

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Администрация Правительства Кузбасса**

**Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»**

**Сибирский государственный индустриальный университет**

**МЕТАЛЛУРГИЯ:  
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО  
*«Металлургия – 2022»***

***Труды***

***XXIII Международной научно-практической конференции***

***23– 25 ноября 2022 г.***

***Часть 1***

**Новокузнецк  
2022**

## Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,  
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,  
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,  
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,  
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540    Металлургия : технологии, инновации, качество : труды  
XXIII Международной научно-практической конференции.  
В 2 частях. Часть 1 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр.  
ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 390 с. : ил.

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

**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»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»

АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОКСИДНОГО ВОЛЬФРАМОВОГО СЫРЬЯ В СТРУЙНОМ ПЛАЗМЕННОМ РЕАКТОРЕ

Ноздрин И.В.<sup>1</sup>, Полях О.А.<sup>1</sup>, Лепихов В.С.<sup>1</sup>, Аникин А.Е.<sup>1</sup>,  
Комрони М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, Россия, kafcmet@sibsiu.ru*

<sup>2</sup> *Министерство промышленности и новых технологий,  
г. Душанбе, Республика Таджикистан, km-0808@mail.ru*

*Аннотация.* Проведено многофакторное математическое моделирование взаимодействия плазменного потока азота с частицами оксида вольфрама различной дисперсности при разных технологических режимах работы промышленного реактора мощностью 150 кВт для определения оптимальных условий переработки. Установлено, что параметры реактора обеспечивают эффективную переработку порошкообразного оксида вольфрама крупностью до 200 мкм при начальной концентрации оксида в плазменном потоке азота 0,01 кг/кг.

*Ключевые слова:* многоструйный плазменный реактор, оксид вольфрама, межкомпонентный теплообмен, теплопроводность, испарение сырья.

## USE OF NUMERICAL METHODS TO OPTIMIZE PROCESSING OF TUNGSTEN OXIDE RAW IN A JET PLASMA REACTOR

Nozdrin I.V.<sup>1</sup>, Polyah O.A.<sup>1</sup>, Lepihov V.S.<sup>1</sup>, Anikin A.E.<sup>1</sup>, Komroni M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Siberian state industrial university,  
Novokuznetsk, Russia, kafcmet@sibsiu.ru*

<sup>2</sup> *Ministry of the industry and new technologies,  
Dushanbe, Republic of Tajikistan, km-0808@mail.ru*

*Abstract.* Multifactorial mathematical modeling of the interaction of a nitrogen plasma flow with particles of tungsten oxide of various dispersions under different technological operating modes of an industrial plasma jet reactor with a power of 150 kW was carried out to determine the optimal processing conditions. It has been established that the reactor parameters ensure efficient processing of powdered tungsten oxide with a particle size of up to 200 mkm at an initial oxide concentration in the nitrogen plasma flow of 0.01 kg/kg.

*Keywords:* multi-jet plasma reactor, tungsten oxide, heat transfer, thermal conductivity, raw material evaporation.

### ***Постановка задачи исследования***

Вольфрам и карбид вольфрама, обладающие комплексом экстремальных физико-химических свойств, по праву занимают одно из лидирующих мест в мире сверхтвердых тугоплавких соединений. Использование данных материалов в высокодисперсном состоянии существенно расширяет сферы их применения в современном материаловедении, например, как компонентов новых жаропрочных керамик, композиционных покрытий и др. К перспективным способам получения высокодисперсных материалов и композиций на их основе следует отнести процессы плазмометаллургического синтеза, реализуемые в струйных реакторах. Такие процессы характеризуются высокой производительностью, позволяют управлять процессами синтеза и физико-химическими свойствами получаемых продуктов в широком диапазоне, освоены в промышленном масштабе. Отличительной особенностью струйных плазменных процессов является их быстротечность, не превышающая тысячных долей секунды, что обусловлено высокими скоростями движения плазменно-сырьевых сред в реакторе, достигающих сотен метров в секунду. Для получения высоких степеней превращения приходится решать ряд конструкторских и технологических задач, обеспечивающих эффективную гомогенизацию среды, протекание целевых химических реакций и формирование свойств продуктов синтеза, отвечающих заданным критериям.

Лимитирующей стадией плазменных процессов, использующих в качестве исходного сырья конденсированные материалы, является перевод их в газообразное состояние. От эффективности испарения частиц шихты зависят принципиальная возможность реализации предлагаемого процесса и его технико-экономические показатели. Экстремальность условий синтеза, большие скорости и крайне малые времена нахождения компонентов в реакторе затрудняют экспериментальное исследование процесса гомогенизации плазменного потока. В связи с этим в настоящее время разрабатываются и совершенствуются численные методы моделирования струйных процессов, протекающих в низкотемпературной плазме. Полученные математические модели, описывающие отдельные стадии плазмометаллургического синтеза, позволяют существенно облегчить оптимизацию новых разрабатываемых технологий.

