JOURNAL OF TRANSPORT

ISSUE 1, 2025 vol. 2
E-ISSN: 2181-2438
ISSN: 3060-5164

SLIB.UZ
Scientific library of Uzbekistan

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI

Tashkent state transport university

JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 2, ISSUE 1

MARCH, 2025

jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 2, ISSUE 1 MARCH, 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 Organizatsion
- 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.

Theoretical and experimental studies of the process of metal desulfurization using solid slag mixtures during the smelting of 20GL steel in an induction crucible furnace

N.K. Tursunov[1][a], **A.A. Saidirakhimov**[1][b]
[1]Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: When producing steel, the enterprise faces difficulties in removing sulfur from the melt. In turn, an increased sulfur content in the finished product leads to a decrease in the values of some mechanical properties. This work analyzes the desulfurization process of 20GL grade steel in an induction crucible furnace. The influence of sulfur on the impact toughness of steel and the factors influencing sulfur removal are considered. Calculated data and industrial melting data were obtained, the difference between these data was explained, and recommendations were made based on this data. The parameters of steel smelting technology, which determine the chemical composition and structure, are the main factors contributing to high mechanical properties.
The relevance of the work lies in the need to improve and develop the desulfurization process, which allows for the production of steel with low sulfur content and high mechanical properties.

Keywords: Steel desulfurization, steel deoxidation, non-metallic inclusions, alkaline earth metals, rare earth metals, solid slag mixtures, furnace lining, mechanical properties, impact toughness.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса десульфурации металла с использованием твердых шлаковых смесей при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи

Турсунов Н.К.[1][a], **Саидирахимов А.А.**[1][b]
[1]Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: При производстве стали многие предприятия сталкивается с трудностями по удалению серы из расплава. В свою очередь, повышенное содержание серы в готовой продукции приводит к пониженным значениям некоторых механических свойств. В данной работе проанализирован процесс десульфурации стали марки 20ГЛ в индукционной тигельной печи. Рассмотрены влияние серы на ударную вязкость стали и влияющие факторы на удаление серы. Получены расчетные данные и данные промышленных плавок, объяснены различие между этими данными, на основе которых даны рекомендации. Параметры технологии выплавки стали, которые определяют химический состав и структуру являются основными факторами, способствующими высоким механическим свойствам.
Актуальность работы заключается в необходимости совершенствования и разработки процесса десульфурации стали, позволяющего получать сталь с низким содержанием серы и высокими механическими свойствами.

Ключевые слова: Десульфурация стали, раскисление стали, неметаллические включения, щелочноземельные металлы, твердые шлаковые смеси, футеровка печи, механические свойства, ударная вязкость

1. Введение

Основным видом деятельности АО “Литейно-механический завод” является производство деталей для железнодорожного транспорта. Основными деталями из них являются боковая рама и надрессорная балка, которые отливаются из стали марки 20ГЛ.

Для повышения качества стали 20ГЛ были проведены работы с применением легирования. Однако, легирование увеличивает прочность с уменьшением пластичности. Эта сталь должна обладать достаточной пластичностью и ударной вязкостью. Также выплавка стали включает процессы рафинирования от вредных примесей, таких как кислород, сера, фосфор.

Боковая рама считается несущим элементом тележек вагонов. Боковая рама выдерживает статические и динамические вертикальные нагрузки (от веса вагона и груза, от ударов при прохождении неровностей пути) и продольные нагрузки (усилия тяги при равномерном движении состава, усилия при соударении вагонов), а также подвергается воздействию крутящего момента при вписывании вагонов в кривые. При этом основная

[a] https://orcid.org/0009-0008-7910-3980
[b] https://orcid.org/0009-0004-1440-7458

часть динамических вертикальных нагрузок носит циклический характер, и усталостная прочность боковых рам (способность длительно противостоять воздействию циклических нагружений) является основной характеристикой их эксплуатационной надежности [1].

Рама боковая (рисунок 1(а)) и балка надрессорная (рисунок 1(б)) являются основными деталями железнодорожного транспорта.

Рис. 1(а). Рама боковая

Рис. 1(б). Балка надрессорная

Химический состав и механические свойства стали 20ГЛ по ГОСТ 32400-2013 приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав стали 20ГЛ, (% масс.)

C	Si	Mn	Al	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
				не более					
0,17 - 0,25	0,30 - 0,50	1,10 - 1,40	0,020 - 0,060 (±0,005)	0,020 (±0,005)	0,020 (±0,005)	0,30	0,30	0,60	ост.

