

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 – 11 ноября 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 «МАТЕС 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

ков, Р. В. Старое, В. В. Смоктий [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1991. – 464 с.

3. Афонин, С. З. Современное состояние, перспективы и задачи стоящие перед металлургической промышленностью России / С. З. Афонин. – Сталь, 1995. – № 7. – С. 1 – 4.

4. Баптизманский, В. И. Теория кислородно-конвертерного процесса / В. И. Баптизманский. – Москва : Металлургия, 1975. – 375 с.

5. Баптизманский В.И. Конвертерные процессы производства стали / В.И. Баптизманский, М. Я. Меджибожский, В. Б. Охотский. – Киев – Донецк : Вища школа, 1984. – 344 с.

6. 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.

УДК 669.11:681.5

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАФИНИРОВАНИЯ РАСПЛАВА ПРИ ПРОДУВКЕ НЕЙТРАЛЬНЫМ ГАЗОМ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ

Протопопов Е.В., Темлянец М.В., Запольская Е.М., Полях О.А.

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

Аннотация. Представлена кинетическая модель рафинирования расплава нейтральным газом в сталеразливочном ковше. Полученные результаты расчетов хорошо согласуются с промышленными данными. Предложенная модель позволяет оперативно решать проблемы повышения эффективности обработки расплава в сталеразливочном ковше.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, продувка, расплав, нейтральный газ, кинетическая модель.

KINETIC MODEL OF MELT REFINING WHEN PURGING WITH NEUTRAL GAS IN A STEEL FILLING LADLE

Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Zapolskaya E.M., Polyakov O.A.

*Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russia, Protopopov@sibsiu.ru*

Abstract. A kinetic model of refining the melt with a neutral gas in a steel ladle is presented. The obtained calculation results are in good agreement with the industrial data. The proposed model allows us to quickly solve the problems of increasing the efficiency of melt processing in a steel ladle.

Keywords: steel filling ladle, purge, melt, neutral gas, kinetic model.

В соответствии с современными представлениями продувка нейтральным газом в ковше оказывает общее рафинирующее действие и повышает качества металла, обеспечивает возможность продолжения обезуглероживания и снижает коррозионный износ ковшевых огнеупоров.

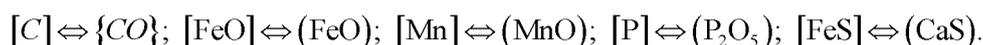
Для рационального использования указанных преимуществ и оптимизации параметров процесса целесообразно создание и использование адаптивных математических моделей, позволяющих повысить эффективность обработки расплава.

Разработанная модель основана на фундаментальных положениях и законах термодинамики, кинетики и гидродинамики металлургических расплавов. В основу модели положена гипотеза торможения гетерогенных реакций рафинирования расплава диффузией компонентов в шлаковой фазе.

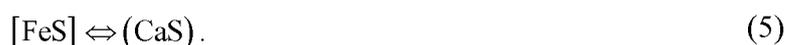
Модель позволяет оценивать термодинамические отклонения системы от равновесия по основным компонентам, кинетические константы отдельных реакций и гидродинамические параметры взаимодействующих фаз. Как установлено, дополнительное перемешивание металла нейтральным газом в ковше проявляется в дополнительном окислении углерода, фосфора, перераспределении марганца и серы между металлом и шлаком, снижении окисления металла и шлака, а также раскислении и гомогенизации химического состава и температуры. При этом в результате продувки и практическом прекращении экзотермических реакций фиксируется общее охлаждение металла. Скорость и глубина протекания этих процессов зависят от интенсивности и длительности продувки, конструкции ковша и расположения в днище дутьевых устройств, геометрии ванны, количества, состава и температуры металла и шлака и т.д. Подобная многофакторность обуславливает неоднозначность данных о количественных закономерностях протекания рассматриваемых процессов.

В гидродинамической части задачи был использован принцип постоянства конвективного воздействия рассматриваемой фазы на массоперенос в расплаве [1, 2].

