

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Сибирский государственный индустриальный университет**

*Посвящается 90-летию Сибирского  
государственного индустриального университета*

**МЕТАЛЛУРГИЯ:  
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО  
«Металлургия – 2019»**

*23 – 24 октября 2019 г.*

*Труды  
XXI Международной научно-практической конференции  
Часть 1*

**Новокузнецк  
2019**

УДК 669(06)+658.012.056(06)  
М 540

Редакционная коллегия  
академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,  
д.т.н., профессор М.В. Темлянцев, д.т.н., профессор Г.В. Галевский,  
д.т.н., профессор Н.А. Козырев, д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский,  
к.т.н., доцент С.Г. Коротков

М 540      Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XXI Международной  
научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 1 / под ред. Е.В. Протопопова;  
Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2019. – 398 с. : ил.

ISSN 2542-1670

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и  
технологии производства, обработки и сварки металлов, энергоресурсосбережения,  
рециклинга и экологии в металлургии.

#### **ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

Администрация Кемеровской области  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»  
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»  
АО «Русал Новокузнецк»  
АО «Кузнецкие ферросплавы»  
ОАО «Черметинформация»  
Издательство Сибирского отделения РАН  
Журнал «Известия вузов. Черная металлургия»  
Журнал «Вестник СибГИУ»  
Журнал «IOP conference series: materials science and engineering»  
АО «Кузбасский технопарк»  
Западно – Сибирское отделение Российской Академии естественных наук  
Совет молодых ученых Кузбасса

ISSN 2542-1670

© Сибирский государственный  
индустриальный университет, 2019

ре удаления от шва. Также в микроструктуре сварного соединения выявлена крупнозернистая структура (2-3 номер шкалы ГОСТ 5639-82) характерная для перегретого металла.

#### Библиографический список

1. Multi-factor regression analysis of the process of rails contact welding on K1000 machine / R A Shevchenko, N A Kozyrev, R E Kryukov, A O Patrushev, A A Usoltsev // Metallurgy2017. IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 411 (2018) 012088| doi:10.1088/1757-899X/411/1/012088.

2. Методика определения электрического сопротивления рельсовой стали / В.А. Кузнецов, Р.А. Шевченко, А.А. Усольцев, Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. -2018 - Вып. 40 -С. 111-117.

3. Совершенствование технологии электроконтактной сварки и термообработки железнодорожных рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. -2018 - Вып. 40 -С. 63-68.

4. Методика исследования влияния режимов изотермического отжига при сварке рельсов откаточных путей горных выработок / Шевченко Р.Е., Козырев Н.А., Куценко А.И., Усольцев А.А., Куценко А.А. // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2018. - № 4. – с. 269-273.

5. Современные технологии сварки железнодорожных рельсов/ Н.А. Козырев, Р.А. Шевченко, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков, С.В. Князев // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018.– Вып.2 (1418). - С. 62-68.

6. Определение оптимальных режимов работы рельсосварочной машины K1000 / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев, С.Н. Кратько, П.Е. Шишкин / Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отделение) -2017. - вып.20. -С. 118-126.

7. Разработка новой технологии сварки рельсов для высокоскоростного движения / Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А.// Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018.– Вып.8(1424). - С.50-57.

8. Новая технология сварки железнодорожных рельсов / Протопопов Е.В., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Шевченко Р.А., Усольцев А.А. // Сб. Трудов. XV Международного конгресса сталеплавателей (г. Москва-Тула, 15-19 октября 2018г) – М: МОО «Ассоциация сталеплавателей», 2018. – С. 296-300.

9. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением: монография / С. И. Кучук-Яценко, В. К. Лебедев; – Киев. «Наукова думка», 1976. – 216 с.

УДК 669.14.018.28

### РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ПЛАЗМОСИНТЕЗА ДИБОРИДА ТИТАНА

Галевский Г.В.<sup>1</sup>, Руднева В.В.<sup>1</sup>, Оршанская Е.Г.<sup>1, 2</sup>, Ефимова К.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет,

г. Новокузнецк, Россия, kafcmet@sibsiu.ru

<sup>2</sup>Группа компаний «Сибирский проект»,

г. Новокузнецк, Россия, efimovaksenia@mail.ru

**Аннотация.** Разработана комплексная многофакторная математическая модель плазмосинтеза диборида титана. Модель включает 3 подмодели: «Плазмогенерация», «Испарение сырья», «Боридообразование». Модель обеспечивает выполнение многовариантных исследовательских и инженерных расчетов технологических показателей плазмоперера-

ботки различных видов титансодержащего сырья, промпродуктов и отходов. Сходимость прогнозных и практических результатов для различных видов сырья составляет 10,4-12,9 %. Во всех случаях отмечаются более низкие значения практических данных по сравнению с расчетными, что обусловлено влиянием неизотермичности газа-теплоносителя.

**Ключевые слова:** плазмогенерация, испарение сырья, титан-борсодержащее сырье, модель, плазмосинтез, диборид титана, боридообразование, сходимость результатов.

## DEVELOPMENT AND APPLICATION OF COMPLEX MODEL OF PLASMA SYNTHESIS OF THE TITANIUM DIBORIDE

Galevskiy G.V.<sup>1</sup>, Rudneva V.V.<sup>1</sup>, Orshanskaya E.G.<sup>1</sup>, Efimova K.A.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Group of companies «Siberian Project»,  
Novokuznetsk, Russia, efimovaksenia@mail.ru*

**Abstract:** The complex multiple-factor mathematical model of plasma synthesis of the titanium diboride is developed. The model includes 3 submodels: «Plazmogeneration», "Raw materials evaporation", «Boride formation». The model provides performance of multiple research and engineering calculations of technological indicators of a plasma processing of different types of titaniferous raw materials, promprodukt and waste. The convergence of expected and practical results for different types of raw materials is 10.4-12.9%. In all cases lower values of practical data in comparison with settlement are noted that is caused by influence of a nonisothermal of gas heat carrier.