Целью настоящей работы является проведение в условиях промышленного реактора моделирования процессов взаимодействия плазменного потока азота с частицами оксида вольфрама  $WO_3$  различной дисперсности для оценки возможности его использования в качестве исходного компонента при синтезе высокодисперсных порошков вольфрама и его карбида.

### ***Выбор модели расчета и описание методики***

Плазмометаллургические процессы получения конденсированных материалов в струйных реакторах относятся к одним из самых сложных технологических процессов, реализуемых на практике. Это обусловлено необходимостью учета целого ряда экстремальных процессов, протекающих в плазменном реакторе: огромное количество физико-химических превраще-

ний среди компонентов; высокие температуры процесса, достигающие десятков и сотен тысяч градусов; высокие скорости движения плазменного и сырьевого потоков, достигающие сотен метров в секунду; необходимость выделения и фиксации целевых продуктов синтеза из-за возможности их разложения.

С известной долей упрощения все процессы в плазменном реакторе зависят от следующих факторов:

1) физико-химических – нагрев исходных компонентов, фазовые превращения, химические взаимодействия, образование и рост частиц конденсированных продуктов синтеза;

2) конструктивных – условия генерации и вид плазменного потока, способ ввода в реактор сырьевых компонентов и вывода продуктов синтеза;

3) технологических – выбор оптимального вида сырья, обеспечение эффективных параметров синтеза, организация фиксации и выделения целевых продуктов из плазменного потока и предотвращение их возможного разложения.

Большое количество факторов и их экстремальные значения делают затруднительной, а порой и невозможной, выделение и экспериментальную оценку отдельных стадий плазмометаллургических процессов. В связи с этим целесообразно использовать для этих целей аппарат математического моделирования, позволяющий описывать и исследовать отдельные группы процессов, протекающих в реакторе, например, нагрев, плавление и испарение исходных материалов, обеспечивающих гомогенизацию процесса и химические превращения с высокими скоростями. Адекватность применяемых моделей должна проходить экспериментальную оценку путем сравнения характеристик получаемых продуктов с их расчетными параметрами.

Лимитирующей стадией плазменных процессов при использовании дисперсного сырья является скорость их гомогенизации, т.е. перевода твердых и жидких компонентов в газовую фазу [1-2]. Успешное протекание процесса синтеза зависит, главным образом, от возможности обеспечения эффективного теплообмена между плазменным потоком и движущимися частицами конденсированного сырья. Знание особенностей теплообмена в плазменном потоке позволяет прогнозировать выход готовых продуктов и формировать комплекс требований к конденсированному сырью, гидродинамическим, теплофизическим и конструктивным параметрам оборудования.

Уровень современного состояния средств объективного контроля, не позволяет получить адекватную картину испарения конденсированного сырья в плазменном реакторе из-за многофакторности и экстремальности условий синтеза. Поэтому описание межкомпонентного теплообмена сводится к построению математических моделей с большим количеством допущений. Однако, несмотря на оценочный характер существующих моделей, результаты моделирования чрезвычайно важны и обязательно учитываются при разработке технологических процессов.

Большинство современных моделей, описывающих процесс взаимодействия частиц сырья с плазменной струей [3-4] рассматривают идеализи-

рованный вариант нагрева отдельных частиц при движении вдоль оси реактора в высокоэнтальпийном газовом потоке и, зачастую, не учитывают влияния концентрации дисперсного материала, изменения теплофизических свойств конденсированного сырья и газового потока в условиях градиента температур по сечению реактора и на поверхности частиц. Температура потока определяется по средним значениям, полученным из экспериментальных данных, или рассчитывается стандартными методами для установившегося турбулентного режима течения газа. Также не принимается во внимание изменение коэффициента теплоотдачи от газового потока к стенкам реактора при образовании гарнисажа, наблюдаемого в реальных технологических процессах, или при использовании искусственной футеровки. Действительно, изменение основных теплофизических свойств плазмообразующих газов в рассматриваемом диапазоне температур может достигать 300 %. Наличие искусственной футеровки снижает теплоотдачу от плазменного потока к стенкам реактора на 15 – 35 % [5], а образование гарнисажа - на 11 – 30 % [6]. Такие допущения приводят к значительной погрешности результатов расчетов и завышение размеров испарившихся частиц в несколько раз.

