Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

Посвящается 100-летию
со дня рождения ректора СМИ,
доктора технических наук,
профессора Н.В.Толстогузова

МЕТАЛЛУРГИЯ: ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО

«Металлургия – 2021»

Труды
XXII Международной научно-практической конференции

10 – 11ноября 2021 г.

Часть 1

Новокузнецк
2021

УДК 669(06)+658.012.056(06)
М 540

Редакционная коллегия
д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор Н.А. Козырев, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, к.т.н. Е.Н. Темлянцева,
д.т.н., доцент В.В. Зимин, д.т.н., профессор А.Г. Никитин,
к.э.н., доцент Ю.С. Климашина

М 540 Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XXII Международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 1 / под ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2021. – 326 с. : ил.

ISSN 2542-1670

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и наукоемким технологиям металлургических процессов, обработки металлических материалов: литейное производство, обработка давлением, термическая обработка.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Администрация Правительства Кузбасса

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

АО «Русал-Новокузнецк»

АО «Кузнецкие ферросплавы»

АО «НЗРМК им. Н.Е. Крюкова»

Ляонинский университет науки и технологии, г. Аньшань, КНР

ОАО «Черметинформация»

Издательство Сибирского отделения РАН

Журнал «Известия вузов. Черная металлургия»

Журнал «Вестник СибГИУ»

Журнал «MATEC Web of Conferences »

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

АО «Кузбасский технопарк»

Западно – Сибирское отделение Российской Академии естественных наук

Совет молодых ученых Кузбасса

ISSN 2542-1670

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2021

УДК 669.184.15

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ДОЖИГАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В ПОЛОСТИ 160-ТОННОГО КОНВЕРТЕРА АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Протопопов Е.В., Солоненко В.В., Темлянцев М.В., Якушевич Н.Ф., Полях О.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, Protopopov@sibsiu.ru

Аннотация. *Выполнены термодинамические расчеты, позволяющие оценить эффективность развития процесса дожигания отходящих газов при использовании двухъярусных фурм.*

Ключевые слова: *кислород, конвертер, газ, монооксид углерода, сопло.*

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF AFTERBURNING OF EXHAUST GASES IN THE CAVITY OF A 160-TON CONVERTER OF JSC "EVRAZ ZSMK"

Protopopov E.V., Solonenko V.V., Temlyantsev M.V., Yakushevich N.F., Poljah O.A.

Siberian state industrial university, Novokuznetsk, Russia, e-mail: Protopopov@sibsiu.ru

Abstract. *Thermodynamic calculations were performed to assess the efficiency of the development of the process of afterburning of exhaust gases when using two-tier tuyeres.*

Keywords: *oxygen, converter, gas, carbon monoxide, nozzle.*

В соответствии с полученной информацией [1] при продувке конвертерной ванны эффективность развития процесса дожигания CO до CO_2 при высокотемпературном моделировании, как правило, определяется косвенно по результатам расчетов показателя степени дожигания:

$$K = \frac{CO_2}{CO + CO_2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где CO и CO_2 – содержание оксида и диоксида углерода в отходящих газах, %.

Для условий эксплуатации 160-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК» выполнены расчеты, позволяющие оценить эффективность развития процесса дожигания при использовании разработанных ранее конструкций двухъярусных фурм и схем подачи технологических газов. Установлено, что для данных условий степень дожигания зависит от количества кислорода, подаваемого через сопла верхнего яруса, диаметра и угла наклона их к вертикальной оси фурмы, степени и скорости смешения низкоскоростных струй кислорода с газовой фазой в полости конвертера, количества и скорости поступления CO в зону дожигания. Полнота протекания реакции дожигания, в свою очередь будет определяться временем пребывания реагентов в реакционной зоне, постоянно изменяющейся по составу и положению в объеме ванны, и непосредственно скорости обезуглероживания, зависящей от термодинамических параметров (температура, состав газовой фазы и т. д.).