Таблица 2

Механические свойства стали 20ГЛ

Предел текучести, МПа	Временное сопротив-ление, Мпа	Отн. удлинение, %	Отн. сужение, %	Ударная вязкость, KCV^{-60}, кДж/м^2
не менее				
343	510	18	30	200

2. Методология исследования

Отрицательное влияние серы на свойства стали определяется ее физико-химическим взаимодействием с железом, т.е. высокой растворимостью в жидком расплаве и весьма малой растворимостью в твердом альфа-железе. Температура плавления эвтектики Fe – FeS составляет 975 °C. Во время кристаллизации в междендритных пространствах расплав обогащается серой. Также сера влияет на свойства металла через сульфидные включения, образующиеся как последствия металлургических процессов связывания серы в соединения, более прочные, чем FeS [2].

При охлаждении стали образуются сульфиды за счет уменьшения растворимости серы. В основном образуются сульфиды железа (FeS) и сульфиды марганца (MnS), также сера образует сульфиды других элементов. Сульфид железа имеет температуру плавления 1188°C, однако в металле образуется легкоплавкая эвтектика с температурой плавления 988°C. При высоких температурах эвтектика расплавляется, что приводит к красноломкости стали. Даже относительно низкое содержание серы в металле может приводить к уменьшению механических и технологических свойств за счет склонности к ликвации [3].

Во время кристаллизации и охлаждения стали сера выделяется из раствора в виде включений сульфидов или оксисульфидов FeS·FeO вследствие понижения растворимости. Так как выделение этих включений происходит в конце затвердевания, то они распределяются по границам зерен уже образовавшихся кристаллов, ослабляя их связь, за счет чего ухудшаются свойства металла.

При комнатной и близких к ней температурах включения сульфидов понижают механические свойства стали – пластичность, ударную вязкость [2].

На рисунке 2 показано влияние серы и фосфора на ударную вязкость стали.

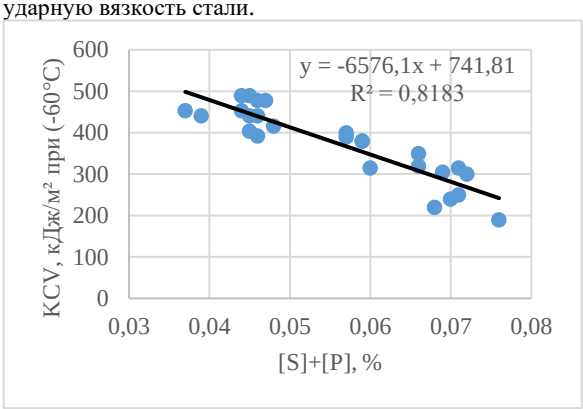

Рис. 2. Зависимость влияния суммарного содержания вредных примесей на ударную вязкость стали (фактические данные)

Как видно из экспериментальных данных, с увеличением содержания серы в стали заметно уменьшается ударная вязкость. Поэтому сталь с высокой ударной вязкостью можно получить снижением содержания серы до низких уровней. На рисунке 3 показано влияние содержания алюминия на ударную вязкость стали.

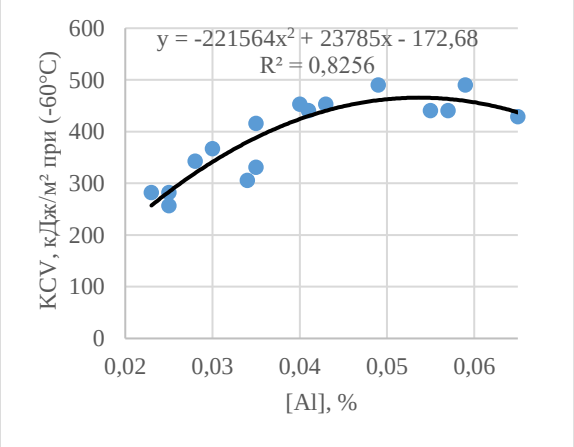

Рис. 3. Зависимость влияния алюминия на ударную вязкость стали (фактические данные)

Из рисунка 3 видно, что с увеличением содержания алюминия растет уровень ударной вязкости. Это можно объяснить тем, что алюминий взаимодействует с кислородом и азотом, снижая их содержания в твердом растворе. Так как, азот и кислород находятся в твердом растворе и при охлаждении уменьшаются их растворимость, образуя хрупкие фазы в виде оксидов и нитридов по границам зерен, тормозящих рост зерен.

Выделение избыточного алюминия по границам зерен с образованием неметаллических включений влияет на механические свойства. Образуемые сегрегации вызывают межзеренное охрупчивание, приводящее к снижению ударной вязкости [4].

В сталях, раскисленных алюминием, сульфидные включения, выделяясь по границам первичных кристаллитов, уменьшают их спайность и тем самым обеспечивают снижение показателей пластичности и вязкости металла. Поэтому, чем выше концентрация серы в металле, тем в большей степени он загрязнен неметаллическими включениями и тем ниже будут показатели пластических свойств [5].