В настоящей работе использовалась программа расчета, созданная в Сибирском государственном индустриальном университете на базе исследований, выполненных под руководством профессора Г.В. Галевского и представленных в [7 - 9], являющаяся по факту глубоко переработанной, актуализированной и дополненной математической моделью Института тепло- и массообмена АН БССР, выполненной под руководством профессора А.Л. Моссэ [3]. В использованной математической модели взаимодействия конденсированного сырья с потоком азотной и азотно-водородной плазмы устранены основные недостатки базового варианта и решены следующие вопросы:

- учтен эффект влияния естественной турбулизации плазменного потока на теплообмен плазмы с конденсированными частицами и «холодной» стенкой реактора;

- определены и использованы параметры снижения интенсивности теплообмена плазменного потока со стенками реактора при формировании гарнисажа и искусственной теплоизоляции канала;

- предусмотрено изменение теплового потока к поверхности отдельных частиц за счет учета влияния «коллективного» фактора.

Модель расчета имеет следующую структуру:

- 1) блок формирования начальных условий расчета;
- 2) блок расчета гидродинамических условий, описывающий движение частиц и плазменного потока;
- 3) блока расчета теплообмена плазменного потока со стенками реактора;
- 4) блока расчета теплообмена плазменного потока с дисперсным сырьём.

Теплообмен потока газа-теплоносителя, содержащего частицы конденсированного сырья в количестве до 0,012 кг/кг газа, со стенками реактора в области чисел Рейнольдса 700 – 1500 описывается уравнениями [10]:

$$St = 0,646 \cdot Re_{f,x}^{-0,420} \cdot Pr_{f,x}^{-0,05} \text{ (без футеровки)}, \quad (1)$$

$$St = 0,512 \cdot Re_{f,x}^{-0,426} \cdot Pr_{f,x}^{-0,05} \text{ (гарнисажная футеровка из } ZrO_2), \quad (2)$$

где: St – критерий Стантона;  
 Re – критерий Рейнольдса;  
 Pr – критерий Прандтля;  
 f, x – индекс, показывающий распределение значений по осевой координате (длине) плазменного реактора.

Расчет нагрева частиц сводится к совместному решению уравнений движения и нагрева частиц. С учетом принятых допущений уравнение движения сферической частицы имеет вид [7 - 9].

$$m \frac{\partial v}{\partial \tau} = C_d \rho_n \frac{(v_n - v_n)^2}{2} \cdot S_n + m_n \cdot g \quad (3)$$

где: p – индекс, относящийся к потоку;  
 n – индекс, относящийся к частице;  
 $\tau$  – время, с; V – скорость, м/с; m – масса, кг;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $S_n$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  
 $C_d$  – лобовое газодинамическое сопротивление частицы;  
 g – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Лобовое сопротивление частицы в газовом потоке определяется при малых значениях критерия Рейнольдса по формуле [7]:

$$Cd = \frac{2U}{Re} \quad (4)$$

Процесс нагрева сферической частицы описывается уравнением [7]:

$$\frac{\partial T_n}{\partial \tau} = \frac{3\alpha_n}{C_n \cdot \rho_n \cdot r_n} (T_p - T_n) \quad (5)$$

где: T – температура, °K;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, кДж/(м<sup>2</sup>·м·град);  
 C – теплоемкость, кДж/град;  
 r – радиус частицы, м.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается из критериальных уравнений [7 - 9]:

$$Nu = 2 + 0,6Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2}, \quad (6)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_p}{\lambda} \quad (7)$$

где: Nu – критерий Нуссельта;  
 Pr – критерий Прандтля;  
 Re – критерий Рейнольдса;  
 $d_p$  – диаметр реактора, м;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности частицы, Вт/(м·К).

Время задержки на плавление и диссоциацию определяется уравнением [7-9]:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_1 + \Delta\tau_1} \alpha_n (T_n - T_{\text{пл(дис)}}) d\tau = \frac{r}{3} \cdot \rho_n \cdot L_{\text{пл}}(D_{\text{дис}}), \quad (8)$$

где:  $T_{\text{пл(дис)}}$  – температура плавления (диссоциации),  $^{\circ}\text{K}$ ;

$L_{\text{пл}}$  – теплота плавления, кДж/моль;

$D_{\text{дис}}$  – теплота диссоциации, кДж/моль.

Частица считается полностью расплавившейся или полностью продиссоциировавшей, когда к ней поступит все тепло, необходимое на нагрев, плавление и диссоциацию массы данной частицы.

Программа расчетов оценивает влияние параметров высокоэнтальпийного газового потока и крупности шихтовых материалов на степень их испарения. В качестве исходных данных задаются: внутренний диаметр реактора; мощность плазмотронов и начальная температура плазменного потока; расход конденсированного сырья, транспортирующего и плазмообразующих газов; теплофизические и термохимические характеристики газов и компонентов конденсированного сырья; дисперсные характеристики сырья. Результаты расчетов позволяют определить для любой точки плазменного реактора: количество тепла, переданного теплоносителем частицам сырья и стенкам реактора; температуру газопылевого потока, частиц шихты и стенок реактора; степень и время испарения частиц; расстояние, которое прошли частицы материала до полного испарения.