**Keywords:** plazmogeneration, raw materials evaporation, the titan-boron-containing raw materials, model, plasma synthesis, titanium diboride, boride formation, convergence of results.

Для решения проектно-технологических задач и выполнения многовариантных исследовательских и инженерных расчетов эффективной плазмометаллургической переработки различных видов титансодержащего сырья, промпродуктов и отходов разработана комплексная модель боридообразования.

Классический подход к построению комплексной многофакторной детерминированной модели сложного металлургического процесса предполагает разделение его на составляющие подпроцессы и формирование соответствующих подмоделей на основе совместного решения описывающих их систем математических уравнений [1]. Учитывая, что решение уравнений проводится в условиях неизбежности целого ряда допущений, результаты моделирования носят прогнозный характер. Тем не менее, для исследования металлургических процессов математическое моделирование распространено достаточно широко, поскольку при соответствующем компьютерном программном обеспечении позволяет проводить многовариантные расчеты и обеспечивает накопление важной для технологического проектирования информации.

Для правильного построения комплексной модели необходима корректная по физико-химической сущности постановка задач, решаемых в рамках каждой подмодели. Из 7 составляющих плазмообработку порошкообразной шихты последовательно реализуемых технологических процессов (стадий), три стадии являются основными, определяющими качество диборида как товарного продукта. Это – 1) генерация высокоэнтальпийного потока газа-теплоносителя; 2) смешивание порошкообразного сырья с плазмой, его нагрев и испарение; 3) формирование реакционной боридообразующей смеси, образование  $TiB_2$  и формирование его наночастиц как результат протекания процессов коалесценции и коагуляции. Это предопределяет возможность построения модели на основе трех подмоделей: «Плазмогенерация» (1); «Испарение сырья» (2); «Боридообразование» (3).

Подмодель 1 «Плазмогенерация» основана на использовании следующих расчетных зависимостей тепловых и газодинамических характеристик плазменных струй, генерируемых в плазмотронах, и плазменного потока, формирующегося в камере смешения реактора:

$$U = \frac{11044}{10^{0,03M}} \left( \frac{G}{I \cdot d_1} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$\eta_n = [1 + 5,85 \cdot 10^{-5} \left( \frac{I^2}{G_g \cdot d_1} \right)^{0,27} \cdot \left( \frac{G_g}{d_1} \right)^{-0,27} \cdot (P_{N_2} \cdot d_1)^{0,3} \cdot \left( \frac{l_1}{d_1} + \frac{l_2}{d_2} \right)^{0,5}] \quad (2)$$

$$H_c = \frac{N_n \cdot \eta_n}{G_g} \quad (3)$$

$$T_c = f(H_c) \quad (4)$$

$$Re_c = \frac{v_c \cdot d_2 \cdot \rho_c}{\mu_c} \quad (5)$$

$$N = 3 \cdot P \cdot \eta_n \cdot \eta_{к.с} \quad (6)$$

$$H_n = \frac{N}{3G_g} \quad (7)$$

$$T_n = f(H_n) \quad (8)$$

$$Re_n = \frac{v_n \cdot d_2 \cdot \rho_n}{\mu_n} \quad (9)$$

В уравнениях (1-9) приняты следующие обозначения:  $N_n$  – заданная мощность плазмотрона, кВт;  $U$  – напряжение на дуге, В;  $I$  – ток дуги, А;  $M$  – молекулярная масса азота;  $G_g$  – массовый расход плазмообразующего газа в плазмотроне, кг/с;  $d_1$  и  $l_1$  – диаметр и длина дугового канала плазмотрона, м;  $d_2$  и  $l_2$  – диаметр и длина уступа плазмотрона, м;  $P_{N_2}$  – давление азота на выходе из плазмотрона, Па;  $H_c$  и  $H_n$  – удельная энтальпия плазменной струи и плазменного потока соответственно на выходе из анода плазмотрона и на входе в канал реактора, кДж/кг;  $T_c$  и  $T_n$  – среднemasсовая температура плазменной струи и плазменного потока соответственно на выходе из анода плазмотрона и на входе в канал реактора, К;  $\eta_n$ ,  $\eta_{к.с}$  – тепловые КПД плазмотрона и камеры смешения, доли ед.;  $N$  – полезная мощность, подводимая к реактору, кВт;  $Re_c$ ,  $Re_n$  – числа Рейнольдса, определенные для условий истечения плазменной струи из анода и вхождения плазменного потока в канал реактора;  $v_c$ ,  $\rho_c$ ,  $\mu_c$  – скорость, плотность и вязкость плазменной струи при температуре  $T_c$  соответственно м/с, кг/м<sup>3</sup>, Па·с;  $v_n$ ,  $\rho_n$ ,  $\mu_n$  – скорость, плотность и вязкость плазменного потока при температуре  $T_n$  соответственно м/с, кг/м<sup>3</sup>, Па·с.