При глубине металлической ванны ~1,5 м, диаметре агрегата 5,4 м, толщине слоя вспененного шлака ~2 м, плотности шлака 0,54 т/м^3, объем газов, заполняющих полость конвертера до среза горловины составляет ~50 – 60 м^3 . Время заполнения отходящим газом полости конвертера изменяется от 3-х секунд в период максимального образования монооксида углерода (8 – 15 минуты продувки) до 20 секунд в начале и конце операции. При неполном дожигании {CO}, а также при значительном избытке кислорода в полости агрегата, количество газов и линейная скорость отходящего газового потока, проходящего через сечение

конвертера, существенно возрастают ($\vartheta \approx (0{,}1 \div 1)$ м/с). Основной процесс дожигания CO описывается реакцией:

$$CO + ½\, O_2 = CO \qquad (2)$$

$$\Delta G^0_{(1)} = -556000 + 169T, \frac{Дж}{моль} O_2; lgK_{(2)} = \frac{29000}{T} - 8{,}84;\ K_{(2)} = \frac{P^2_{CO_2}}{P^2_{CO} \cdot P_{O_2}}, \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = K^{½}_{(2)} \cdot P^{½}_{O_2}$$

При $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1, P_{O_2} = \frac{1}{K_{(2)}}$. При 1873 K $lgK_{(2)} = 6{,}68, P_{O_2} = 2{,}1 \cdot 10^{-7}$, при 2073 K $lgK_{(2)} = 5{,}16, P_{O_2} = 6{,}02 \cdot 10^{-6}$.

Изменения значений $\Delta G^0_{(2)} = f(T)$ при $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1$, рассчитанные по результатам работы [2], значения $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ для соотношений $\frac{Q^{доп}_{O_2}}{Q^{общ}_{O_2}}$=10% и 20% представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1 - Изменение температуры горения и состава газовой фазы в зависимости от расхода кислорода для дожигания

Параметр	Расход кислорода для дожигания									
	$\frac{Q_{O_2\,доп.} \cdot 100}{Q_{O_2\,общ.}}$ =10%					$\frac{Q_{O_2\,доп.} \cdot 100}{Q_{O_2\,общ.}}$ =20%				
	O_2 доп., %					O_2 доп., %				
	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
t, °C	1560	1750	1900	1950	2100	1570	1940	2070	2300	2550
$\frac{CO_2}{CO + CO_2}$, %		13	16	18	20		16	19,5	21,5	23,2
$\frac{CO_2}{CO}$		0,17	0,19	0,22	0,25		0,19	0,25	0,285	0,31
P_{O_2}		$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$		$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$

Как видно, при $\frac{Q^{доп}_{O_2}}{Q^{общ}_{O_2}} = 10\%$ в интервале температур 1750 – 2100 °C $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 0{,}17 \div 0{,}25$; при температурах 1940 – 2550 °C $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 0{,}19 \div 0{,}31$; то есть значительно меньше, чем равновесное, соответствующее для стехиометрического соотношения по реакции (2) $\left(\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1\right)$. При 1750 °C равновесное значение $P_{O_2} \approx 5 \cdot 10^{-9}$, при 1940 °C $P_{O_2} \approx 6 \cdot 10^{-7}$ и далее возрастает по мере повышения температур.

Использование новых конструктивных и технологических решений по конструкции фурмы оптимальная высота расположения сопел второго яруса, использование разноимпульсных струй кислорода, подаваемых для дожигания CO, изменение угла наклона сопел, расхода газа на дожигание и т. д.) позволяет довести показатель дожигания (1) до 0,44 ÷ 0,5, что практически соответствует стехиометрическому соотношению реакции (2) – $\left(\frac{CO_2}{CO} = 1\right)$; P_{O_2} = (1600 ÷ 1800 °C) $\approx 1 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-5}$.

Как уже отмечалось, более полное дожигание CO до CO_2 с получением сверхравновесных концентраций CO_2 по отношению к реакции (2) (CO_2/CO = 1) возможно в присутствии в газовой фазе достаточно высоких концентраций свободного кислорода, например при $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 10\ (\sim 90\%\ CO)$, т. е. при $P_{O_2} = 0{,}001$.

Для экзотермической реакции (2) изменение энтальпии $\Delta H_{(2)} = 2\Delta H_{CO2} - 2\Delta H_{CO} + (H_T - H_{298})O_2$ при температурах 1600 – 1800 °C составляет ~500 кДж/моль O_2, при этом доля тепла на нагрев кислорода, подаваемого для дожигания, составляет 12 – 14 % (разница значений изменения энтальпий $\Delta H(2)$ и $\Delta H_{(2CO_2 - 2CO)}$ на рисунке 1.

