлака для предотвращения восстановления фосфора. После скачивания шлака в расплавленный металл добавляется 20 кг рафинирующего агента HYJ-90 (рисунок 1 а) с составом $Na+Al+Ca-92,55\%$, основными задачами которого является дефосфорация и десульфурация стали [1], затем рафинирующий флюс HYJ-91 (рисунок 1 б) с составом $Al_2O_3-28,55\%$, $MgO-62,72\%$, $Fe_2O_3-0,57\%$, функцией которого является защита печи и снижение эрозионных потерь футеровки, вдоль стенки печи, чтобы он прилип к разъеденной футеровке [2]. Также, загружается стальной лом, и когда расплавленный металл почти заполнится, скачивают окислительный шлак, отбирают пробу металла, после чего добавляется HYJ-90 в количестве 40 кг и 7 кг алюминия для проведения десульфурации в течение 15-20 минут. Легируют сталь ферромарганцем ФМн95 и ферросилицием ФС65. Затем, отбирают пробу металла на химический анализ.



Рис. 1. а) Рафинирующий агент HYJ-90 и б) Рафинирующий агент HYJ-91

Металл подогревают до температуры $1640\pm 5^{\circ}C$. На дно ковша кидают рафинирующий агент HJL-2 (рисунок 2), состав которого содержит $Na+Al+C+Si-94,79\%$, в количестве 1-3 кг на тонну металла. Основной функцией HJL-2 является удаление кислорода, азота и водорода, снижение содержания серы и фосфора, позволяющее повышению механических свойств металла [3]. Затем металл выливают из печи в ковш. Металл выпускается при температуре $1640\pm 5^{\circ}C$ в ковш. В ковш добавляются алюминий, порошковая проволока, содержащая ванадий, силикокальций СК30 для модификации. Температура металла в ковше должна быть $1580\pm 5^{\circ}C$. Затем ковш подается на разливку [4].

Для получения чистой по неметаллическим включениям стали с низким содержанием газов, быстрой и эффективной гомогенизации и ускорения

^a <https://orcid.org/0009-0008-7910-3980>

^b <https://orcid.org/0009-0004-1440-7458>

массообменных процессов все больше используют донную продувку инертными газами в печи. Наряду с улучшением качества стали донная продувка увеличивает производительность печи, снижает расход электроэнергии, легирующих и раскислителей [5].



Рис. 2. Рафинирующий агент HJL-2

Для получения чистой по неметаллическим включениям стали с низким содержанием газов, быстрой и эффективной гомогенизации и ускорения массообменных процессов все больше используют донную продувку инертными газами в печи. Наряду с улучшением качества стали донная продувка увеличивает производительность печи, снижает расход электроэнергии, легирующих и раскислителей [5].

Продувка аргоном способствует интенсивному перемешиванию металла со шлаком, в результате пузыри газа оказывают рафинирующее воздействие на металл. Также, выравнивается температура и химический состав стали [5].

В таблице 1 представлены количества расходуемых флюсов на одну плавку по существующей и предложенной технологиям. В таблице 2 представлены технологические показатели по двум технологиям.

Таблица 1

Расход флюсов на одну плавку по двум технологиям

Технология	Расход извести, кг	Расход плавильного шпата, кг	Теплоплавильная смесь (ТИС), кг	Раф. агент (HYJ 90), кг	Смаз. смесь (HYJ 91), кг	Раф. агент (HJ L2), кг
Существующая	75-100	20-25	15-20	-	-	-
Предложенная	-	-	-	40-60	15-25	6

Таблица 2

Технологические показатели по двум технологиям

Технология	Продолжительность десульфурации, мин	Стойкость футеровки, число плавок	Содержание элементов	
			S min-max /cp.	P min-max /cp.
Существующая	40-50	25-30	0,020-0,025 /0,024	0,023-0,025 /0,024
Предложенная	15-20	40-45	0,017-0,025 /0,022	0,015-0,025 /0,022

2. Методика исследования

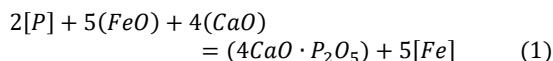
По новой технологии отказались от использования извести и плавикового шпата. Вместо них начали применять реагент HYJ-90.