По характеру раскисления и химическому составу в стали могут образовываться сульфиды трех типов.

1-тип. Мелкие глобулярные сульфиды марганца и оксисульфидные включения. Такие включения образуются в сталях, содержащих малые содержания алюминия.

2-тип. Эвтектические сульфиды марганца в виде непрерывистой пленки. Такие включения располагаются в виде пленок, что приводит к уменьшению сил межкристаллитных связей и заметному снижению вязких и пластических характеристик.

3-тип. Крупные ограненные сульфиды марганца. Они образуются при повышенном содержании алюминия.

Из них наиболее отрицательно влияют на свойство стали сульфиды 2-типа. Содержание алюминия, обусловливающее образование сульфидов того или иного типа, зависит от состава стали, также значительно от содержания углерода [6].

Вклад неметаллических включений, образующихся при добавлении алюминия в количестве 0,02-0,06% в низкую ударную вязкость, невелик.

Основными влияющими факторами на процесс десульфурации являются состав и количество шлака, степень раскисленности стали, интенсивность перемешивания шлака и металла, состав металла, футеровка ковша. Оптимизация этих технологических факторов обеспечивает эффективность протекания процесса [7].

Шлак выполняет ряд технологических функций, как ассимиляция неметаллических включений, защита от вторичного окисления, десульфурация. Для выполнения таких функций шлак должен иметь следующие характеристики: основность (CaO/SiO_2)>5; содержание (SiO_2)<10% (масс.); содержание (FeO)+(MnO)<1,0% (масс.); жидкоподвижность. Для достижения таких характеристик необходимо использовать шлакообразующие материалы (известь, плавиковый шпат, глиноземсодержащие материалы) и раскислители в разных соотношениях [8].

В настоящее время наиболее современным десульфуратором является флюидизированная известь, карбид кальция и гранулированный магний. Обработка металла флюидизированной известью получила большое распространение и является хорошим десульфуратором, что позволяет получать сталь с низким содержанием серы (до 0,003%). Флюидизированная известь представляет собой фракционно-дисперсным составом, высоким содержанием CaO (более 95%) и отсутствием других примесей [9].

Щелочноземельные металлы обладают высокими рафинирующими свойствами по отношению к сере и кислороду, растворенным в стали. Добавление ЩЗМ в расплав обеспечивает не только снижение серы и кислорода, а также способствует управлять природой, формой выделений неметаллических включений, что позволяет получать металл с оптимальными физико-механическими, технологическими свойствами [5].

Однако получение стали с низкой концентрацией кислорода является главной, но не единственной задачей. При раскислении алюминием в сталях образуются облакообразных скоплений остроугольных частиц, приводящих к образованию микротрещин. Добавление в сталь более сильных раскислителей, как магний, кальций и РЗМ приводит к значительному снижению кислорода, изменению морфологии включений, уменьшению количества поверхностных и внутренних дефектов в сталях [10].

Содержание кислорода и вид раскислителя влияют на образование включений в стали. При этом необходимо предотвращение поступления кислорода из атмосферы. Поэтому продувка инертным газом (аргоном) весьма важна. Кроме того, продувка позволяет увеличивать степень десульфурации, усреднять химический состав и температуру, удалять неметаллические включения. Однако интенсивность газа не должна оголять металл, что приводит к вторичному окислению металла [11].

В таблице 3 показан средний химический состав стали при выпуске (фактические данные).

Таблица 3

Химический состав стали на выпуске из печи (масс. %)

C	Si	Mn	Al	S	P	Fe
0,214	0,356	1,157	0,042	0,020	0,023	ост.

Раскисление алюминием описывается уравнением (1) [12].

$$2[Al] + 3[O] = (Al_2O_3) \quad (1)$$

Константа равновесия реакции описывается уравнением (2).

$$lgK_{Al} = lg\frac{a_{Al_2O_3}}{a_{Al}^2 \cdot a_O^3} = lg\frac{1}{f_{Al}^2 \cdot [Al]^2 \cdot f_O^3 \cdot [O]^3} = \frac{62984,38}{T} - 19,886 \quad (2)$$

где: $[Al]$– содержание алюминия в металле, %;
$[O]$– содержание кислорода в металле, %;
(Al_2O_3)– содержание оксида алюминия в шлаке, %;
K_{Al}– константа равновесия реакции;
$a_{Al_2O_3}$ – активность (Al_2O_3) в шлаке;
a_{Al} – активность алюминия в металле;
a_O – активность кислорода в металле;
f_{Al} – коэффициент активности алюминия в металле;
f_O – коэффициент активности кислорода в металле;
T - температура металла, К.

На таблице 4 представлен параметр взаимодействия первого порядка при 1873 К для расчета активности алюминия и кислорода в металле.