#### ***Результаты моделирования взаимодействия оксида вольфрама с плазменным потоком азота***

В качестве начальных условий принят режим работы трехструйного прямоточного плазменного реактора с гарнисажной футеровкой из диоксида циркония мощностью 150 кВт, обеспечивающий начальную расчетную температуру плазменного потока 5400 К при расходе плазмообразующего и транспортного газа  $1 \cdot 10^{-2}$  кг/с. Доля транспортного газа в реакторе не превышает 10 % от количества плазмообразующего газа. Запыленность плазменного потока на входе в реактор принята равной 0,01 кг  $\text{WO}_3$  на 1 кг плазмообразующего газа - азота. Начальная скорость ввода частиц в плазменный реактор составляла 1 м/с.

Теплофизические свойства плазмообразующего газа приняты по данным [11-12], вольфрама и его соединений заимствованы из [13-15] и частично приведены в таблице 1. В связи с отсутствием данных для значений коэффициента теплопроводности во всем требуемом интервале температур, принимались значения, полученные расчетным путем по методике, приведенной в [16-17].

Таблица 1 – Теплофизические свойства W и WO<sub>3</sub>

Материал	W	WO <sub>3</sub>
Температура плавления, К	3695	1747
Температура кипения( диссоциации), К	5800	2824
Теплота плавления, кДж/моль	75,94	1,07
Теплота испарения (диссоциации), кДж/моль	512	9,55
Теплопроводность – $\lambda$ , Вт/(м·К)	163	2,94

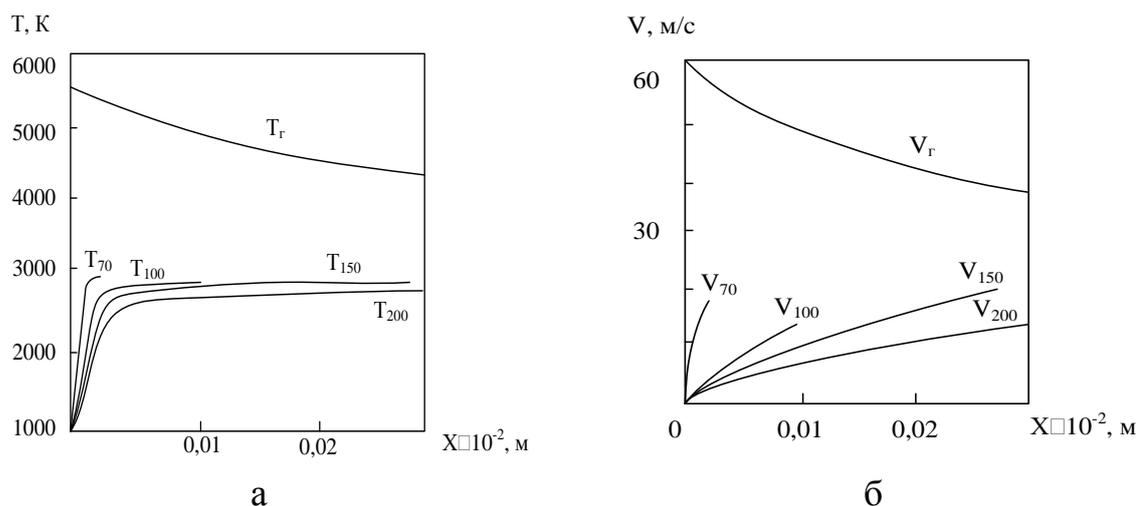
При расчетах принята модель диссоциации оксида вольфрама:



Рассчитывалась температура и скорость частиц и газового потока, время нагрева частиц до температуры плавления  $T_{\text{пл}}$ , время плавления, время нагрева от температуры плавления до температуры диссоциации  $T_{\text{дис}}$ , время нахождения частиц при  $T_{\text{дис}}$  и расстояния, пройденное частицами за эти отрезки времени. Рассматриваемая модель позволяла оценить, происходит полная или частичная диссоциация частиц за время её нахождения при температуре диссоциации. Результаты расчетов приведены в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2 - Условия испарения частиц WO<sub>3</sub>

Размер частиц, мкм	Т, К	Путь (м) и время (сек · 10 <sup>3</sup> )				
		До $T_{\text{пл}}$	$T_{\text{пл}}$	до $T_{\text{дис}}$	$T_{\text{дис}}$	Сумма
70	5400	0,000025	0,000075	0,0004	0,0033	0,0038
		0,0075	0,0225	0,0500	0,1400	0,2200
100		0,000125	0,000375	0,0005	0,0095	0,0105
		0,04	0,12	0,1600	0,4600	0,7800
150		0,00025	0,00075	0,0020	0,0250	0,0280
		0,00825	0,0225	0,3200	1,09	1,7400
200		0,0005	0,0015	0,0040	0,1880	0,194
		0,165	0,495	0,6500	6,5900	7,9000