В соответствии с классификацией гетерогенных систем в сталеплавильной ванне для обсуждаемого варианта рафинирования металла можно выделить пять дисперсных и недисперсных подсистем: *I* – капли металла в шлаке (м/шл); *II* – контактирующие сплошные фазы металл – шлак (м – ш); *III* – пузырьки газа в металле (г/м); *IV* – пузырьки газа в шлаке (г/ш); *V* – контактирующие плоскости фазы газ – шлак (г – ш). На соответствующих поверхностях ($S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V, S_n$) контакта фаз в выделенных подсистемах совершаются основные превращения:



Этим химическим превращения соответствуют следующие независимые реакции:



Тогда скорость реакций (1) – (5), выраженные в молях соответствующего элемента, будут определяться по следующим уравнениям:

$$W_{FeO}^{[C]} = \frac{dn_{FeO}^C}{d\tau} = \frac{D_{FeO}}{\delta_{FeO}} S_{МIII} (C_{FeO} - C_{FeO}^{[C]}); \quad (6)$$

$$W_{FeO}^{[O]} = \frac{dn_{FeO}^O}{d\tau} = \frac{D_{FeO}}{\delta_{FeO}} S_{МIII} (C_{FeO} - C_{FeO}^{[C]}); \quad (7)$$

$$W_{MnO} = \frac{dn_{MnO}}{d\tau} = \frac{D_{MnO}}{\delta_{MnO}} S_{МIII} (C_{MnO} - C_{MnO}^{[C]}); \quad (8)$$

$$W_{P_2O_5} = \frac{dn_{P_2O_5}}{d\tau} = \frac{D_{P_2O_5}}{\delta_{P_2O_5}} S_{МIII} (C_{P_2O_5} - C_{P_2O_5}^{[C]}); \quad (9)$$

$$W_{CaS} = \frac{dn_{CaS}}{d\tau} = \frac{D_{CaS}}{\delta_{CaS}} S_{МIII} (C_{FeS} - C_{FeS}^{[C]}); \quad (10)$$

здесь n_i^j – количество молей i -ого компонента, расходуемого на j -ый компонент металла;
 δ_i – приведенная толщина пограничного диффузионного слоя i -ого компонента;

$S_{\text{МШ}}$ – эквивалентная (по отношению к усредненной по всему объему шлака концентрации компонента) площадь контакта металла со шлаком в подсистемах I и II ;

C_i и C_i^j – концентрация j -ого компонента в объеме шлаковой фазы и равновесная с j -ым компонентом металла.

Поскольку площади контакта фаз и их зависимости от управляющих воздействий в ковше определяются в лучшем случае с точностью до постоянного множителя, то поверхности раздела металла со шлаком S_I и S_{II} в подсистемах I и II объединили в одну с эквивалентной площадью $S_{\text{МШ}}$. При заданных конструкции донных фурм и геометрии ковша ее величина зависит только от объемной скорости продуваемого нейтрального газа ($q_{\text{н.г.}}$) и образующегося монооксида углерода (q_{CO}):

$$S_{\text{МШ}} = a_{\text{МШ}}(q_{\text{н.г.}} + q_{\text{CO}})^{n_{\text{МШ}}}. \quad (11)$$

Константу скорости массоотдачи $\beta_i = D_i/\delta_i$ можно представить как

$$\beta_i = \beta D_i^{0,5}, \quad (12)$$

где β – конвективная постоянная, одинаковая для всех компонентов шлака;

D_i – коэффициент молярной диффузии i -ого компонента, $\text{м}^2/\text{с}$.

Конвективная постоянная зависит также только от интенсивности перемешивания:

$$\beta = \beta_0(q_{\text{н.г.}} + q_{\text{CO}})^{n_{\beta}^{\text{III}}}. \quad (13)$$

В уравнениях (11) и (13) $a_{\text{МШ}}$ и β_0 – коэффициент пропорциональности; $n_{\text{МШ}}$ и n_{β}^{III} – показатели степени, отражающие влияние объемной скорости газа на площадь контакта со шлаком и константу скорости массоотдачи в шлаке. При этом $n_{\text{МШ}}$ меняется от 0 при струйном режиме течения газа до 2/3 – при пузырьковом; n_{β}^{III} – от 2/3 при ламинарном течении газа до 3/4 – при турбулентном.