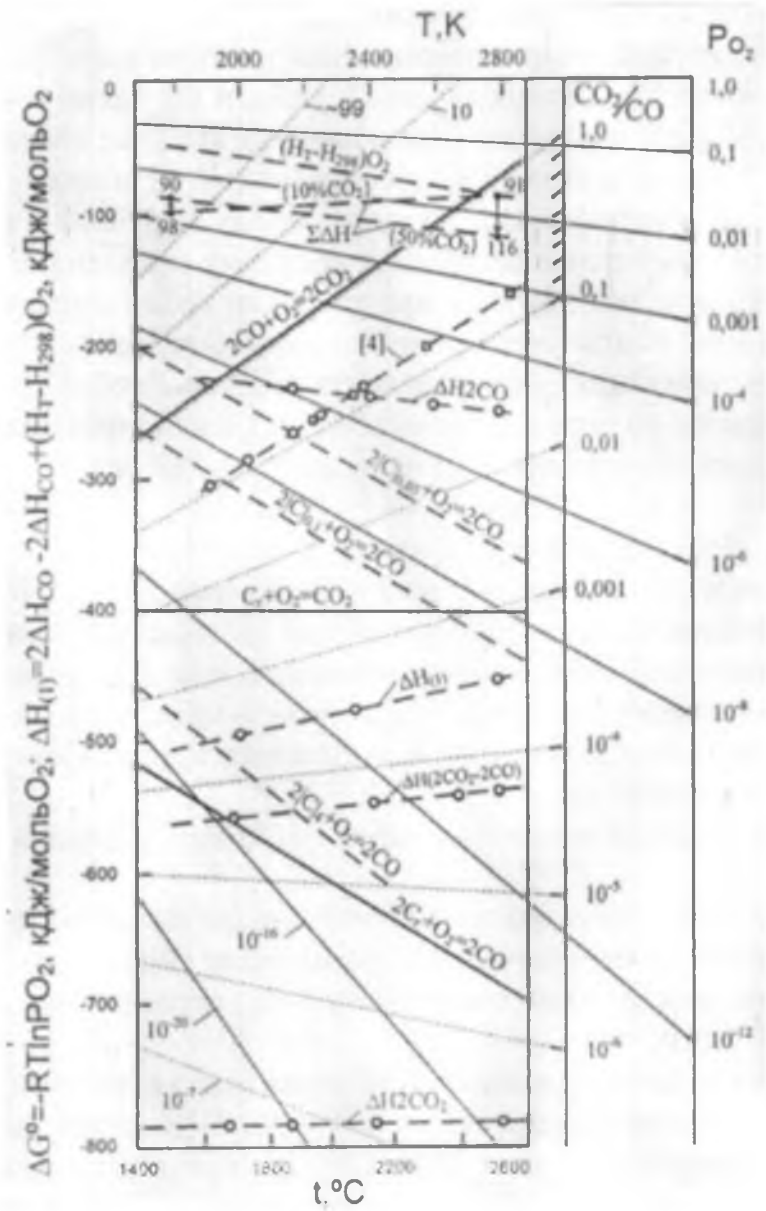

Рисунок 1 – Равновесные составы, энергия Гиббса, тепловые эффекты реакций в системе С – О. В соответствии с [2] – расчет дожигания СО до CO_2 при $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}}$ =10% (- о -) и 20% (- о -); нижний индекс при содержании углерода [С] ($|C|_4$; $|C|_{0,1}$) – содержание углерода в металле, % масс.

Совершенно очевидно, что значительный избыток кислорода по отношению к равновесным концентрациям нежелателен и его подача должна соответствовать объему образующегося монооксида углерода, поступающего в полость конвертера из объема ванны.

Результаты расчета количества кислорода, необходимого для дожигания СО приведены в таблице 2 и на рисунке 2.

Всего за плавку образуется монооксида углерода 59000 м^3 (в среднем за 20 мин продувки V_{CO} = 2360 м^3/мин), тогда необходимо подать кислорода для дожигания монооксида углерода 37700 м^3 (в среднем за 20 мин продувки V_{O_2} = 1508 м^3/мин).

Как видно, в процессе продувки окисление углерода и, соответственно, скорость образования монооксида углерода и количество кислорода, необходимое для окисления, значительно меньше, чем при постоянной интенсивности подачи кислорода для дожигания, что обуславливает неравновесные условия протекания реакции (2).