- а) распределение температуры компонентов пылегазового потока по длине реактора ( $T_r$  –среднемассовая температура азота,  $T_{70} \dots T_{200}$  – температура поверхности частиц оксида вольфрама заданной крупности);  
 б) зависимость скорости частиц оксида вольфрама от крупности  $V$  (70,100, 150, 200 мкм) и скорости плазменного потока  $V_r$

Рисунок 1 – Результаты моделирования параметров переработки порошка  $WO_3$  в плазменном потоке азота

Из полученных результатов следует, что при заданных начальных условиях, соответствующих параметрам работы промышленного плазменного реактора, 100 %-ная степень испарения возможна для частиц оксида вольфрама крупностью не более 200 мкм. (рисунок 1 а). Однако, учитывая фактические габариты существующих плазменных реакторов, в качестве максимального размера частиц исходного оксида вольфрама для синтеза можно рекомендовать крупность не более 150 мкм.

Время испарения частиц определяется количеством тепла, передаваемого плазменным потоком материалу, находится практически в линейной зависимости от начальной температуры азота (рисунок 1, а). Скорость движения частиц в потоке определяется гидродинамическими режимами плазмосырьевого потока и размером частиц сырья и может достигать 20 м/с для частиц крупностью 70 мкм (рисунок 1, б).

Расчеты показывают, что при переработке порошка оксида вольфрама технологически целесообразно поддерживать величину начальной запыленности газового потока в диапазоне 0,01 - 0,02 кг  $WO_3$  на 1 кг плазмообразующего газа - азота, обеспечивающего высокие технологические показатели реактора.

### **Выводы**

Проведено многофакторное математическое моделирование взаимодействия плазменного потока азота с частицами оксида вольфрама различной дисперсности при разных технологических режимах работы промышленного плазменного струйного реактора мощностью 150 кВт для определе-

ния оптимальных условий переработки. Установлено:

– основными факторами, влияющими на перевод конденсированного сырья в газовую фазу, являются энергетические и гидродинамические параметры плазменного потока, а также размер, концентрация и теплофизические свойства частиц исходного сырья;

– параметры промышленного плазменного реактора мощностью 150 кВт обеспечивают для рассматриваемого технологического вариантов эффективную переработку порошкообразного сырья оксида вольфрама крупностью до 200 мкм при концентрации порошков в плазменном потоке азота 0,01 кг/кг.

#### Библиографический список

1. Цветков Ю.В. Плазменная металлургия / Ю.В. Цветков, А.В. Николаев, С.А. Панфилов. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд., 1992. – 265 с.
2. Крапивина С.А. Плазмохимические технологические процессы / С.А. Крапивина. – Л. : Химия, 1981. – 248 с.
3. Моссэ А.Л. Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах / А.Л. Моссэ, И.С. Буров. – Минск : Наука и техника, 1980. – 208 с.
4. Амбразявичус А.Б. Высокотемпературный теплообмен в плазменно-технологических аппаратах : учеб. пособие / А.Б. Амбразявичус, В.К. Литвинов. – Свердловск : УПИ им. С.М. Кирова, 1986. – 89 с.
5. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния : монография: в 3 т. / науч. ред. Г.В. Галевский : дополнительный том. Плазмометаллургическое производство карбида кремния : развитие теории и совершенствование технологии / В.В. Руднева. – М.: Флинта : Наука, 2008.– 387 с.
6. Ноздрин И.В. Теплотехнические характеристики плазмометаллургического реактора для производства тугоплавких боридов и карбидов / И.В. Ноздрин, Л.С. Ширяева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии : сб. науч. тр. – СибГИУ.– Москва: Новокузнецк, 2011.– В.28.– С.106 – 113.
7. Rudneva V.V. Effective Processing of Disperse Raw Materials in a Plasma Reactor / V.V. Rudneva, G. V. Galevskii, E.K. Yurkova // Steel in Translation. – 2007. – Vol.37. – № 2. – P. 115 – 118.
8. Руднева В.В. Модельно-математическое исследование режимов эффективной переработки дисперсного сырья в плазменном реакторе / В.В. Руднева, Г.В. Галевский, Е.К. Юркова // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 5. – С. 52 – 55.
9. Руднева В.В. Компьютерное моделирование режимов эффективной переработки дисперсного сырья в плазменном реакторе / В.В. Руднева, Г.В. Галевский, Е.К. Юркова // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : тр. VI Всерос. научн.-практ. конф. – СибГИУ. – Новокузнецк, 2007. – С. 343 – 346.
10. Ноздрин И.В. Модельно-математическое исследование условий эффективной переработки хромсодержащего сырья в плазменном реакторе /

И.В. Ноздрин, В.В. Руднева, Л.С. Ширяева, М.А. Терентьева. – Изв. вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 2. – С. 13 – 18.