Таблица 4

Параметр взаимодействия первого порядка e_i^R в железе при 1873 К [12]

Элемент i	Элемент R					
	C	Si	Mn	Al	S	P
Al	0,091	0,0056	0	0,045	0,03	0
O	-0,45	-0,131	-0,021	-3,90	-0,133	0,07

По формуле (3) вычислим коэффициент активности алюминия в стали при температуре 1873 К.

$$lgf_{Al} = \sum(e_{Al}^R \cdot [R]) \quad (3)$$

где: e_{Al}^R – параметр взаимодействия первого порядка;
$[R]$ – содержания элементов в металле, %.

$$lgf_{Al} = 0,091 \cdot 0,214 + 0,0056 \cdot 0,356 + 0 \cdot 1,157 + 0,045 \cdot 0,042 + 0,03 \cdot 0,02 + 0 \cdot 0,023 = 0,024$$

По формуле (4) вычислим коэффициент активности алюминия в стали при температуре Т = 1923 К.

$$lgf_{Al}^T = \frac{1873}{T} \cdot lgf_{Al} \quad (4)$$

$$lgf_{Al}^{1923} = \frac{1873}{1923} \cdot 0,024 = 0,0234$$

По формуле (5) вычислим коэффициент активности кислорода в стали при температуре 1873.

$$lgf_O = \sum(e_O^R \cdot [R]) \quad (5)$$

где: e_O^R – параметр взаимодействия первого порядка;
$[R]$ – содержания элементов в металле, %.

$$lgf_O = -0,45 \cdot 0,214 + (-0,131) \cdot 0,356 + (-0,021) \cdot 1,157 + (-3,90) \cdot 0,042 + (-0,133) \cdot 0,02 + 0,07 \cdot 0,023 = -0,3321$$

По формуле (6) вычислим коэффициент активности кислорода в стали при температуре Т = 1923 К.

$$lgf_O^T = \frac{1873}{T} \cdot lgf_O \quad (6)$$

$$lgf_O^{1923} = \frac{1873}{1923} \cdot (-0,3321) = -0,3235$$

Вычислим константу равновесия реакции при температуре Т = 1923 К.

$$lgK_{Al} = \frac{62984,38}{1923} - 19,886 = 12,867$$

Тогда, содержание кислорода с участием алюминия в стали равна:

$$lg[O] = \frac{-lgK_{Al} - 2lgf_{Al} - 2\,lg[Al] - 3lgf_O}{3} = \frac{-12,867 - 2 \cdot 0,0234 + 2,753 + 0,9705}{3} = -3,0634$$

$$[O] = 0,00086\%$$

По расчетным данным видно, что конечное содержание кислорода в металле при раскислении алюминием составляет 0,00086%.

В таблице 5 представлен средний химический состав шлака в процессе десульфурации [2].

Таблица 5

Средний химический состав шлака в процессе десульфурации (% масс.) [2]

CaO	SiO_2	FeO	MnO	Al_2O_3	MgO	CaS	CaF_2
57,2	9,7	0,24	0,5	22,7	2,9	1,6	ост.

Процесс десульфурации с использованием алюминия и ТШС можно описать реакцией (7) [2].

$$(CaO)_{тв.} + {}^2/_3\,[Al] + [S] = (CaS)_{тв.} + {}^1/_3\,(Al_2O_3)_{тв.} \quad (7)$$

Константа равновесия реакции (7) имеет вид:

$$K = \frac{a_{(CaS)} \cdot a_{(Al_2O_3)}^{\frac{1}{3}}}{a_{(CaO)} \cdot a_{[Al]}^{\frac{2}{3}} \cdot a_{[S]}} \quad (8)$$

где $a_{(CaS)}, a_{Al_2O_3}, a_{(CaO)}$ – активность (CaS), (Al_2O_3) и (CaO) в шлаке;
$a_{[Al]}$ – активность алюминия в металле;
$a_{[S]}$ – активность серы в металле.

Равновесный коэффициент распределения серы между металлом и шлаком L_S, характеризующий полноту десульфурации, можно выразить эмпирическим уравнением (9) [13]:

$$lgL_s = -2,78 + 0,86 \cdot \frac{(\%CaO) + 0,05 \cdot (\%MgO)}{(\%SiO_2) + 0,6 \cdot (\%Al_2O_3)} - lga_{[O]} + lgf_S \quad (9)$$

где L_S– коэффициент распределения серы между металлом и шлаком;
(CaO), (MgO), (SiO_2) и (Al_2O_3) – содержание оксидов в шлаке, % масс;
a_O – активность кислорода в металле;
f_S – коэффициент активности серы в металле.