С учетом соотношений (11) – (13) после перехода к концентрациям в процентах по массе и скоростям реакций V (%/мин) из уравнений (6) – (10) получаем:

$$V_{\text{FeO}}^{[\text{C}]} = \frac{d(\text{FeO})^{[\text{C}]}}{d\tau} A_{\text{МШ}} D_{\text{FeO}}^{0,5} \left[(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{[\text{C}]}^* \right], \quad (14)$$

$$V_{\text{FeO}}^{[\text{O}]} = \frac{d(\text{FeO})^{[\text{O}]}}{d\tau} A_{\text{МШ}} D_{\text{FeO}}^{0,5} \left[(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{[\text{O}]}^* \right], \quad (15)$$

$$V_{\text{MnO}}^{[\text{C}]} = \frac{d(\text{MnO})^{[\text{C}]}}{d\tau} A_{\text{МШ}} D_{\text{MnO}}^{0,5} \left[(\text{MnO}) - (\text{MnO})_{[\text{C}]}^* \right], \quad (16)$$

$$V_{\text{P}_2\text{O}_5}^{[\text{C}]} = \frac{d(\text{P}_2\text{O}_5)^{[\text{C}]}}{d\tau} A_{\text{МШ}} D_{\text{P}_2\text{O}_5}^{0,5} \left[(\text{P}_2\text{O}_5) - (\text{P}_2\text{O}_5)_{[\text{C}]}^* \right], \quad (17)$$

$$V_{\text{CaS}}^{[\text{C}]} = \frac{d(\text{CaS})^{[\text{C}]}}{d\tau} A_{\text{МШ}} D_{\text{CaS}}^{0,5} \left[(\text{FeS}) - (\text{CaS})_{[\text{C}]}^* \right], \quad (18)$$

где одинаковый для всех компонентов шлака коэффициент пропорциональности

$$A_{\text{МШ}} = a_{\text{МШ}} \beta_0 \frac{\rho_{\text{МШ}}}{m_{\text{МШ}}} (q_{\text{н.г.}} + q_{\text{CO}})^{n_{\beta}^{\text{III}}}$$

зависит только от интенсивности перемешивания металла нейтральным газом и пропорционален произведению площади контакта соответствующих фаз на константу скорости массоотдачи на лимитирующей стадии; $\rho_{\text{МШ}}$ и $m_{\text{МШ}}$ – плотность и масса шлака в ковше, $\text{кг}/\text{м}^3$ и кг .

При этом существенное преимущество предложенной кинетической модели заключается в том, что величина $A_{\text{МШ}}$, определенная для одного компонента, может быть использо-

вана без всяких коррекций для описания динамики изменения содержания и других компонентов металла и шлака.

Равновесные концентрации компонентов шлака $(i)_j^*$ рассчитывали на основе закона действия масс и термодинамической теории растворов. Активности компонентов металла определяли по эмпирической методике параметров взаимодействия Вагнера, а компонентов шлака – по различным теориям ионных растворов, в том числе по теории регулярных растворов В. А. Кожеурова [3].

Наряду с кинетическими в математическую модель процесса включили уравнение материального и теплового балансов. Тепловой баланс отражен в «кинетическом» уравнении для скорости изменения температуры:

$$W_T = \frac{dT}{d\tau} = \frac{-\sum_{r=1}^N W_r \Delta H_r - 1,4q_{в.г} (T - 298) - \mathcal{Q}_{пот}}{C_B},$$

в котором W_r и ΔH_r – скорость и изменение энтальпии при r -ой реакции; $\mathcal{Q}_{пот}$ – скорость тепловых потерь, Дж/С; $C_B = C_M + C_{ш}$ – теплоемкость ванны.

Представленная система уравнений в дальнейшем решалась на основе опытных данных о фактических скоростях изменения параметров системы, полученных в промышленных экспериментах. Тогда при определении коэффициента пропорциональности $A_{МШ}$ для реакций (1) – (5) при следующих исходных данных: $T = 1873$ К; концентрациях компонентов металла и шлака – ≈ 20 % (FeO); ≈ 6 % (MnO); $\approx 2,0$ % (P₂O₅); $\approx 0,25$ % [C]; $\approx 0,02$ % [O]; $\approx 0,15$ % [Mn]; $\approx 0,025$ % [P] и $\approx 0,25$ % [S]. Тогда для реакций (1) – (5) получим следующие данные:

Реакция	1	2	3	4	5
Константа равновесия реакции	56,740	0,226	53,150	2870,000	7,410
Равновесные с металлом концентрации компонентов в шлаке, % (по массе)	7,61 (FeO) _с *	7,60 (FeO) _с *	10,10 (MnO) _с *	2,65 (P ₂ O ₅) _с *	0,05 (CaS) _с *
Скорости изменения концентраций компонентов в шлаке, %/мин	-0,015	-0,015	0,005	0,0005	0,0008
Коэффициент диффузии компонентов $Di \cdot 10^{10}$ м ² /с	2,5	2,5	2,5	1,0	,0
$A_{МШ}$	76,54	76,51	76,53	76,53	76,52

Анализ полученных промышленных данных и сопоставление рассчитанных по модели показывает достаточно хорошую сходимость результатов и удовлетворительное соответствие, что позволяет сделать вывод о правильности выбора расчетных формул. Таким образом, предложенная модель перемешивания металла нейтральным газом в ковше позволяет оперативно решать проблемы повышения эффективности обработки расплава в конкретных условиях.

Библиографический список

1. Шакиров К.М. Обобщенная схема взаимодействия фаз и математическая модель сталеплавильного процесса // Известия вузов. Черная металлургия. 1984. № 10. С. 11 – 15.
2. Шакиров К.М. Скорость образования и величина поверхности контакта фаз в ванне кислородного конвертера // Известия вузов. Черная металлургия. 1983. № 12. С. 6 – 10.
3. Попель С.И., Сотников А.И., Бороненков В.Н. Теория металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1986. – 463 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПАМЯТИ НИКОЛАЯ ВАСИЛЬЕВИЧА ТОЛСТОГУЗОВА <i>Рожихина И.Д.</i>	4
СЕКЦИЯ 1: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	9
ЛЕГИРОВАНИЕ И МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ РАСПЛАВОВ ПРИРОДНЫМИ И ТЕХНОГЕННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ <i>Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Процунин И.Е., Голодова М.А., Дмитриенко В.И.</i>	9
ПОЛУЧЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОГО КОНЦЕНТРАТА ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ РУД КУЗБАССА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИИ В МЕТАЛЛУРГИИ <i>Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Голодова М.А., Ходосов И.Е.</i>	18
АНАЛИЗ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ <i>Павлов А.В., Спириин Н.А., Бегинюк В.А., Косаченко И.Е.</i>	26
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОКУСКОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ.....	32
<i>Берсенев И.С., Брагин В.В., Солодухин А.А., Поколенко А.Ю., Бардавелидзе Г.Г., Спириин Н.А.</i>	32
ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ НИОБИЙСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ В ЖИДКОЙ СТАЛИ <i>Жучков В.И., Заякин О.В., Кель И.Н.</i>	37
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА ПРИ ПРОДУВКЕ НЕЙТРАЛЬНЫМ ГАЗОМ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛИ <i>Протопопов Е.В., Темлянецев М.В., Запольская Е.М., Полях О.А.</i>	42
ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЯ И ФЕРРОСИЛИЦИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКОЙ И ОБРАЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ <i>Ёлкин К.С., Рожихина И.Д., Ёлкин Д.К.</i>	46
ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ <i>Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Коновалов С.В., Воробьев С.В., Семин А.П.</i>	50
ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ НА АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ <i>Гизатулин Р.А., Лепихов В.С., Шароватых Д.Ю.</i>	54
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В МЕТАЛЛУРГИИ ЦИНКА <i>Козлов П.А.</i>	57
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАРГАНЦЕВЫХ СПЛАВОВ ИЗ БЕДНЫХ КАРБОНАТНЫХ И ОКСИДНЫХ РУД В АГРЕГАТЕ СЭР <i>Рыбенко И.А., Цымбал В.П., Kongoli F.</i>	66
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВСПЕНИВАНИЯ 350-ТОННОЙ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ НИЗКОМАРГАНЦОВИСТЫХ ЧУГУНОВ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Протопопов Е.В., Полях О.А., Чернышева Н.А., Козьминых Р.А.</i>	73
КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАФИНИРОВАНИЯ РАСПЛАВА ПРИ ПРОДУВКЕ НЕЙТРАЛЬНЫМ ГАЗОМ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ <i>Протопопов Е.В., Темлянецев М.В., Запольская Е.М., Полях О.А.</i>	78
ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРАТА НА «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Леонтьев А.С., Рыбенко И.А.</i>	82