11. Глушко В.П. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : справочник в 4-х томах / В.П. Глушко. – М. : Наука, 1978 – 1982 гг.

12. Spangenberg H.J. Thermodynamische Funktion verschiedener Kohlenwasserstoff – Stickstoff – Verbindungen und Radicals bei hohen Temperaturen und die Zusammensetzung von CHN – Plasmen // Zeitschrift für physikalische Chemie. – 1974. – В. 255. – № 1. – S. 1 – 15.

13. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства окислов : справочник / Г.В. Самсонов [и др.]. – М. : Металлургия, 1978. – 472 с.

14. Кржижановский Р.Е. Теплофизические свойства неметаллических материалов : справочник / Р.Е. Кржижановский, З.Ю. Штерн. – Л. : Энергия, 1973. – 333 с.

15. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства окислов : справочник / Г.В. Самсонов [и др.]. – М. : Металлургия, 1978. – 472 с.

16. Киреев В.А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций / В.А. Киреев. – М. : Химия, 1970. – 519 с.

17. Владимиров Л.П. Термодинамические расчеты равновесия металлургических реакций / Л.П. Владимиров. – М. : Металлургия, 1970. – 528 с.

УДК 669.184

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКЕ**

**Сафонов С.О., Лопатина А.О.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, Россия, sergey.safonov.1950@mail.ru, olegovvna@bk.ru*

*Аннотация. Проведен анализ эффективности применения твердого топлива и его видов в определенные моменты цикла конвертерной плавки, описан механизм воспламенения твердого топлива и его окисления в сталеплавильном агрегате показан механизм взаимодействия твердого топлива с оксидами шлака.*

*Ключевые слова: Топливо, металлолом, подогрев металлолома, продувка, тепловая энергия, окисление металлов, восстановление оксидов.*

## **FEATURES OF THE USE OF SOLID FUEL IN CONVERTER SMELTING**

**Safonov S.O., Lopatina A.O.**

*Siberian industrial state university,  
Novokuznetsk, Russia, sergey.safonov.1950@mail.ru, olegovvna@bk.ru*

*Abstract. The analysis of the efficiency of the use of solid fuel and its types*

## СОДЕРЖАНИЕ

КУЗНЕЦКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЕ ЛИТЕЙЩИКОВ 90 ЛЕТ <i>Князев С.В., Усольцев А.А., Куценко А.И.</i> .....	4
<b>СЕКЦИЯ 1: ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ</b> .....	13
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ ГОЛОВКИ КИСЛОРОДНОЙ ФУРМЫ ДЛЯ ПРОДУВКИ В БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРАХ <i>Протопопов Е.В., Уманский А.А., Морозов И.С., Чернышева Н.А.</i> .....	13
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ ИЗ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА <i>Уманский А.А., Байдин В.В., Симачев А.С., Думова Л.В.</i> .....	21
АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ШАРОВЫХ СТАЛЕЙ С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ <i>Уманский А.А., Протопопов Е.В., Морозов И.С., Симачев А.С., Думова Л.В.</i> .....	29
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАМА КОНВЕРТЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА В КИСЛОРОДНОМ КОНВЕРТЕРЕ <i>Сафонов С.О., Лопатина А.О.</i> .....	34
ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИСТЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ ИЗ ФОСФАТНОГО СЫРЬЯ <i>Шевко В.М., Утеева Р.А., Лавров Б.А., Полатова К.М., Каратаева Г.Е.</i> .....	38
ПЕРЕРАБОТКА БОГАТЫХ ПЫЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОМАРГАНЦА С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ <i>Шевко В.М., Айткулов Д.К., Синельников И.П., Удалов Ю.П., Бадикова А.Д.</i> .....	45
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПЯТИКОМПОНЕНТНОГО ЭКВИАТОМНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Co-Cr-Fe-Mn-Ni <i>Панченко И.А., Дробышев В.К., Бессонов Д.А., Кольчурина М.А., Коновалов С.В.</i> .....	55
ВЫПЛАВКА ЧУГУНА ДЛЯ СМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ИЗЛОЖНИЦ В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ СРЕДНЕЙ И МАЛОЙ ЕМКОСТИ <i>Лубяной Д.Д., Кузнецов И.С., Кухаренко А.В., Князев С.В., Лубяной Д.А.</i> .....	62
ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ АГЛОМЕРАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Бурова Ю.Е., Вязникова Е.А., Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю., Алекторов Р.В.</i> .....	70
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК $K_2O$ , $Na_2O$ , $MgO$ , $Al_2O_3$ НА СВОЙСТВА ШЛАКА ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ <i>Гизатулин Р.А., Дунышин Н.С., Валув Д.В., Худоёргов С.С., Заиркулов Э.Ё.</i> .....	79
КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЛЕГИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ В АТМОСФЕРЕ АНОДНЫХ ГАЗОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ЭКОСОДЕРБЕРГ <i>Пинаев Е.А., Темлянцев М.В., Большаков Д.Г., Темлянцева Е.Н., Куценко А.И.</i> .....	87
КИНЕТИКА ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СМОЛОСВЯЗАННЫХ ОГНЕУПОРОВ ДЛЯ ФУТЕРОВОК СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ <i>Якушевич Н.Ф., Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Протопопов Е.В., Темлянцева Е.Н., Приходько М.С.</i> .....	92
ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВЫПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА <i>Павлов В.В., Романенко Ю.Е., Годик Л.А., Фейлер С.В., Фейлер Д.Т.</i> .....	98