Уравнения (1, 2) получены научной школой академика РАН М.Ф. Жукова [2] для работающего на азоте плазмотрона серии ЭДП-104А на основе обработки экспериментальных данных с использованием теории подобия. Подмодель обеспечивает прогнозирование тепловых и газодинамических характеристик формируемых в плазмотронах плазменных струй и формируемого в камере смешения при их соударении плазменного потока в зависимости от расхода плазмообразующего газа и подводимой к плазмотронам мощности.

Подмодель 2 «Испарение сырья» предложена А.Л. Моссэ и И.С. Буровым, основана на совместном решении уравнений движения сырья, межкомпонентного теплообмена и теплообмена плазменного потока со стенками реактора, обеспечивает прогнозирование энергетических режимов эффективной переработки различного титан-борсодержащего сырья. При этом учитывается зависимость степени испарения  $K_p$  от характеристики сырья (плотности  $\rho_p$ , удельной теплоемкости  $C_p$ , коэффициента теплопроводности  $\lambda_p$ , температур начальной  $T_{p0}$ , плавления  $T_{pm}$ , испарения  $T_{pr}$ , теплот плавления  $\Delta H_m$  и испарения  $\Delta H_r$ , диаметра частицы  $d_p$  и коэффициента её формы  $f_p$ ) и параметров работы реактора и процесса (мощности, подводимой в реактор  $N$ , массового расхода плазмообразующего  $G_g$  и транспортирующего газа  $G_t$ , сырья  $\mu_p$ , диаметров каналов реактора  $D$  и фурмы  $D_0$ )

$$K_p = f(\rho_p, C_p, \lambda_p, T_{pm}, T_{pr}, \Delta H_m, \Delta H_r, d_p, f_p, G_g, G_t, \mu_p, D \text{ и } D_0).$$

Подмодель 3 «Боридообразование» должна основываться на уравнениях, учитывающих

влияние кинетических факторов на выход (содержание в продуктах) диборида титана, и уравнениях, описывающих эволюцию дисперсности его частиц в условиях плазменного потока.

Кинетические уравнения должны быть составлены для наиболее вероятных реакций боридообразования. Однако проведение высокотемпературных кинетических расчетов применительно к процессам с участием конденсированной фазы в плазме атмосферного давления методами классической химической кинетики затруднено из-за отсутствия информации о наиболее вероятных реакциях боридообразования и полного отсутствия данных об их константах скоростей для исследуемой области температур. В связи с этим более реальным представляется макрокинетический подход, предполагающий выбор для подмодели полученных уравнений вида

$$[\text{TiB}_2], [\text{Ti}_{\text{своб.}}], [\text{B}_{\text{своб.}}], [\text{C}][\text{TiO}_2] = f(K_p, T_0, T_3, \{\text{H}_2\}, [\text{B}], \{\text{CH}_4\}) \quad (10)$$

Уравнения описывают зависимость содержания диборида титана в продуктах плазмообработки от степени испарения сырья  $K_p$ , начальной температуры  $T_0$ , температуры закалки  $T_3$ , количества бора в шихте  $[\text{B}]$ , концентрации водорода в плазмообразующем газе  $\{\text{H}_2\}$ , количества восстановителя  $\{\text{CH}_4\}$  для  $\text{TiO}_2$ .

Полученные при изучении особенностей процесса боридообразования в условиях плазменного потока результаты свидетельствуют о высокой вероятности образования  $\text{TiB}_2$  при кристаллизации титан-борсодержащего расплава - продукта борирования бороводородами металлического аэрозоля, формирующегося при объемной конденсации паров титана. Такое видение процесса боридообразования предполагает возможность формирования наночастиц по механизмам коалесценции и коагуляции, реализуемым в различных температурных зонах. Следовательно, изменение размеров частиц  $\text{TiB}_2$  в этом случае происходит в объеме плазменного потока в интервале температур от конденсации паров титана до кристаллизации  $\text{TiB}_2$ . Это предопределяет как минимум, двухэтапное рассмотрение этого сложного процесса. Однако проведенный анализ профильной научно-технической литературы в частности, работ [8, 9] свидетельствует о том, что до сих пор не разработана универсальная комплексная модель процесса конденсации, хотя и предложены варианты теоретического прогнозирования дисперсности твердых частиц конденсационного происхождения. Так, в работах [8, 9] выполнено теоретическое математическое моделирование процесса объемной конденсации для количественного прогнозирования дисперсности образующихся нанопродуктов. Однако модель не адаптирована к системе с химическими превращениями, не учитывает сложные неизотермические турбулентные течения в объеме плазменного потока, а расчетные уравнения предполагают использование целого ряда теоретически и экспериментально неопределимых коэффициентов. В работах [8, 9] отсутствуют проверка модели, результаты моделирования конкретных процессов, что ограничивает прикладную значимость достигнутых авторами результатов.

В работах [6-7] представлена трехмерная модель формирования наночастиц по коагуляционному механизму в плазменном реакторе с ограниченным струйным течением на базе электродугового плазмотрона. Математическое описание пространственной задачи формирования наночастиц в реакторе включает уравнения Навье-Стокса, усредненные по Рейнольдсу, уравнения транспорта термической энергии, учитывающие радиационный теплообмен для оптически непрозрачной среды, уравнения для функции распределения частиц по размеру, начальные и граничные условия. Программа моделирования процесса формирования наночастиц в плазменном реакторе реализована в среде программного комплекса ANSYS/CFX 12.1 с использованием программной платформы ANSYS Workbench.