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ИЗВЕСТНЯКА НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ <i>Уманский А.А., Козырев Н.А., Жутов С.В., Николаев В.К., Гизатулин Р.А.</i>	87
ПОВЕДЕНИЕ МАРГАНЦА В ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ <i>Гизатулин Р.А., Дмитриенко В.И., Дмитриенко А.В., Носов Ю.Н., Ноздрин И.В.</i>	92
РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МНОГОСОПЛОВЫХ КИСЛОРОДНЫХ ФУРМ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ДЛЯ 350-ТОННЫХ КОНВЕРТЕРОВ ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Протопопов Е.В., Щипанов С.С., Чернышева Н.А., Сафонов С.О.</i>	95
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ДУТЬЕВЫХ УСТРОЙСТВ И КОНСТРУКЦИИ ДВУХЪЯРУСНОЙ КИСЛОРОДНОЙ ФУРМЫ ДЛЯ 350-ТОННЫХ КОНВЕРТЕРОВ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Протопопов Е.В., Щипанов С.С., Чернышева Н.А., Сафонов С.О.</i>	101
РАСЧЕТ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ В КОЛОННОМ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОМ РЕАКТОРЕ <i>Сеченов П.А., Рыбенко И.А., Roos К.</i>	107
ИЗУЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПЛАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ В ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОМ РАСПЛАВЕ <i>Заякин О.В., Ренёв Д.С., Жучков В.И.</i>	112
ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА, ВАНАДИЯ И ТИТАНА ПРИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ ОБЖИГЕ ТИТАНОМАГНЕТИТА <i>Агамирова А.С.</i>	116
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ДОЖИГАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В ПОЛОСТИ 160-ТОННОГО КОНВЕРТЕРА АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Протопопов Е.В., Солоненко В.В., Темлянец М.В., Якушевич Н.Ф., Полях О.А.</i>	121
МЕЖФАЗНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕРИЯ МЕЖДУ ШЛАКОМ СИСТЕМЫ CAO-SIO ₂ -CE ₂ O ₃ -15%AL ₂ O ₃ -8%MGO И НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫМ МЕТАЛЛОМ <i>Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Уполовникова А.Г.</i>	126
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ СМЕННОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ <i>Лубяной Д.А., Юрьев А.Б., Кузнецов И.С., Маркидонов А.В., Лубяной Д.Д.</i>	131
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ С ПРЯМЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ МАРГАНЦЕМ <i>Лубяной Д.Д., Юрьев А.Б., Маркидонов А.В., Кузнецов И.С., Лубяной Д.А.</i>	136
РАЗРАБОТКА В PASCALABC.NET ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАКОВ КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА <i>Хоанг В.В., Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Плакущий А.В.</i>	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 <i>Абатурова А.А., Загуляев Д.В., Иванов Ю.Ф., Леонов А.А., Аксенова К.В.</i>	147
О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГКИХ ИНВАРОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ AL-SI-CU <i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Малиух М.А.</i>	154
ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ <i>Князев С. В., Куценко А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Соколов Б.М., Ознобихина Н.В.</i>	159