РЕЦИКЛИНГ ПРОКАТНОЙ ОКАЛИНЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ <i>Годик Л.А., Фейлер С.В., Фейлер Д.Т., Романенко Ю.Е.</i> .....	104
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО РАСПЛАВА В УСЛОВИЯХ LD-КОНВЕРТИРОВАНИЯ В ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА <i>Бондар В.И., Мельник С.Г.</i> .....	109
ФУТЕРОВКА СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОГНЕУПОРНЫМ МАТЕРИАЛАМ И УСЛОВИЯМ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ <i>Плохих П.А., Алексеева В.А., Возжол Н.А., Плохих П.А.</i> .....	118
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОКИСЛЕННОСТЬ КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА <i>Сущенко А.В.</i> .....	127
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЕЙНОГО ФЛЮСА НА ОСНОВЕ СМЕСИ КРЕМНЕФТОРИДА И ФТОРИДА НАТРИЯ <i>Аслонов А.А., Ахмадишов И.Ш., Наимов Н.А., Рузиев Дж.Р., Сафиев Х.</i> .....	137
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ТИТАНОТЕРМИИ <i>Усольцев А.А., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Михно А.Р., Князев С.В.</i> .....	142
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГАФНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТЛИВОК В СПЛАВЕ 1570 <i>Зорин И.А., Дриц А.М., Арышенский Е.В., Коновалов С.В.</i> .....	149
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАФНИЯ И ЭРБИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ ЛИТЕЙНОЙ ЗАГОТОВКИ В ВЫСОКОМАГНИЕВОМ АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫМ СКАНДИЕМ <i>Арышенский В.Ю., Арышенский Е.В., Рагазин А.А., Бахтегареев И.Д., Коновалов С.В.<sup>1,2</sup></i> .....	156
О ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ <i>Якушевич Н.Ф., Строкина И.В., Полях О.А., Ноздрин И.В., Безрукова Е.С., Ноздрин Е.В.</i> .....	162
ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ВАННЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ФЕРРОСИЛИЦИЯ <i>Якушевич Н.Ф., Полях О.А., Ноздрин И.В., Аникин А.Е., Ядыкина М.А., Комрони М.</i> .....	168
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБРАЗОВАНИЯ ФЕРРОШПИНЕЛЕЙ <i>Строкина И.В., Полях О.А., Ноздрин И.В., Сюльдина С.А., Комрони М.</i> .....	175
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДА КРЕМНИЯ В ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ <i>Полях О.А., Ноздрин И.В., Строкина И.В., Якушевич, Н.Ф., Хорощенко А.А., Комрони М.</i> .....	180
ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛИНОЗЕМСОДЕРЖАЩЕГО ПРОДУКТА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ <i>Бурдонов А.Е., Новиков Ю.В., Шонходоев З.Ч., Хвостанцева Д.С., Максименко О.А.</i> .....	187
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОКСИДНОГО ВОЛЬФРАМОВОГО СЫРЬЯ В СТРУЙНОМ ПЛАЗМЕННОМ РЕАКТОРЕ <i>Ноздрин И.В., Полях О.А., Лепихов В.С., Аникин А.Е., Комрони М.</i> .....	196
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКЕ <i>Сафонов С.О., Лопатина А.О.</i> .....	205