При построении модели были приняты следующие допущения: время образования первичных частиц значительно меньше времени их коагуляционного роста в рабочей зоне реактора; рост частиц в этой зоне рассматривается не с образования зародышей, а с появления частиц размером 1 нм в зоне реактора, определяемой изотермой конденсации вещества частиц; рост наночастиц осуществляется в результате неупругих столкновений частиц, находящихся в жидком состоянии, то есть в температурной зоне, ограниченной температурами кристаллизации (затвердевания)  $T_{\text{min}}$  и кипения  $T_{\text{max}}$ .

С использованием разработанной модели были выполнены расчеты формирования

наночастиц W, Cu и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – материалов с сильно различающимися температурами фазовых превращений – и проведена экспериментальная проверка их результатов. Установлено, что для повышения точности описания формирования наночастиц в процессах, характеризующихся значительными тепловыми эффектами (окисление Al), необходимо учитывать их вклад в баланс энергии, а при моделировании формирования наночастиц с низкой температурой плавления необходимо учитывать возможные процессы их спекания в слое. Достигнутые авторами работ [6, 7] результаты свидетельствуют, с одной стороны, о достаточно высоком уровне моделирования, а с другой – о необходимости адаптации модели к многокомпонентным системам с химическим взаимодействием, поиска решений, обеспечивающих при моделировании оценку вклада в укрупнение наночастиц как коалесценции, так и коагуляции.

Отмеченные выше и пока непреодолимые недостатки известных математических моделей формирования наночастиц в условиях плазменного потока побудили ряд исследователей к экспериментальному изучению температурной зависимости среднего размера частиц при их укрупнении [10-17]. Зондирование плазменного потока при различных температурах и исследование отобранных проб методами электронной микроскопии и БЭТ позволило получить температурную зависимость их дисперсности в виде

$$d = AT^{-m} \quad (11)$$

где d – средний размер частиц;

A – коэффициент, зависящий от физических свойств конденсата;

T – температура плазменного потока

Полученная авторами [17] подобная зависимость для получения в плазменном потоке TiB<sub>2</sub> из реакционной смеси (TiO<sub>2</sub>+B+C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>+C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) и интервала температур 2500-3200 К имеет следующий вид (d в м)

$$d = (1,46 \pm 0,025) \cdot 10^{-5} \cdot T^{-0,741 \pm 0,165} \quad (12)$$

Эта температурная зависимость принята в качестве расчетной для описания эволюции дисперсности TiB<sub>2</sub>.

Структура математической модели процессов боридообразования приведена на рисунке 1. Для моделирования процесса боридообразования создана компьютерная программа «Моделирование плазменного синтеза бориды титана», представляющая завершённый продукт с возможностью реализации на компьютерах класса IBMPC под управлением MS Windows и установленным Microsoft Accesses.

Язык программирования - Visual Basic for Application. Разработанная программа вместе с программами подмоделей 1 «Плазмогенерация» и 2 «Испарение сырья» образуют программное обеспечение комплексной математической модели процессов боридообразования, позволяющее осуществлять многовариантные исследовательские и инженерные расчеты параметров эффективной переработки различных титан-борсодержащих сырьевых материалов в диборид TiB<sub>2</sub>. Программа зарегистрирована в объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» РАО (свидетельство о регистрации электронного ресурса № 21506 от 07.12.2015) [18].

С использованием разработанной математической модели выполнены расчеты параметров плазменных струй и потока, условий эффективного испарения порошкообразного сырья и боридообразования, эволюции дисперсности боридных наночастиц, результаты которых представлены на рисунках 2 – 6. Можно видеть, что эффективность процессов боридообразования напрямую определяется условиями испарения сырья, газификации бора и пиролиза метана.

Точность разработанной модели оценивалась двумя методами:

- для варианта 1 (Ti+B+H<sub>2</sub>) с использованием проверочной выборки, полученной при переработке в плазменном реакторе шихты, содержащей порошок титана марки ПТМ крупностью – 40 мкм;

- для варианта 2 (TiO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+B+H<sub>2</sub>) путем сопоставления расчетной степени испарения TiO<sub>2</sub> и экспериментально определенной степени её восстановления в условиях плазменного потока; степень восстановления определялась по соотношению фактической и равновесной концентрации монооксида углерода в технологических газах.