Таблица 2 - Параметры продувки ванны 160-т конвертера

Время продувки, мин	Содержание углерода в металле, $\frac{\%\ масс.}{кг}$	Угар углерода за 5 мин, кг	Скорость окисления углерода		Образуется монооксида углерода		Необходимое количество кислорода для дожигания монооксида углерода, $\frac{м^3}{мин}$	Избыток кислорода при расходе 500, $\frac{м^3}{мин}$, $\frac{м^3}{мин}$	Выделение тепла от дожигания CO до CO_2 на 160 т стали, $\frac{кДж}{мин} \cdot 10^6$	
			$\frac{кг}{мин}$	$\frac{\%\ C}{мин}$	$\frac{кг}{мин}$	$\frac{м^3}{мин}$			1879 К	2073 К
0	$\frac{4}{6400}$	800	160	0,1	373,3	298,6	170,6	330	3,33	3,32
5	$\frac{3,5}{5600}$	2080	416	0,24	970,7	776,5	443,7	56	8,67	8,407
10	$\frac{2,3}{3520}$	1600	320	0,22	746,6	597,3	341,3	159	6,67	6,47
15	$\frac{1,2}{1920}$	1280	256	0,16	597,3	477,8	273	227	5,34	5,176
20	$\frac{0,4}{640}$	480	96	0,06	224,0	179,2	102,4	400	2,0	1,94
25	$\frac{0,1}{160}$	80	16	0,02	37,3	29,8	17,0	> 400	0,4	~ 0,4

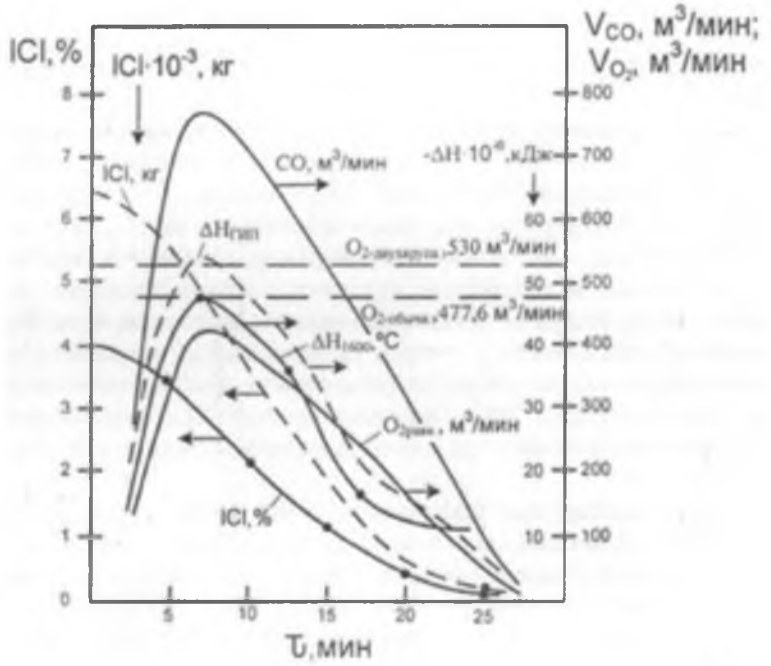

Рисунок 2 – Изменение концентрации углерода в металле |C|, % |C|-10^{-3}, кг по ходу продувки; скорости образования монооксида углерода – V_{CO}, м^3/мин и необходимое для дожигания CO кислорода, м^3/мин; теплового эффекта от реакции (2) дожигания CO до CO_2 ($-\Delta H_{1873K} \cdot 10^{-6}$ кДж на 160 т стали) и гипотетического (($\Delta H_{гип}$) – с учетом предварительного нагрева кислорода

Только при высокой скорости обезуглероживания в период продувки с 5 по 15 минуту кислорода для дожигания CO обычно подается в 1,5 ÷ 2 раза больше расчетного (~ 533 $м^3$/мин) при необходимых и достаточных для реакции (2) 300 ÷ 400 $м^3$/мин. Причем при дальнейшей продувке на заключительном этапе операции кислорода вводится еще больше – в 3–5 раз больше необходимого.

Такое избыточное количество кислорода, подаваемое для дожигания отходящих газов, будет приводить к повышенному износу верхних горизонтов футеровки агрегата, что зафиксировано ранее [3]. Необходимо также учитывать, что плотность потока монооксида углерода, выходящего из реакционных зон и заполняющего полость конвертера (ПК), составляет ≈ 100 $м^3$ и изменяется от 3,0 ÷ 4,0 $м^3$ CO/$м^3$ (ПК) в начале продувки до 7 ÷ 8 $м^3$ CO/$м^3$ (ПК) на 7 ÷ 8 минутах, т. е. при интенсивном обезуглероживании, и далее снижается до 0,3 ÷ 4 $м^3$ CO/$м^3$ (ПК) на заключительном этапе.