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕПЦИИ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ НА НАСЛЕДСТВЕННУЮ СТРУКТУРУ В СТАЛИ 09Г2С <i>Солоницын А.Р.</i> .....	211
ПЕРЕРАБОТКА БЕМИТ-КАОЛИНИТОВЫХ БОКСИТОВ БИСУЛЬФАТОМ АММОНИЯ: ОСАЖДЕНИЕ ГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ ИЗ РАСТВОРА АЛЮМОАММОНИЙНЫХ КВАСЦОВ <i>Валеев Д.В.</i> .....	215
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ $CoCrFeMnNi$ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ Fe И Mn <i>Панченко И.А., Гостевская А.Н., Коновалов С.В., Безродная Е.А., Бессонов Д.А.</i> .....	220
МЕТОДИКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ <i>Рыбенко И.А., Конголи Ф.</i> .....	225
<b>СЕКЦИЯ 2: ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА</b> .....	231
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА ПОЛОСЫ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ <i>Кожевников А.В., Смирнов А.С., Платонов Ю.В., Кожевникова И.А.</i> .....	231
ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК10КС ПОСЛЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ <i>Осколкова Т.Н., Фастыковский А.Р.</i> .....	236
ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СЖАТИЕМ <i>Акёнова К.В., Громов В.Е., Кибко Н.В., Ващук Е.С.</i> .....	242
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, СТРУКТУРУ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ В СРЕДЕ СЕРОВОДОРОДА ПРОКАТА ИЗ СТАЛИ 20 <i>Валюгин М.А., Мурсенков Е.С.</i> .....	248
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ <i>Платонов Ю.В.</i> .....	255
СПОСОБ РАСЧЕТА СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ «МЯГКОГО» ОБЖАТИЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ УСАДКИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ОСЕВОЙ РЫХЛОСТИ <i>Кабаков З.К., Габеляя Д.И., Чуев А.А.</i> .....	261
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДРЕССИРОВКИ ШИРОКИХ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ТРАВЛЕННЫХ ПОЛОС <i>Антонов П.В., Парфенов Н.С., Болобанова Н.Л., Тимофеева М.А.</i> .....	267
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ТАКТОВОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕЛЬСОБАЛОЧНОГО СТАНА <i>Головатенко А.В., Фастыковский А.Р., Мусатова А.И.</i> .....	272
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРОКАТКОЙ <i>Фастыковский А.Р., Осколкова Т.Н., Вахроломеев В.А., Глухов М.И., Прудников А.Н.</i> .....	278
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ДЛИННОМЕРНЫХ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСОВ ПОСЛЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ <i>Кузнецов Р.В., Юрьев А.А., Шлярова Ю.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф.</i> .....	284
СИНТЕЗ КОМПЛЕКСНОЙ НОРМАТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАРТИИ ПРОКАТНОЙ ПРОДУКЦИИ <i>Мусатова А.И., Кулаков С.М., Фастыковский А.Р.</i> .....	289

ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТА Ti/TiB, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ <i>Озеров М.С., Поволяева Е.А., Громашова Д.В., Волокитина Е.И.</i> .....	298
ТЕРМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПРЕССОВОК ИЗ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА <i>Прудников А.Н., Прудников В.А., Рексиус В.С.</i> .....	303
ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ <i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Жибинова И.А.</i> .....	310
ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ <i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Прудников А.Н., Жибинова И.А.</i> .....	315
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ МАРКИ К76Ф НА УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ <i>Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В., Сафонов С.О.</i> .....	323
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ДОБАВКАМИ ДИОКСИДА ТИТАНА <i>Хамид. Махан М., Коновалов С.В., Куценко А.А., Цветков А.В., Панченко И.А.</i> .....	327
ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Васильев А.А., Колбасников Н.Г.</i> .....	332
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОКАТКИ РЕЛЬСЫ В НЕПРЕРЫВНОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ QFORM <i>Белопицкая Е.С., Соловьев В.Н.</i> .....	341
УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРУКТУРОЙ ТРУБНЫХ МАРОК СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Колбасников Н.Г., Жуков Н.В.</i> .....	348
ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ТИПА «МОРЩИНА» ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ СОРТОВОЙ СТАЛИ <i>Колбасников Н.Г., Адигамов Р.Р., Шишов И.А., Зайцев А.М.</i> .....	356
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СПЛАВЫ СЕРИИ AL-MG-SI С ИЗБЫТКОМ КРЕМНИЯ И НЕБОЛЬШИМИ ДОБАВКАМИ СКАНДИЯ И ЦИРКОНИЯ <i>Арышенский Е.В., Лапшов М.А., Солопаев М.В., Коновалов С.В.</i> .....	367
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ РЕЛЬСОВ <i>Сарычев В.Д., Филяков А.Д., Чумаков И.И., Коновалов С.В.</i> .....	374
ВЛИЯНИЕ МЕДИ НА СТРУКТУРУ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ СПЛАВОВ AL – 40%Si <i>Афанасьев В. К., Попова М.В., Малюх М.А.</i> .....	379

Научное издание

**МЕТАЛЛУРГИЯ:  
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО**  
*«Металлургия – 2022»*

Труды XXIII 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 16.11.2022 г.  
Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офисная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 22,8 Уч.-изд. л. 25,2 Тираж 300 экз. Заказ № 295

Сибирский государственный индустриальный университет  
654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42  
Издательский центр СибГИУ