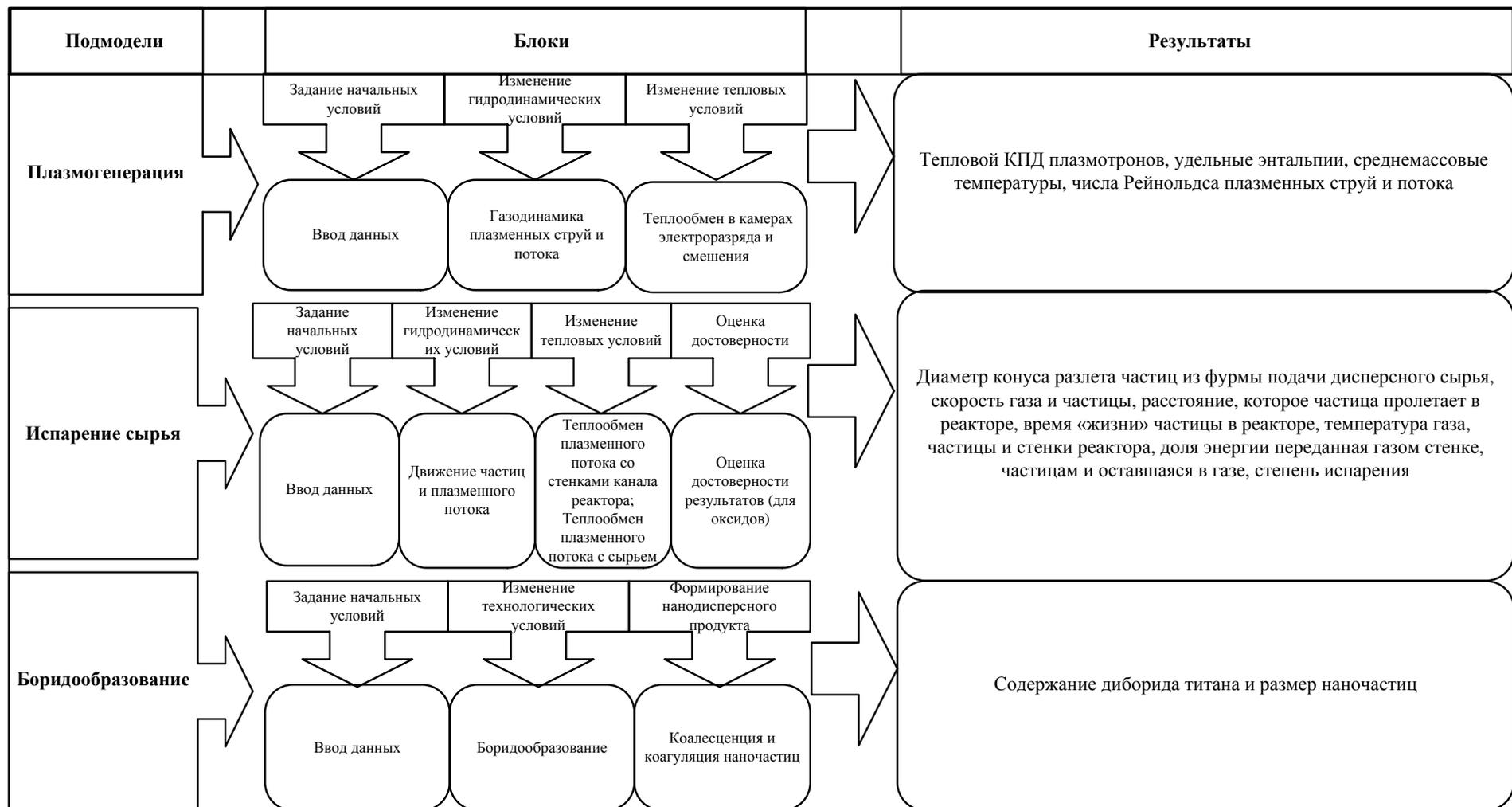


Рисунок 1 - Структура математической модели процессов боридообразования

Результаты оценки точности для варианта 1 приведены в таблице 1, а для варианта 2 в таблице 2 и подтверждают достаточную сходимость прогнозных и практических результатов. Во всех случаях отмечаются более низкие значения практических данных по сравнению с расчетными, что обусловлено, по-видимому, влиянием неизотермичности потока газа - теплоносителя.

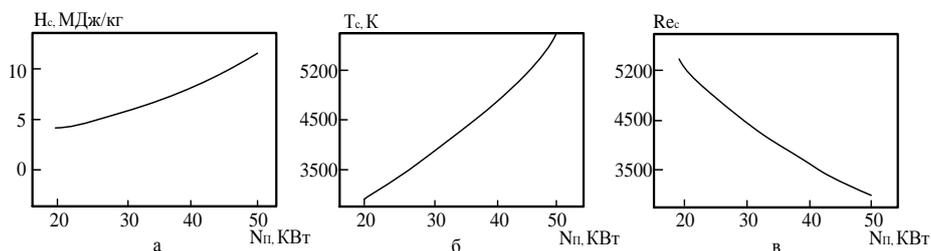


Рисунок 2 – Зависимость удельной энтальпии (а), среднемассовой температуры (б) и числа Рейнольдса (в) плазменной струи на входе в камеру смешения от мощности плазмотрона ( $G_g = 3 \cdot 10^{-3}$  кг/с)

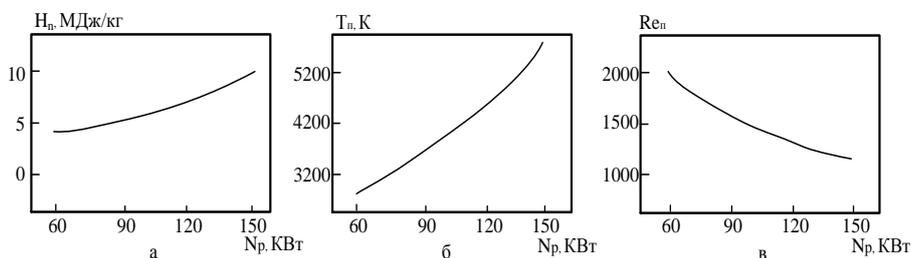
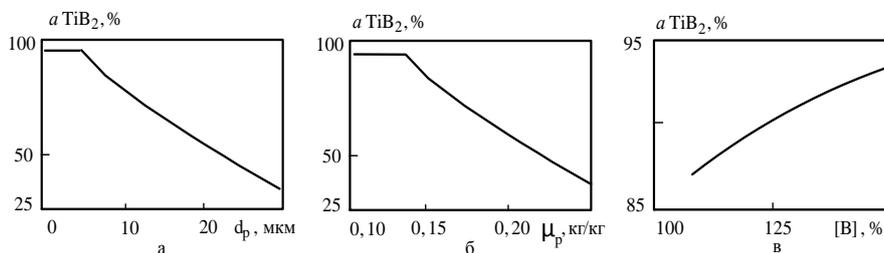