Зная L_S можно найти конечное содержание серы в металле [S] и шлаке (S). Для этого необходимо составить и решить систему уравнений (10) и (11) [13].

$$\begin{cases} m_м[S]_0 + m_ш(S)_0 = m_м[S] + m_ш(S) & (10) \\ L_S = \dfrac{(S)}{[S]} & (11) \end{cases}$$

где $m_м$ и $m_ш$ – масса металла и шлака, кг;
$[S]_0$ и $(S)_0$ – начальные содержания серы в стали и шлаке, %;
[S] и (S) – конечные содержания серы в стали и

https://doi.org/10.56143/2181-2438-2025-1-220-227 Research, Innovation, Results

шлаке, %.

Если параметры $m_м$ и $m_ш$ не изменяются, то, решив систему уравнений (10) и (11) можно получить формулу (12) для вычисления конечного содержания серы.

$$[S] = \frac{100[S]_0 + \lambda \cdot (S)_0}{100 + \lambda \cdot L_S} \qquad (12)$$

где $\lambda = m_ш/m_м$ - кратность шлака, %.

По формуле (13) вычислим коэффициент активности серы в стали при температуре 1923 К.

$$lgf_S^T = \frac{1873}{T} \cdot \sum (e_S^R \cdot [R]) \qquad (13)$$

где: e_S^R – параметр взаимодействия первого порядка;

$[R]$ – содержания элементов в металле, %.

На таблице 6 представлен параметр взаимодействия первого порядка при 1873 К для расчета коэффициента активности серы в металле.

Таблица 6

Параметр взаимодействия первого порядка e_i^R в железе при 1873 К [12]

Элемент i	Элемент R					
	C	Si	Mn	Al	S	P
S	0,11	0,063	-0,026	0,035	-0,028	0,29

$$lgf_S^{1923} = \frac{1873}{1923} \cdot (0{,}11 \cdot 0{,}214 + 0{,}063 \cdot 0{,}356 + +(-0{,}026) \cdot 1{,}157 + 0{,}035 \cdot 0{,}042 + (-0{,}028) \cdot 0{,}020 + +0{,}29 \cdot 0{,}023 = 0{,}0229$$

Активность кислорода при 1923 К вычисляется по формуле (14).

$$lga_O^{1923} = lgf_O^{1923} + lg[O] \qquad (14)$$

$$lga_O^{1923} = -0{,}3235 + (-3{,}0634) = -3{,}3869$$

Определяем коэффициент распределения серы между металлом и шлаком по уравнению (9).

$$lgL_s = -2{,}78 + 0{,}86 \cdot \frac{57{,}2 + 0{,}05 \cdot 2{,}9}{9{,}7 + 0{,}6 \cdot 22{,}7} - (-3{,}3869) + 0{,}0229 = 2{,}7446$$

$$L_s = 555{,}4$$

Вычислим конечную концентрацию серы в металле по уравнению (12). Принимаем кратность шлака $\lambda = 3\%$ в количестве массы шлака 180 кг и массы металла 6000 кг. Начальное содержание серы в шлаке $(S)_0 = 0$.

$$[S] = \frac{100 \cdot 0{,}037 + 3 \cdot 0}{100 + 3 \cdot 555{,}4} = 0{,}0021\%$$

Степень десульфурации рассчитываем по формуле (15).

$$\eta = \frac{[S]_0 - [S]}{[S]_0} \cdot 100\% \qquad (15)$$

$$\eta_S^{\text{расч.}} = \frac{0{,}037 - 0{,}0021}{0{,}037} \cdot 100\% = 94{,}32\%$$

$$\eta_S^{\text{факт.}} = \frac{0{,}037 - 0{,}020}{0{,}037} \cdot 100\% = 45{,}95\%$$

3. Результаты исследования

На рисунке 4 представлена зависимость конечного содержания серы от основности и кратности шлака.

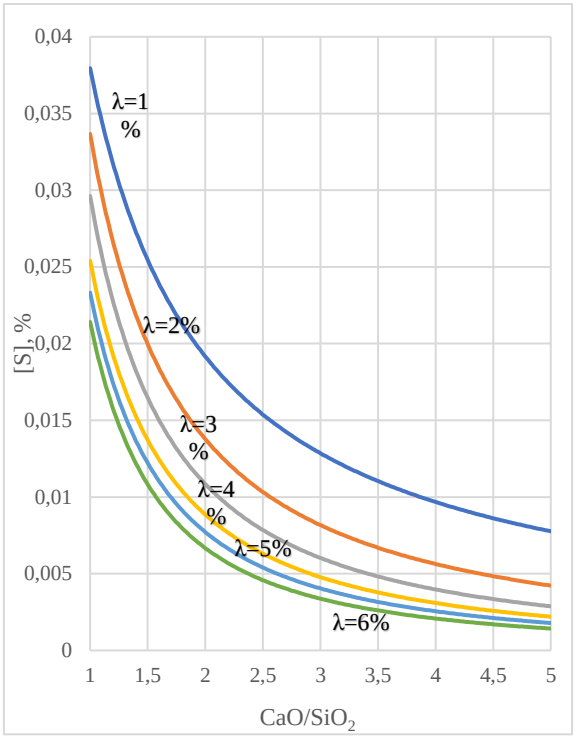

Рис. 4. Зависимость конечного содержания серы от основности и кратности шлака (расчетные данные)