Среднее содержание серы и фосфора снизилось с 0,024% до 0,022%. Продолжительность процесса десульфурации сократилась с 40-50 мин до 15-20 мин, а стойкость футеровки печи увеличилась с 25-30 плавок до 40-45 плавок.

Анализ процесса дефосфорации стали

Окисление фосфора протекает на границе металл-шлак, так как в объеме металла содержание кислорода (в присутствии углерода) всегда ниже равновесного с фосфором [6].

Процесс дефосфорации стали идет шлаком по реакции (1) [7]-[8]:



Константа равновесия реакции дефосфорации описывается в виде уравнения (2).

$$\lg K = \lg \frac{a_{(4CaO \cdot P_2O_5)}}{[P]^2 \cdot f_P^2 \cdot a_{(FeO)}^5 \cdot a_{(CaO)}^4} = \frac{40067}{T} - 15,06 \quad (2)$$

Отсюда, содержание фосфора в стали определяется уравнением (3).

$$[P] = \sqrt{\frac{a_{(4CaO \cdot P_2O_5)}}{K \cdot f_P^2 \cdot a_{(FeO)}^5 \cdot a_{(CaO)}^4}} \quad (3)$$

Таким образом, анализ уравнения (3) позволяет заключить, что дефосфорации способствуют повышение концентрации CaO и понижение концентрации SiO₂, т.е. увеличение основности шлака, а также повышение содержания FeO в шлаке [7]-[8].

Необходимость избытка основных оксидов в шлаке делает дефосфорацию металла возможной лишь при плавке стали в основных печах в окислительный период, когда в шлаке достаточно высокое содержание FeO. При понижении содержания FeO в шлаке, особенно в восстановительный период, происходит восстановление фосфора с переходом его в металл. Это вызывает необходимость удаления окислительного фосфорсодержащего шлака перед наводкой восстановительного шлака [8].

На степень дефосфорации стали значительное влияние оказывает температура ванны. С повышением температуры степень дефосфорации уменьшается.

Фактическая степень удаления фосфора равна:

$$\eta_P = \frac{0,027 - 0,022}{0,027} \cdot 100\% \approx 18,5\%$$

Такая низкая степень дефосфорации может быть связана с низкой активностью оксида железа в шлаке, т.е. с низкой окислительной способностью шлака, низкой температурой шлака, т.е. меньшей реакционной способностью шлака и металла за счет пониженной температуры шлака, также меньшей удельной поверхностью контакта металла и шлака, обеспечивающей поступление кислорода в металл. Так как, процесс лимитируется в основном температурой расплава.



Анализ раскисления стали

На выпуск стали из ИТП в ковш, сталь раскисляют алюминием. На таблице 3 показан средний химический состав стали.

Таблица 3
Химический состав стали на выпуске из ковша
(масс. %)

C	Si	Mn	Al	S	P
0,211	0,373	1,187	0,040	0,020	0,023

В результате процессов раскисления большая часть растворенного кислорода связывается в оксиды и удаляется в виде неметаллических включений. Принять, что компоненты металла образуют идеальный разбавленный раствор, а продуктом раскисления являются чистые оксиды [7].

$$lgK_C = lg \frac{P_{CO}}{a_C \cdot a_O} = lg \frac{1}{f_C \cdot [C] \cdot a_O} = \frac{1166,9}{T} + 2,1 \quad (4)$$

$$lgK_{Si} = lg \frac{a_{SiO_2}}{a_{Si} \cdot a_O^2} = lg \frac{1}{f_{Si} \cdot [Si] \cdot a_O^2} = \frac{32150,9}{T} - 12,3 \quad (5)$$

$$lgK_{Mn} = lg \frac{a_{MnO}}{a_{Mn} \cdot a_O} = lg \frac{1}{f_{Mn} \cdot [Mn] \cdot a_O} = \frac{14591}{T} - 6,0 \quad (6)$$

$$lgK_{Al} = lg \frac{a_{Al_2O_3}}{a_{Al}^2 \cdot a_O^3} = lg \frac{1}{f_{Al}^2 \cdot [Al]^2 \cdot a_O^3} = \frac{65004,3}{T} - 20,6 \quad (7)$$