Очевидно, такая динамика взаимодействия низкоскоростных кислородных струй для дожигания с изменяющимся по плотности потоком отходящих газов должна быть обязательно учтена в дутьевом режиме плавки в течение всей операции, поскольку механизм их смешения может значительно отличаться в более плотном потоке и таковом для разреженных газов.

Линейная скорость прохождения отходящих газов в рабочем пространстве конвертера изменяется в пределах от 0,17 м/с (пятая минута продувки) до 0,43 м/с (восьмая минута), понижаясь далее до ~0,1 м/с в конце плавки. То есть время пребывания образующихся газов в полости конвертера на участке движения газов составляет от 0,2 ÷ 0,3 до 0,8 ÷1,3 секунды. При таких скоростях движения отходящих газов обеспечить хорошее перемешивание компонентов газовой фазы и эффективное дожигание монооксида углерода достаточно сложно, что предопределяет необходимость использования дополнительных технических решений по ходу операции.

Таким образом, рациональный вариант организации продувки конвертерной ванны с дожиганием монооксида углерода в полости конвертера заключается в регулируемой подаче кислорода через сопла верхнего яруса и создании специальных условий для протекания реакции (2) с максимально возможными скоростями. Например, к таким условиям можно отнести технические решения, обеспечивающие низкую скорость истечения газовых струй для дожигания, сопоставимую со скоростью движения факелов горения, в том числе использование различных профилей сопел для дожигания, варьирование углов их наклона к вертикальной оси вплоть до направления вверх и вниз по стволу фурмы для увеличения пути и времени прохождения смешивающихся потоков газа.

Таблица 3 - Изменение энтальпии компонентов газовой фазы и реакции (2)

ΔH, кДж/моль	T, K				$H_{2800} - H_{1800}$
	1800	2000	2400	2800	
$\Delta H_{(2)}$	-505	-496	-476	-456	
$H_{(T)}$- $H_{(298)}$:					
O_2	51,7	59,2	74,5	90,1	
N_2	49	56	70,7	81,7	
CO	50,2	56,5	70,7	83,7	33,5
CO_2	49,5	92	118	146,4	66,9

В таблице 3 приведены дополнительно справочные данные по изменению энтальпии реакции (2) и компонентов газовой фазы при температурах 1800 – 2800 К. Как видно (табл. 3), значения ($H_T - H_{298}$) для O_2, N_2 и CO отличаются незначительно: при 1800 К соответственно 51,7; 48,95 и 50,2 кДж/моль; при 2800 К – 90,1; 81,7 и 83,68 кДж/моль; независимо от изменения состава газовой фазы можно принимать одинаковые усредненные значения: для 1800 К $H_{1800} - H_{298}$ ≈ 50 кДж/моль, для 2800 К $H_T - H_{298}$ ≈ 86 кДж/моль.

Несколько большие значения изменения энтальпии для CO_2. Так, при 1800 К это значения ($H_{1800} - H_{298}$) co_2 ≈ 79,5 кДж/моль; при 2800 К – 146,4 кДж/моль, поэтому чем больше сте-

пень дожигания CO до CO_2 и, соответственно, чем выше концентрация CO_2 в газовой фазе, тем больше затраты тепла на нагрев газовой фазы. При изменении содержания CO_2 в газовой фазе от 10 до 50 % составляет 1 – 1,3 % от ΔH_{1800} реакции (2), что соответствует возможному повышению температуры от $T_{нач}$ = 1800 до 2000 К и от $T_{нач}$ = 2000 до 2170 К (таблица 3).

Выполнен термодинамический анализ процесса дожигания монооксида углерода в полости 160-т конвертера. Показано, что при вдувании кислорода через сопла второго яруса в количестве от 10 до 20 % от общего расхода кислорода не обеспечивает достаточно полное дожигание и окисление монооксида углерода. Лимитирующими факторами являются резкое снижение количества CO, в отдельные периоды продувки металла, избыточный расход кислорода, подаваемого для дожигания CO, приводящий к образованию жестких высокоскоростных струй, плохо перемешивающихся с газовым отходящим потоком; высоких скоростей прохождения отходящего газа через полость конвертера, обуславливающих недостаточное смешение компонентов газовой фазы и низкие скорости реакций. Показано, что при обеспечении условий для дожигания монооксида углерода до соотношения концентраций в газовой фазе $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1$ температура отходящего газа в полости конвертера может возрастать с 1800 до 2000 К.

Библиографический список

1. Протопопов, Е. В. Исследование химических и температурных градиентов в конвертерной ванне с использованием высокотемпературного моделирования / Е. В. Протопопов, А. Г. Чернятевич, С. В. Юдин. – Изв. вузов. Черная металлургия, 1997. – № 10. – С. 20 – 24.