Из рисунка видно, что с увеличением основности шлака содержание серы уменьшается. Также, кратность шлака значительно влияет на удаление серы. Например, если при кратности шлака, равной единице и в интервале основности от 1 до 5, концентрация серы меняется от 0,037% до 0,008%.

Применение кальцийсодержащих материалов получило большое распространение. Кальций является хорошим раскислителем и десульфуратором, а также влияет на вид, форму и распределение неметаллических включений. На процесс десульфурации существенно влияют шлаки с составом CaO – 50-70%, SiO_2 – 5-10%, Al_2O_3 – 20-30%, MgO – 4-8%.

Для уменьшения вязкости восстановительного шлака в металл добавляют плавиковый шпат. Применение плавикового шпата позволяет разжижать шлак без уменьшения его основности, что способствует удаление серы [14].

Присадка плавикового шпата обеспечивает глубокую десульфурацию вследствие увеличения жидкоподвижности шлака. Для наведения шлака используют твердую шлаковую смесь (ТШС) извести и плавикового шпата в соотношении 3:1 или 4:1 [7].

Конечное содержание серы зависит от его содержания в шлаке. С уменьшением содержания серы в шлаке за счет обновления шлака приводит к снижению концентрации серы в расплаве [7].

Следовательно, непременным условием получения стали с особо низким содержанием серы является не только формирование высокоосновного шлака с низким содержанием FeO и высокой жидкоподвижностью, но и глубокое раскисление металла [7].

На рисунке 5 представлена зависимость степени десульфурации от остаточного содержания алюминия.

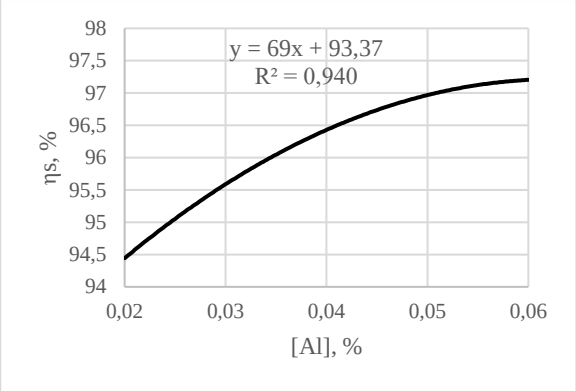

Рис. 5. Зависимость степени десульфурации от остаточного содержания алюминия (расчетные данные)

Из рисунка видно, что при раскислении алюминием активность кислорода в стали уменьшается, так как алюминий обеспечивает глубокую десульфурацию и степень десульфурации достигает до 97,5%.

На рисунке 6 представлена зависимость степени десульфурации от остаточного содержания алюминия в металле.

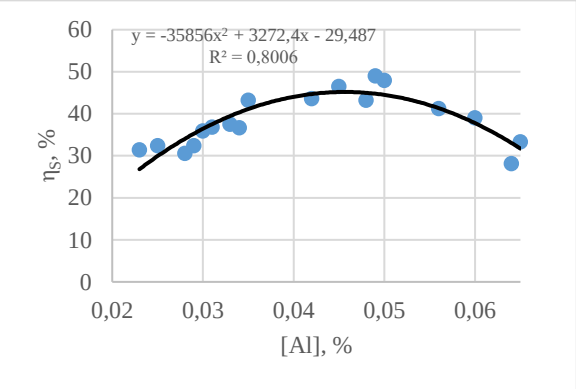

Рис. 6. Зависимость степени десульфурации от остаточного содержания алюминия (фактические данные)

Из рисунка 6 видно, что с увеличением содержания алюминия уменьшается содержание кислорода в стали и повышается степень десульфурации. При раскислении алюминием в интервале 0,035-0,055%, алюминий значительно влияет на степень десульфурации и составляет около 45%.

При добавлении алюминия в верхних пределах, указанных по нормативным документам ухудшается процесс десульфурации, что обусловлено с увеличением Al_2O_3 в шлаке, по мере уменьшения CaO [7].

Такое различие между расчетным и экспериментальным результатами в степени десульфурации может быть связано с высокой окисленностью системы, т.е. низкой раскисленностью металла, которое требует больше расхода раскислителей или более сильные раскислителей. Также может быть связано с интенсивностью перемешивания, недостаточной продолжительностью скачивания шлака и неоптимальным составом восстановительного шлака.