Таблица 4
Результаты расчета раскисления стали при 1600 °C

Элементы <i>i</i>	<i>f_i</i>	<i>K_i</i>	<i>a_Oⁱ</i>	[O] _{<i>i</i>} , %
C	1,12	504,7	0,0084	0,0124
Mn	0,96	55,6	0,016	0,0237
Si	1,22	76913	0,0053	0,0078
Al	1,05	2,5·10 ¹⁴	0,00017	0,00036

Неметаллические включения, которые образуются при добавлении алюминия, принято называть первичными. Количество первичных включений можно рассчитать по разнице содержаний кислорода до и после добавления алюминия. При этом необходимо учесть, что в одной молекуле включения глинозема (Al_2O_3) содержится три атома кислорода [7].

$$m_{Al_2O_3}^{(1)} = \frac{([O]^{Si} - [O]^{Al})}{3 \cdot M_O} \cdot M_{Al_2O_3} \quad (8)$$

где $[O]^R$ – равновесное содержание кислорода с элементом, определяющим окисленность металла, до добавления алюминия;

$M_O, M_{Al_2O_3}$ – молярные массы атомарного кислорода и глинозема.

Подставляя $[O]^{Si}, M_O, M_{Al_2O_3}$ в (8), найдем массу (%) первичных включений Al_2O_3 .

$$m_{Al_2O_3}^{(1)} = \frac{([O]^{Si} - [O]^{Al})}{3 \cdot M_O} \cdot M_{Al_2O_3} = \frac{0,0078 - 0,00036}{3 \cdot 16} \cdot 102 = 0,0158\%$$

При охлаждении металла равновесное содержание кислорода будет снижаться и избыток кислорода будет выделяться в виде включений, которые принято называть вторичными [7].

Таблица 5
Результаты расчета раскисления стали при 1550 °C

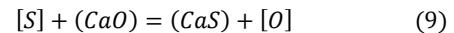
<i>f_{Al}</i>	<i>K_{Al}</i>	<i>a_O^{Al}</i>	[O] _{Al} , %
1,06	10^{15}	0,000082	0,00018

Масса образовавшихся при охлаждении жидкого металла на 50 °C вторичных включений

$$m_{Al_2O_3}^{(2)} = \frac{([O]^{Al,1600} - [O]^{Al,1550})}{3 \cdot M_O} \cdot M_{Al_2O_3} = \frac{0,00036 - 0,00018}{3 \cdot 16} \cdot 102 = 0,00038\%$$

Таким образом, при добавлении алюминия и его остаточном содержании на уровне 0,040% равновесное содержание кислорода составляет 3,6 ppm, а количество первичных и вторичных включений – 0,0158 и 0,00038% масс. соответственно.

Анализ процесса десульфурации стали
Реакция десульфурации имеет вид [9]:

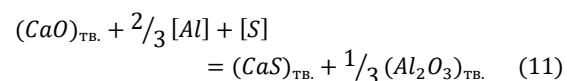


Из выражения константы равновесия К получим

$$[S] = \frac{a_{Cas} \cdot a_O}{a_{CaO} \cdot f_S \cdot K} \quad (10)$$

Видно, что более полной десульфурации способствует высокая активность CaO в шлаке и серы в металле, низкая окисленность системы a_O , а также пониженная активность CaS в шлаке.

Процесс десульфурации с использованием алюминия и ТШС можно описать реакцией (6) [10]-[11].



Константа равновесия реакции (6) имеет вид:

$$K = \frac{a_{Cas} \cdot a_{(Al_2O_3)}^{\frac{1}{3}}}{a_{CaO} \cdot a_{[Al]}^{\frac{2}{3}} \cdot a_{[S]}^{\frac{1}{3}}} \quad (12)$$

Равновесный коэффициент распределения серы между металлом и шлаком L_s , характеризующий полноту десульфурации, можно выразить эмпирическим уравнением (8) [12]-[13]:



$$\lg L_s = -2,78 + 0,86 \cdot \frac{(\%CaO) + 0,05 \cdot (\%MgO)}{(\%SiO_2) + 0,6 \cdot (\%Al_2O_3)} - \lg a_{[O]} + \lg f_s \quad (13)$$

где (CaO) и др. – содержание соответствующих оксидов в шлаке, % масс;

$a_{[O]}$ – активность кислорода в металле;

f_s – коэффициент активности серы в металле.