2. Жульковский, О. А. Численное исследование процесса дожигания отходящих газов в конвертере / О. А. Жульковский, А. Г. Чернятевич, А. В. Гресс. – Изв. вузов. Черная металлругия, 1993. – № 1. – С. 19 – 22.

3. Смоктий, В. В. Комбинированные процессы выплавки стали в конвертерах / В. В. Смоктий, В. В. Лапицкий, Э. С. Белокуров. – Киев : Техника. – 163 с.

УДК 669.187.28.539.55

МЕЖФАЗНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕРИЯ МЕЖДУ ШЛАКОМ СИСТЕМЫ CAO-SIO2-CE2O3-15%AL2O3-8%MGO И НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫМ МЕТАЛЛОМ

Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Уполовникова А.Г.

Институт металлургии УрО РАН
г. Екатеринбург, Россия, upol.ru@mail.ru

Аннотация. *Представлены результаты термодинамического моделирования межфазного распределения церия между шлаком системы CaO–SiO2–Ce2O3, содержащего 15%Al2O3 и 8%MgO и низкоуглеродистым металлом при температурах 1550 и 1650°С. Теоритическими и экспериментальными исследованиями подтверждена возможность прямого микролегирования стали церием из шлаков, содержащих оксид церия. Показано, что при 4% Ce2O3 в шлаке при выдержке 10 минут в металл переходит до 16 ppm церия.*

Ключевые слова: *сталь, церий, шлак, термодинамическое моделирование, диаграммы состав-свойство.*

INTERPHASE DISTRIBUTION OF CERIUM BETWEEN CAO-SIO2-CE2O3-15%AL2O3- 8%MGO SLAG SYSTEM AND LOW-CARBON METAL

Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G.

Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

СОДЕРЖАНИЕ

ПАМЯТИ НИКОЛАЯ ВАСИЛЬЕВИЧА ТОЛСТОГУЗОВА
Рожихина И.Д. *4*

СЕКЦИЯ 1: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ **9**

ЛЕГИРОВАНИЕ И МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ РАСПЛАВОВ ПРИРОДНЫМИ И ТЕХНОГЕННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ
Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Прошунин И.Е., Голодова М.А., Дмитриенко В.И. *9*

ПОЛУЧЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОГО КОНЦЕНТРАТА ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ РУД КУЗБАССА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИИ В МЕТАЛЛУРГИИ
Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Голодова М.А., Ходосов И.Е. *18*

АНАЛИЗ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
Павлов А.В., Спирин Н.А., Бегинюк В.А., Косаченко И.Е. *26*

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОКУСКОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ 32
Берсенев И.С., Брагин В.В., Солодухин А.А., Поколенко А.Ю., Бардавелидзе Г.Г., Спирин Н.А. *32*

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ НИОБИЙСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ В ЖИДКОЙ СТАЛИ
Жучков В.И., Заякин О.В., Кель И.Н. *37*

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА ПРИ ПРОДУВКЕ НЕЙТРАЛЬНЫЙ ГАЗОМ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛИ
Протопопов Е.В., Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Полях О.А. *42*

ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЯ И ФЕРРОСИЛИЦИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКОЙ И ОБРАЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ
Ёлкин К.С., Рожихина И.Д., Ёлкин Д.К. *46*

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ
Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Коновалов С.В., Воробьев С.В., Семин А.П. *50*

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ НА АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ
Гизатулин Р.А., Лепихов В.С., Шароватых Д.Ю. *54*

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В МЕТАЛЛУРГИИ ЦИНКА
Козлов П.А. *57*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАРГАНЦЕВЫХ СПЛАВОВ ИЗ БЕДНЫХ КАРБОНАТНЫХ И ОКСИДНЫХ РУД В АГРЕГАТЕ СЭР
Рыбенко И.А., Цымбал В.П., Kongoli F. **66**

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВСПЕНИВАНИЯ 350-ТОННОЙ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ НИЗКОМАРГАНЦОВИСТЫХ ЧУГУНОВ АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
Протопопов Е.В., Полях О.А., Чернышева Н.А., Козьминых Р.А. *73*

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАФИНИРОВАНИЯ РАСПЛАВА ПРИ ПРОДУВКЕ НЕЙТРАЛЬНЫМ ГАЗОМ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ
Протопопов Е.В., Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Полях О.А. *78*