На рисунке 7 показано изменение содержания серы во время плавки.

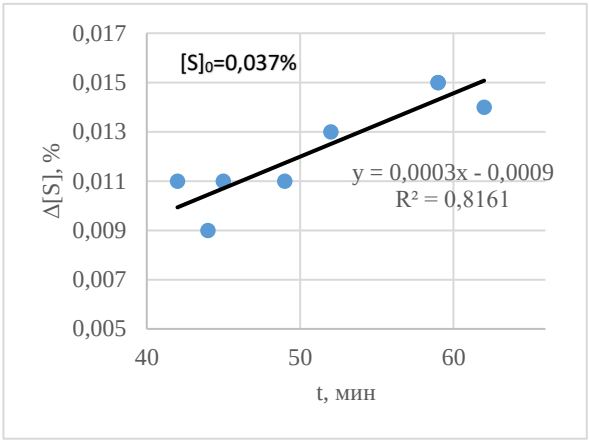

Рис. 7. Изменение содержания серы во время плавки (фактические данные)

Получены фактические данные из промышленных плавок. Из этих данных видно, что на некоторых плавках сера уменьшается до 0,017%. Во время процесса десульфурации содержание серы уменьшается от 0,037% до 0,020%.

Для проведения процесса десульфурации в ИТП полностью снимали окислительный шлак в количестве 180-200 кг и отбирали пробу металла для экспресс-анализа. Затем включали печь на мощность 2000 кВт, раскисляли металл кремнием, марганцем и алюминием. Три раза по равным порциям наводили ТШС на основе извести – 80-100 кг и плавикового шпата – 15-20 кг, в течение 25 минут перемешивая жидкую ванну металлическим прутком, затем отбирали вторую пробу для анализа [15].

Температура выпуска металла из печи в ковш 1650 °С. По достижению этой температуры печь переходит на режим термостатирования, выдерживая заданную температуру в течение 15 минут. Пробу металла отбирали после 15 минут.

На рисунке 8 представлено среднее изменение серы во время десульфурации металла.

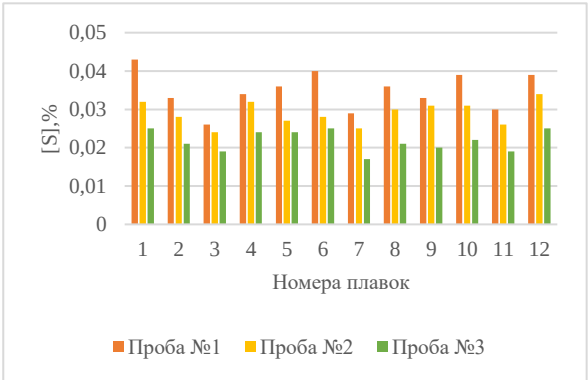

Рис. 8. Среднее изменение серы во время десульфурации металла (фактические данные)

Так как, чем больше времени продолжительности процесса, тем лучшее удаляется сера. В течение 45 минут удаляется 0,010% серы. С увеличением продолжительности обработки стали улучшается процесс десульфурации и после 60 минут удаление серы составляет 0,015%.

Процесс раскисления, удаления продуктов раскисления проводятся значительно быстрее вследствие интенсивного движения расплава в

индукционных печах, что требуется немного времени. Также возможно проводить десульфурацию в индукционной печи при скачивании и наведении восстановительного шлака несколько раз, с увеличением плавикового шпата в шлакообразующих смесях. Это вызывает уменьшение стойкости футеровки и увеличение длительности плавки [14].

Кроме того, во время восстановительного периода высокая температура металла и шлака, низкая окисленность создают благоприятные условия для насыщения металла азотом. А также футеровка печи сильно изнашивается при длительной выдержке. Поэтому необходимо проводить восстановительный период за наименьшее время. Состав металла по кислороду, сере позволяет сократить время на технологические операции по раскислению, десульфурации и легированию [16].

4. Заключение

Проведены расчеты по десульфурации и получены экспериментальные данные плавок стали 20ГЛ и было анализировано различие между расчетным и экспериментальным данными степени десульфурации.

Расчетным путем показано, что степень десульфурации достигает до 97,5%. Однако, на практике сера удаляется 45%. На степень десульфурации влияет окисленность системы, так как при раскислении алюминием в пределах 0,035-0,055%, степень десульфурации составляет около 45%. Экспериментально показано что, чем больше времени продолжительности десульфурации, тем выше степень удаления серы. В течение 45 минут удаляется 0,010% серы. Длительная выдержка обработки стали позволяет улучшать процесс десульфурации и после 60 минут удаление серы составляет 0,015%. Также, расчетами показано, что кратность шлака значительно влияет на удаление серы. Например, если при кратности шлака, равной единице и в интервале основности от 1 до 5, содержание серы меняется от 0,037% до 0,008%. На практике, при обработке стали ТШС, содержание серы уменьшается от 0,037% до 0,020%.