Степень десульфурации рассчитываем по формуле (14).

$$\eta = \frac{[S]_h - [S]_k}{[S]_h} \cdot 100\% \quad (14)$$

$$\eta_{\text{факт.}} = \frac{0,036 - 0,022}{0,036} \cdot 100\% \approx 39\%$$

Такое значение в степени десульфурации может быть связано с высокой окисленностью системы, т.е. низкой раскисленностью металла, которое требует больше расхода раскислителей или более сильных раскислителей. Также, может быть связано с интенсивностью перемешивания и недостаточной продолжительностью скачивания шлака [14].

3. Заключение

Данная технология предполагает более эффективное проведение процесса дефосфорации и десульфурации в индукционной печи в кратчайшие промежутки времени, что приводит к сокращению времени и, как следствие, к увеличению суточной производительности. Также, данная технология позволяет повысить стойкость футеровки печи и продлить срок ее службы.

Использованная литература / References

- [1] Инструкции по применению рафинирующего агента HYJ-90
- [2] Инструкции по применению рафинирующего агента HYJ-91
- [3] Инструкции по применению рафинирующего агента HJL-2
- [4] Инновационное производство высоколегированной стали и сплавов : теория и технология выплавки стали в индукционных печах : учеб. пособие / А.Е. Семин, Н.К. Турсунов, К.Л. Косырев. – М. : Изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2017. – 166 с.
- [5] М.П. Гуляев, В.В. Филиппов, В.В. Эндерс, Эв. Шумахер, Эд. Шумахер, Р. Францки, Х. Бренер. Первые в СНГ системы донной продувки металла инертными газами в дуговой сталеплавильной печи, Труды шестого конгресса сталеплавильщиков (г. Череповец, 17-19 октября 2000 г.). Москва – 2001. С. 308 – 313.
- [6] Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. М.: Металлургия, 1987, 272 с.

[7] Турсунов Н.К., Семин А.Е., Санокулов Э.А. Исследование процессов дефосфорации и десульфурации при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи. Сборник трудов. Москва – Электросталь. 2016 г. С. 272 – 276.

[8] Tursunov N. K., Semin A. E., Sanokulov E. A. Study of deporphoration and desulphurization processes in the smelting of 20GL steel in the induction crucible furnace with consequent ladle treatment using rare earth metals. Chernye Metally. 2017. No. 1. pp. 33–40.

[9] Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов: Сб. задач с решениями/ В. А. Григорян, А. Я. Стомахин, Ю. И. Уточкин и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСиС, 2007. -318.

[10] Турсунов Н. К. Исследование процессов рафинирования и модификации металла с целью совершенствования технологии выплавки стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи и повышения ее качества: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2017. – 116 с.

[11] Современные проблемы металлургии и материаловедения : практикум / А.Е. Семин, А.В. Аллатов, Г.И. Котельников. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 56 с. ISBN 978-5-87623-890-0.

[12] Tursunov, N.K., Semin, A.E., Sanokulov, E.A. Study of desulfurization process of structural steel using solid slag mixtures and rare earth metals, (2016) Chernye Metally, (4), pp. 32-37.

[13] Tursunov N. K., Semin A. E., Kotelnikov G. I. Kinetic features of desulphurization process during steel melting in induction crucible furnace. Chernye Metally. 2017. No. 5. pp. 23–29.

[14] N. Tursunov, A. Saidirakhimov, and O. Toirov, “Experimental and theoretical study of the efficiency of solid slag mixtures for desulfurization of 20GL steel under conditions of induction crucible melting,” Vibroengineering Procedia, Vol. 58, pp. 283–290, May 2025.

Информация об авторах/ Information about the authors

Нодиржон Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра “Машиностроения и материаловедения”, профессор, д.т.н.
E-mail: u_nadir@mail.ru
Tel.:+998712990169
<https://orcid.org/0009-0008-7910-3980>

Азизжон Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра “Машиностроения и материаловедения”, докторант
E-mail: azisaidrahimov@gmail.com
Tel.:+998994052928
<https://orcid.org/0009-0004-1440-7458>



Sh. Pirnaev, Sh. Khodjaeva, D. Kuchkorov

*Scientific basis for increasing the efficiency of milling technologies
in road repair processes.....45*

N. Tursunov, A. Saidirakhimov

*Analysis of production technology for 20gl steel grade in an
induction crucible furnace48*

M. Umarova

Assessment of the safety of foundry production52