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРАТА НА «ЕВРАЗ ЗСМК»
Леонтьев А.С., Рыбенко И.А *82*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ИЗВЕСТНЯКА НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ
Уманский А.А., Козырев Н.А., Жутов С.В., Николаев В.К., Гизатулин Р.А. ***87***

ПОВЕДЕНИЕ МАРГАНЦА В ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ
Гизатулин Р.А., Дмитриенко В.И., Дмитриенко А.В., Носов Ю.Н., Ноздрин И.В. ***92***

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МНОГОСОПЛОВЫХ КИСЛОРОДНЫХ ФУРМ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ДЛЯ 350-ТОННЫХ КОНВЕРТЕРОВ ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»
Протопопов Е.В., Щипанов С.С., Чернышева Н.А., Сафонов С.О. ***95***

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ДУТЬЕВЫХ УСТРОЙСТВ И КОНСТРУКЦИИ ДВУХЪЯРУСНОЙ КИСЛОРОДНОЙ ФУРМЫ ДЛЯ 350-ТОННЫХ КОНВЕРТЕРОВ АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
Протопопов Е.В., Щипанов С.С., Чернышева Н.А., Сафонов С.О. ***101***

РАСЧЕТ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ В КОЛОННОМ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОМ РЕАКТОРЕ
Сеченов П.А., Рыбенко И.А., Roos K. ***107***

ИЗУЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПЛАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ В ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОМ РАСПЛАВЕ
Заякин О.В., Ренёв Д.С., Жучков В.И. ***112***

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА, ВАНАДИЯ И ТИТАНА ПРИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ ОБЖИГЕ ТИТАНОМАГНЕТИТА
Агамирова А.С. ***116***

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ДОЖИГАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В ПОЛОСТИ 160-ТОННОГО КОНВЕРТЕРА АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
Протопопов Е.В., Солоненко В.В., Темлянцев М.В., Якушевич Н.Ф., Полях О.А. ***121***

МЕЖФАЗНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕРИЯ МЕЖДУ ШЛАКОМ СИСТЕМЫ CAO-SIO2-CE2O3-15%AL2O3-8%MGO И НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫМ МЕТАЛЛОМ
Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Уполовникова А.Г. ***126***

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ СМЕННОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
Лубяной Д.А., Юрьев А.Б., Кузнецов И.С., Маркидонов А.В., Лубяной Д.Д. ***131***

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ С ПРЯМЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ МАРГАНЦЕМ
Лубяной Д.Д., Юрьев А.Б., Маркидонов А.В., Кузнецов И.С.,Лубяной Д.А. ***136***

РАЗРАБОТКА В PASCALABC.NET ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАКОВ КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА
Хоанг В.В., Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Плакущий А.В. ***141***

СЕКЦИЯ 2: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ: ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА **147**

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА, ОБЛУЧЕННОГО ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ
АбатуроваА.А., Загуляев Д.В., Иванов Ю.Ф., Леонов А.А., Аксенова К.В. ***147***

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГКИХ ИНВАРОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ AL-SI-CU
Афанасьев В.К., Попова М.В., Малюх М.А. ***154***

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ
Князев С. В., Куценко А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Соколов Б.М., Ознобихина Н.В. ***159***

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЕМ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ
Князев С.В., Козырев Н.А., Усольцев А.А. ***163***

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЧУГУНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОСБОРНОГО КОЛОКОЛА
Усольцев А.А., Князев С.В., Куценко А.И., Козырев Н.А., Дмитриенко В.И. ***167***

ОЦЕНКА ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ЧУГУНОВ ВЧ50 И ЧХ3
Дмитриенко В.И., Князев С. В., Козырев Н.А., Куценко А.И., Усольцев А.А. ***177***

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ХН65ВМТЮ (ЭИ896) МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ
Комаров Д.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Чэнь Д., Панченко И.А. ***184***

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И ДЕФЕКТНОЙ СУБСТРУКТУРЫ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЛЬСОВ
Кузнецов Р.В., Громов В.Е, Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А., Кормышев В.Е., Перегудов О.А., Семин А.П. ***189***

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ СИЛУМИНОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ И МЕДИ
Попова М.В., Жибинова И.А., Прудников А.Н. ***194***

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛОГРАФИИ ВЫСОКОЧИСТОГО ЖЕЛЕЗА 008ЖР
Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В. ***201***

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДОМЕННОГО ЧУГУНА ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В., Сагалакова М.М., Черныш А.П., Жибинова И.А., Малюх М.А. ***208***