Рисунок 3 – Зависимость удельной энтальпии (а), среднемассовой температуры (б) и числа Рейнольдса (в) плазменного потока на входе в канал реактора от его мощности ( $G_g = 3 \cdot 10^{-3}$  кг/с,  $D = 0,054$  м)



- а)  $\mu_p = 0,14$  кг/кг,  $T_{п} = 5400$  К,  $T_3 = 2800$  К,  $[B] = 112,5$  %,  $\{H_2\} = 10$  % об.;  
 б)  $d_p = 5$  мкм,  $T_{п} = 5400$  К,  $T_3 = 2800$  К,  $[B] = 112,5$  %,  $\{H_2\} = 10$  % об.;  
 в)  $d_p = 5$  мкм,  $\mu_p = 0,14$  кг/кг,  $T_{п} = 5400$  К,  $T_3 = 2800$  К,  $\{H_2\} = 10$  % об.

Рисунок 4 – Зависимость содержания (а) диборида титана в продуктах плазмообработки от крупности порошка титана (а), его массовой расходной концентрации (б) и содержания бора в шихте (в) (Вариант 1 -  $(Ti+B+H_2)$ )

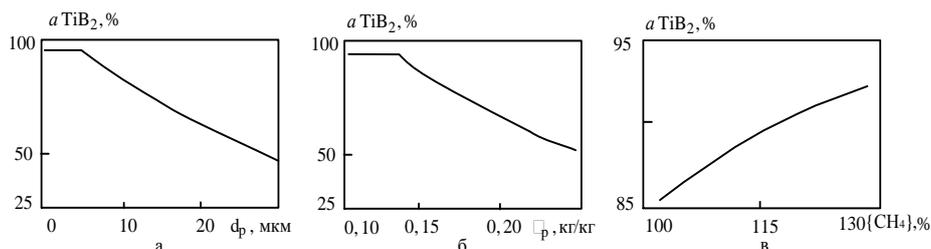


Рисунок 5 – Зависимость содержания (а) диборида титана в продуктах плазмообработки от крупности порошка титана (а), его массовой расходной концентрации (б) и расхода метана (в) (Вариант 2 -  $(TiO_2+CH_4+B+H_2)$ )

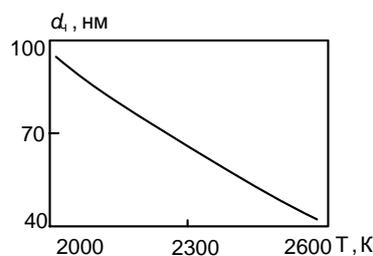


Рисунок 6 – Эволюция дисперсности наночастиц диборида титана в плазменном потоке

Таблица 1 – Сравнение расчетных и экспериментальных результатов для варианта 1

T <sub>0</sub> , К	Содержание диборида титана, %							Отклонение, %
	У <sub>расч.</sub>	у <sub>э</sub> <sup>1</sup>	у <sub>э</sub> <sup>2</sup>	у <sub>э</sub> <sup>3</sup>	у <sub>э</sub> <sup>4</sup>	у <sub>э</sub> <sup>5</sup>	у <sub>э ср</sub>	
5400	36,6	34,9	32,1	31,2	30,5	30,9	31,9	12,9
5000	24,3	21,3	20,9	19,4	22,2	21,5	21,1	12,8

Таблица 2 – Сравнение расчетных и экспериментальных результатов для варианта 2

T <sub>0</sub> , К	Степень испарения, %	Степень восстановления α, %				Отклонение, %
		α <sub>э</sub> <sup>1</sup>	α <sub>э</sub> <sup>2</sup>	α <sub>э</sub> <sup>3</sup>	α <sub>э ср</sub>	
5400	100,0	88,1	90,9	89,8	89,6	10,4
5000	82,0	71,3	69,2	72,9	71,7	12,6

### Заключение

Разработана комплексная многофакторная математическая модель процессов боридообразования, протекающих при плазмометаллургической переработке титанборсодержащего сырья, включающая 3 подмодели: 1 – «Плазмогенерация», 2 – «Испарение сырья», 3 – «Боридообразование». Модель имеет блочную структуру и позволяет рассчитывать параметры плазменных струй и потока, условия эффективного испарения порошкообразного сырья и боридообразования, эволюцию дисперсности боридных наночастиц. Для подмодели 3 «Боридообразование» создана компьютерная программа (Свидетельство №21509 о регистрации в ОФЭР «Наука и образование» РАО). Подтверждена эффективность применения комплексной математической модели для выполнения исследовательских и инженерных расчетов технологических показателей плазмопереработки различных видов титан-содержащего сырья.