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЕМ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ	
<i>Князев С.В., Козырев Н.А., Усольцев А.А.</i>	163
КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЧУГУНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОСБОРНОГО КОЛОКОЛА	
<i>Усольцев А.А., Князев С.В., Куценко А.И., Козырев Н.А., Дмитриенко В.И.</i>	167
ОЦЕНКА ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ЧУГУНОВ ВЧ50 И ЧХ3	
<i>Дмитриенко В.И., Князев С. В., Козырев Н.А., Куценко А.И., Усольцев А.А.</i>	177
ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ХН65ВМТЮ (ЭИ896) МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ	
<i>Комаров Д.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Чэнь Д., Панченко И.А.</i>	184
ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И ДЕФЕКТНОЙ СУБСТРУКТУРЫ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЛЬСОВ	
<i>Кузнецов Р.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А., Кормышев В.Е., Перегудов О.А., Семин А.П.</i>	189
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ СИЛУМИНОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ И МЕДИ	
<i>Попова М.В., Жибнинова И.А., Прудников А.Н.</i>	194
ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛОГРАФИИ ВЫСОКОЧИСТОГО ЖЕЛЕЗА 008ЖР	
<i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В.</i>	201
МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДОМЕННОГО ЧУГУНА ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	
<i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В., Сагалакова М.М., Черныш А.П., Жибнинова И.А., Малюх М.А.</i>	208
ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА А0 С НИЗКОЙ СТЕПЕНЬЮ ПРОРАБОТКИ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ	
<i>Яшин В.В., Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю., Латушкин И.А.</i>	212
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫКАТЫВАЕМОСТИ ДЕФЕКТОВ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОКАТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕЛЬСОБАЛОЧНОГО СТАНА	
<i>Уманский А.А., Юрьев А.Б.</i>	216
МЕХАНИЗМЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ И СВОЙСТВ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	
<i>Арышенский Е.В., Коновалов С.В.</i>	225
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЛИТЬЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВА AL-MG-SI С ИЗБЫТКОМ SI ЛЕГИРОВАННОГО МАЛЫМИ ZR, SC ДОБАВКАМИ	
<i>Лапшов М.А, Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю.</i>	232
ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ, МИКРОТВЕРДОСТЬ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 9СRМ0V-N ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
<i>Осинцев К.А., Шляров В.В., Чэнь С., Коновалов С.В., Загуляев Д.В., Чаплыгин К.К.</i>	240
ПРОКАТКА ДЛИННОМЕРНОЙ РЕЛЬСЫ С УСКОРЕНИЕМ	
<i>Соловьев В.Н., Белолипецкая Е.С.</i>	248
РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ ПО ТОЛЩИНЕ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ (ФАЗЫ) ПРИ ВЛИЯНИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО НИКЕЛЯ НА ДИФФУЗИОННЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ	
<i>Розенштейн Е.О., Бондарева О.С., Коновалов С.В.</i>	255

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИНДУКЦИЕЙ 0,3 ТЛ НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО СВИНЦА <i>Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В.</i>	261
ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА ЛИНЕЙНОЕ РАСШИРЕНИЕ ПОРШНЯ ИЗ ДОЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА АК5М2 <i>Прудников А.Н., Фастыковский А.Р., Прудников В.А.</i>	266
ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 1424БТ, АМГ5М, Д16, 5182 ПРИ СОЕДИНЕНИИ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ <i>Ахильгов Г.В., Носова Е.А.</i>	271
ВЛИЯНИЕ МАРГАНЦА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛИТКОВ ИЗ НАВОДОРОЖЕННЫХ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ <i>Афанасьев В.К., Прудников А.Н., Попова М.В., Фастыковский А.Р.</i>	276
ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ СТРУКТУР В СЛОИСТОЙ АЛЮМИНИЙ-ТИТАНОВОЙ ЗАГОТОВКЕ, ПОЛУЧЕННОЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОКАТКИ И ОТЖИГА <i>Штырова А.А., Носова Е.А.</i>	281
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗЕРВА СИЛ ТРЕНИЯ КАЛИБРОВ, ФОРМИРУЮЩИХ СОЧЛЕНЕННЫЙ ПРОФИЛЬ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПРОДОЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ <i>Фастыковский А.Р., Вахроломеев В.А.</i>	286
СИЛОВЫЕ УСЛОВИЯ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ В РОЛИКОВЫХ ВОЛОКАХ <i>Фастыковский А.Р., Осколкова Т.Н., Юрьев А.Б., Прудников А.Н.</i>	290
УВЕЛИЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ЗАГОТОВОЧНЫХ И СОРТОВЫХ СТАНОВ <i>Фастыковский А.Р., Леонтьев В.В., Губарев Е.И., Перминов Д.А., Зайков И.Г.</i>	296
ОСОБЕННОСТИ СИЛОВОГО БАЛАНСА УНИВЕРСАЛЬНЫХ КАЛИБРОВ СОВРЕМЕННЫХ РЕЛЬСОБАЛОЧНЫХ СТАНОВ <i>Фастыковский А.Р., Добрянский А.В., Дорофеев В.В.</i>	299
ВОПРОСЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ <i>Князев С.В., Куценко А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Куценко А.А.</i>	304
АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ИЗ ОТБРАКОВКИ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК <i>Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В.</i>	309
КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И ОТЛИВОК ПОСЛЕ ВНЕШНИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ПРОЦЕССЕ ЛИТЬЯ <i>Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С., Куценко А.И., Пономарева К.В., Сметанюк С.В., Сокорев А.А.</i>	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