На основе этого сделан вывод, что процесс десульфурации возможно связан с недостаточным раскислением сильными ракислителями, меньшим количеством шлакообразующих смесей, малым количеством шлака, недостаточной продолжительностью скачивания шлака и низкой интенсивностью перемешивания металла и шлака. В связи с этим, рекомендуется использование сильных раскислителей, комплексное раскисление, увеличение количества шлака и продолжительности скачивания шлака, формирование оптимального состава шлака, применение больше твердых шлаковых смесей, обработка металла сплавами щелочноземельных металлов, а также различные методы перемешивания металла

Использованная литература / References

[1] Брылова Т. Б. Оценка влияния ликвации на трещинообразование боковых рам из стали 20ГЛ: Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием в трех частях. Часть 3 / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2015. 254 с.

[2] 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.

[3] Чистая сталь. Гуляев А.П., «Металлургия», 1975. 184 с.

[4] В.Г. Бабкин, А.В. Добрынина. Микролегирование алюминием конструкционных низколегированных сталей с целью повышения хладостойкости отливок. Красноярский государственный технический университет. Литье и металлургия. 2002. № 4.

[5] Сера и фосфор в стали/ Лунев В.В., Аверин В.В. – Металлургия, 1988. 256 с.

[6] Дурынин В.А., Солнцев Ю.П. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения. – СП6.: ХИМИЗДАТ, 2006. – 272 с.: ил. ISBN 5-93808-127-0

[7] Н.А. Смирнов. Внепечная обработка при производстве стали с особонизким содержанием серы. Труды восьмого конгресса сталеплавильщиков (г. Нижний Тагил, 18-22 октября 2004 г.). Москва – 2005. С. 376 – 383.

[8] Мурысев В.А., Сомов С.А., Ботников С.А. Совершенствование шлакового режима в ковше для марок сталей раскисленных алюминием. Сборник трудов. Москва – Электросталь. 2016 г. С. 414 – 418.

[9] Артамонов А.В., Гаркави М.С., Колодежная Е.В., Бигеев В.А., Писчаскина А.В. Применение флюидизированной извести центробежно-ударного измельчения для ковшевой десульфурации металла. Сборник трудов. Москва – Электросталь. 2016 г. С. 400 – 404.

[10] Голубцов В.А., Лунев В.В. Модифицирование стали для отливок и слитков. – Челябинск-Запорожье: ЗНТУ, 2009. -356 с.

[11] А.Д. Лопатенко, С.А. Ботников, А.Е. Семин. Исследование процессов рафинирования при производстве трубной стали с целью повышения качества готового изделия. Сборник трудов. Москва – Электросталь. 2016 г. С. 490 – 493.

[12] 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.

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

[14] Электрометаллургия стали и ферросплавов. Поволоцкий Д.Я., Рощин В.Е., Рысс М.А., Строганов А.И., Ярцев М.А. – Учебник для вузов. Изд. 2-е, переработ. и доп. – М.: Металлургия, 1984 г. 568 с.

[15] 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.

[16] Е.М. Ребиков, Д.Г. Еланский. Поведение ряда элементов металла при выплавке стали в дуговой печи постоянного тока литейного производства. Сборник трудов. Москва – Электросталь. 2016 г. С. 112 – 117.

Информация об авторах/ Information about the authors

Турсунов Нодиржон Каюмжонович / Tursunov Nodirjon Qayumjonovich	Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра “Машиностроения и материаловедения”, профессор, к.т.н. E-mail: u_nadir@mail.ru Тел.: +998712990169 https://orcid.org/0009-0008-7910-3980
Саидирахимов Азизжон Азим угли / Saidirakhimov Azizjon Azim ugli	Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра “Машиностроения и материаловедения”, докторант E-mail: azizsaidrahimov94@gmail.com Тел.: +998904052928 https://orcid.org/0009-0004-1440-7458

CONTEXT / MUNDARIJA

N. Tursunov, A. Saidirakhimov
Theoretical and experimental studies of the process of metal desulfurization using solid slag mixtures during the smelting of 20GL steel in an induction crucible furnace……..…….220

S. Absattarov, N. Tursunov
Analysis of the results of an integrated assessment of working conditions for tank car washing workers (using the example of the Altyaryk wagon washing enterprise of "Uzbekistan railways" joint-stock company).……228

M. Aliev, G. Talipova, R. Aliev
Method for calculating the coefficients of intelligent sensors of automation in transport……..……232