### Библиографический список

1. Цымбал В.П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии : учебник для вузов / В.П. Цымбал. – Кемерово, М.: Кузбассвузиздат, 2006. – 431 с.
2. Жуков М.Ф. Плазмотроны. Исследования. Проблемы / М.Ф. Жуков [и др.] - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995, - 203 с.
3. Tovbin Yu.K. Molecular Theory of Spherical Drops in the Vapor Phase / Yu.K. Tovbin // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2010. – Vol. 84. – No.10. – P. 1717–1730.
4. Tovbin Yu. K. Problems in the Physicochemical Analysis of Solids/ Yu.K. Tovbin // Russian Journal of Physical Chemistry A. –2014. –Vol. 88. – No. 11. – P. 1965–1979.
5. Коренченко А. Е. Математическое моделирование газофазной конденсации металлических наночастиц в камере с дугowym разрядом/ А. Е. Коренченко, В. Джамал Джамал // Вестник Южно-Ур. ун-та. Сер. Матем. Мех. Физ. – 2016. – №8/4. – С. 56–62
6. Самохин А. В. Моделирование процесса синтеза нанопорошков в плазменном реакторе струйного типа. I. Постановка задачи и проверка модели / А. В. Самохин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. — 2013. — № 6. — С. 40–46.
7. Самохин А. В. Моделирование процесса синтеза нанопорошков в плазменном реакторе струйного типа. II. Формирование наночастиц / А. В. Самохин [и др.] // Физика и хи-

мня обработки материалов. — 2014. — №3. — С. 12–17.

8. Сутугин А.Г. Предсказание дисперсности твердых частиц конденсационного происхождения / А.Г. Сутугин, Э.И. Котцев // Инж.-физ. журнал. — 1977. — Т. 32. — № 3. — С. 340 – 347.

9. Сутугин А.Г. Кинетика образования малых частиц при объемной конденсации / А.Г. Сутугин // Физико-химия ультрадисперсных систем : сб. науч. тр. — М. : Наука, 1987. — С. 15 – 20.

10. Алексеев Н.В. Управление дисперсностью металлических порошков, полученных в струйном плазмохимическом реакторе / Н.В. Алексеев, И.И. Гречиков // Плазменные процессы в химической промышленности : сб. науч. тр. — Черногоровка : ИНХП АН СССР, 1987. — С. 54 – 72.

11. Пегов В.С. Механизм роста субмикронных частиц вольфрама и нитрида кремния в высокоэнтальпийных газовых потоках / В.С. Пегов, И.В. Евгенов // Физико-химия ультрадисперсных систем : сб. науч. тр. — М.: Наука, 1987. — С. 180 – 186.

12. Красовская Л. И. Плазмохимические процессы в трехструйных электродуговых реакторах / Л. И. Красовская, А. Л. Моссэ . — Минск: АНК «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси, 2000. — 196 с.

13. Жуков А.С. Оценка морфологии частиц при плазмохимическом синтезе керамических порошков / А. С. Жуков, В. А. Архипов, С. С. Бондарчук, В. Д. Гольдин // Химическая физика. — 2013. — Т. 32. — № 12. — С. 52 – 58.

14. Ноздрин И.В. Синтез и эволюция дисперсности боридов и карбидов ванадия и хрома в условиях плазменного потока / И.В. Ноздрин, Г.В. Галевский, Л.С. Ширяева // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2011. — № 10. — С. 12 – 17.

15. Ноздрин И.В. Кинетика и механизм роста наночастиц тугоплавких соединений в условиях плазменного синтеза / И.В. Ноздрин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Л.С. Ширяева, М.А. Терентьева // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии: сб. науч. тр. / СибГИУ. — Москва – Новокузнецк, 2012. — В. 29. — С. 83 – 93.

16. Galevsky G.V. Particle size of vanadium and chromium borides and carbides an plasma flux/ G.V. Galevsky, I.V. Nozdrin, L.S. Shyryaeva, M.A. Terenteva// Steel in Translation. — 2011.— Vol.41.— №.10. — С.799 – 804.

17. Solonenko O.P. Thermal plasma and new materials technology: in 2 vol. V.2. Investigations and design of thermal plasma technologies / O.P. Solonenko, L.S. Polak, A.G. Gnedovets e.a.; ed. by O.P. Solonenko and M.F. Zhukov— Cambridge: Cambridge Intersci. — 1995. — 533 p.

18. Свидетельство № 21506 о регистрации электронного ресурса «Программа «Моделирование плазменного синтеза боридов титана» в объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» РАО / Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова. — М. : ИНИПИ, 2015.

УДК 519.237: 669.018.25

## **ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НОВЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК СИСТЕМЫ Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo**

**Козырев Н.А., Усольцев А.А., Гусев А.И., Осетковский И.В., Михно А.Р.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, Россия, kozyrev\_na@mtsp.sibsiu.ru*

*Аннотация. Для оценки совместного влияния химического состава порошковых проволок на износ и твердость наплавленного слоя использовались математико-статистическими методы, которые позволяют выявить закономерности изменения результирующего показателя в зависимости от поведения различных факторов по известным методикам. По результатам проведенного многофакторного корреляционного анализа были определены зависимости твердости наплавленного слоя и его износостойкости от массо-*