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА А0 С НИЗКОЙ СТЕПЕНЬЮ ПРОРАБОТКИ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ
Яшин В.В., Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю., Латушкин И.А. ***212***

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫКАТЫВАЕМОСТИ ДЕФЕКТОВ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОКАТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕЛЬСОБАЛОЧНОГО СТАНА
Уманский А.А., Юрьев А.Б. ***216***

МЕХАНИЗМЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ И СВОЙСТВ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
Арышенский Е.В., Коновалов С.В. ***225***

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЛИТЬЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВА AL-MG-SI С ИЗБЫТКОМ SI ЛЕГИРОВАННОГО МАЛЫМИ ZR, SC ДОБАВКАМИ
Лапшов М.А, Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю. ***232***

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ, МИКРОТВЕРДОСТЬ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 9CRMOV-N ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА
Осинцев К.А., Шляров В.В., Чэнь С., Коновалов С.В., Загуляев Д.В., Чаплыгин К.К. ***240***

ПРОКАТКА ДЛИННОМЕРНОЙ РЕЛЬСЫ С УСКОРЕНИЕМ
Соловьев В.Н., Белолипецкая Е.С. ***248***

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ ПО ТОЛЩИНЕ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ (ФАЗЫ) ПРИ ВЛИЯНИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО НИКЕЛЯ НА ДИФФУЗИОННЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ
Розенштейн Е.О., Бондарева О.С., Коновалов С.В. ***255***

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИНДУКЦИЕЙ 0,3 ТЛ НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО СВИНЦА
Серебрякова А.А., Загуляев Д.В, Шляров В.В. ***261***

ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА ЛИНЕЙНОЕ РАСШИРЕНИЕ ПОРШНЯ ИЗ ДОЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА АК5М2
Прудников А.Н., Фастыковский А.Р., Прудников В.А. ***266***

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 1424БТ, АМг5М, Д16, 5182 ПРИ СОЕДИНЕНИИ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ
Ахкильгов Г.В., Носова Е.А. ***271***

ВЛИЯНИЕ МАРГАНЦА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛИТКОВ ИЗ НАВОДОРОЖЕННЫХ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ
Афанасьев В.К., Прудников А.Н., Попова М.В., Фастыковский А.Р. ***276***

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ СТРУКТУР В СЛОИСТОЙ АЛЮМИНИЙ-ТИТАНОВОЙ ЗАГОТОВКЕ, ПОЛУЧЕННОЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОКАТКИ И ОТЖИГА
Штырова А.А., Носова Е.А. ***281***

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗЕРВА СИЛ ТРЕНИЯ КАЛИБРОВ, ФОРМИРУЮЩИХ СОЧЛЕНЕННЫЙ ПРОФИЛЬ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПРОДОЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ
Фастыковский А.Р., Вахроломеев В.А. ***286***

СИЛОВЫЕ УСЛОВИЯ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ В РОЛИКОВЫХ ВОЛОКАХ
Фастыковский А.Р., Осколкова Т.Н., Юрьев А.Б., Прудников А.Н. ***290***

УВЕЛИЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ЗАГОТОВОЧНЫХ И СОРТОВЫХ СТАНОВ
Фастыковский А.Р., Леонтьев В.В., Губарев Е.И., Перминов Д.А., Зайков И.Г. ***296***

ОСОБЕННОСТИ СИЛОВОГО БАЛАНСА УНИВЕРСАЛЬНЫХ КАЛИБРОВ СОВРЕМЕННЫХ РЕЛЬСОБАЛОЧНЫХ СТАНОВ
Фастыковский А.Р., Добрянский А.В., Дорофеев В.В. ***299***

ВОПРОСЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ
Князев С.В., Куценко А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Куценко А.А. ***304***

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ИЗ ОТБРАКОВКИ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК
Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В. ***309***

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И ОТЛИВОК ПОСЛЕ ВНЕШНИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ПРОЦЕССЕ ЛИТЬЯ
Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С., Куценко А.И., Пономарева К.В., Сметанюк С.В., Сокорев А.А. ***316***

Научное издание

МЕТАЛЛУРГИЯ: ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО

«Металлургия – 2021»

Труды XXII Международной научно-практической конференции

Часть 1

Под общей редакцией А.Б. Юрьева

Технический редактор Г.А. Морина

Компьютерная верстка Н.В. Ознобихина

Подписано в печать 20.10.2021 г.
Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага офисная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 23,4 Уч.-изд. л. 25,8 Тираж 300 экз. Заказ № 234

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
Издательский центр СибГИУ