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СЕКЦИЯ 1: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ</b> .....	<b>4</b>
МЕТАЛЛУРГИЯ КУЗБАССА: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ <i>Протопопов Е.В., Темлянец М.В., Галевский Г.В., Козырев Н.А., Коротков С.Г., Фастыковский А.Р.</i> .....	4
СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ <i>Протопопов Е.В., Калиногорский А.Н., Ганзер Л.А.</i> .....	9
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ <i>Фастыковский А.Р.</i> .....	14
ФЕРРОСПЛАВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО: СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ В МИРЕ И РОССИИ <i>Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Ёлкин К.С., Голодова М.А.</i> .....	20
НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ <i>Козырев Н.А.<sup>1</sup>, Шевченко Р.А., Протопопов Е.В., Кратько С.Н., Хомичева В.Е.</i> .....	33
85 ЛЕТ В СИСТЕМЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ. К ЮБИЛЕЮ КАФЕДРЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОЛОГИИ СИБГИУ <i>Коротков С.Г., Темлянец М.В., Стерлигов В.В.</i> .....	44
МОЛИБДЕНОВЫЕ КОНЦЕНТРАТЫ : СЫРЬЕВАЯ БАЗА И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ <i>Полях О.А., Комрони М.</i> .....	55
РЕСУРСО – И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК С ТЕРМОВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ <i>Лубяной Д.А., Мамедов Р.О., Князев С.В.</i> .....	61
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШЛАКОВ РАФИНИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ <i>Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Ходосов И.Е., Ёлкин К.С.</i> .....	66
ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И МИРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА МОЛИБДЕНА, ЕГО СПЛАВОВ И СОЕДИНЕНИЙ <i>Горлова А.А., Галевский Г.В., Руднева В.В.</i> .....	72
КОМПАНИЯ SINF – ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ЛИДЕР В ПРОЕКТИРОВАНИИ, СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ИНЖИНИРИНГЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ <i>Чжан Кэ</i> .....	78
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫМИ СВОЙСТВАМИ <i>Павловец В.М.</i> .....	81
ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ПОДОВОЙ ФУТЕРОВКИ АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ <i>Горлова А.А., Зербач О.В., Галевский Г.В.</i> .....	90
ПРИМЕНЕНИЕ ДИБОРИДА ТИТАНА ДЛЯ ЗАЩИТЫ КАТОДОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ <i>Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г., Комрони М., Гордиевский О.И.</i> .....	94
ПРОИЗВОДСТВО ОБОЖЖЕННЫХ АНОДОВ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ: ДОМИНИРУЮЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ, ТЕХНОЛОГИЯ, КАЧЕСТВО <i>Лысенко О.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г., Комрони М.</i> .....	101

СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В МЕТАЛЛУРГИИ <i>Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г., Комрони М.<sup>4</sup>, Макарычева Е.Г., Смит С.В.</i> .....	110
СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ТВЕРДЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В МЕТАЛЛУРГИИ.....	118
<i>Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г., Комрони М., Макарычева Е.Г., Смит С.В.</i> .....	118
ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ СКРАПА ШЛАКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО В КИСЛОРОДНОМ КОНВЕРТЕРЕ <i>Амелин А.В., Протопопов Е.В., Кузнецов С.Н., Калиногорский А.Н., Ганзер Л.А.</i> .....	124
ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ МАРГАНЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ <i>Прошунин И.Е., Нохрина О.И., Рожихина И.Д.</i> .....	128
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ВАНАДИЯ ИЗ КОНВЕРТЕРНОГО ВАНАДИЕВОГО ШЛАКА ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ <i>Голодова М.А., Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Рыбенко И.А.</i> .....	133
<b>СЕКЦИЯ 2: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ: ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА</b> .....	139
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ФОРМАХ <i>Деев В.Б., Приходько О.Г., Прусов Е.С., Протопопов Е.В., Темлянец М.В., Куценко А.И., Mei Shunqi, Ри Э.Х., Сметанюк С.В., Пономарева К.В., Гаврилов Г.Н.</i> .....	139
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК И СЛИТКОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОРМЕ <i>Деев В.Б., Приходько О.Г., Прусов Е.С., Протопопов Е.В., Темлянец М.В., Куценко А.И., Mei Shunqi, Ри Э.Х., Базлова Т.А., Сметанюк С.В., Соколов А.А.</i> .....	146
МЕЛКОСЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЛИТЫХ ПОРИСТЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Князев С.В., Усольцев А.А., Куценко А.И., Куценко А.А., Соколов Б.М.</i> .....	152
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ МАРКИ Э90ХАФ <i>Симачев А.С., Осколкова Т.Н.</i> .....	159
МНОГОСТАДИЙНАЯ ПРОТЯЖКА КРУГЛОЙ ЗАГОТОВКИ НА ПЛОСКИХ БОЙКАХ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОМ ПРЕССЕ <i>Перетягко В.Н., Вахман С.А., Филиппова М.В., Юрьев А.Б.</i> .....	164
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОМ, В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ <i>Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С., Дорофеев В.В.</i> .....	170
ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ – РАЗДЕЛЕНИЯ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ПРОИЗВОДСТВЕ <i>Фастыковский А.Р., Беляев С.В.</i> .....	175
НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВИНТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ВОЛОЧЕНИЕМ <i>Фастыковский А.Р., Чинокалов Е.В.</i> .....	180
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЗАХВАТА И КОЛЕБАНИЙ ПОЛОСЫ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВИБРАЦИЙ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ <i>Кожевников А.В., Смирнов А.С., Платонов Ю.В.</i> .....	184

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТРУДОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОКАТНОГО КОМПЛЕКСА <i>Кадыков В.Н., Мусатова А.И.</i> .....	188
ПОСТРОЕНИЕ НОРМАТИВНОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ОПЕРАТОРОВ-ВОЛОЧИЛЬЩИКОВ В РЕЖИМЕ МНОГОСТАНОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ <i>Кадыков В.Н., Мусатова А.И.</i> .....	196
РАЗРАБОТКА ПРОГРЕССИВНЫХ КАЛИБРОВОК АСИММЕТРИЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ РЕЛЬСОБАЛОЧНОМ СТАНЕ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Дорофеев В.В., Добрянский А.В., Фастыковский А.Р.</i> .....	202
ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ НА ИЗНОС И УДАР В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ <i>Исагулов А.З., Квон Св.С., Куликов В.Ю.</i> .....	208
ДЛИНА ЗОНЫ ПЛАВНОГО ПЕРЕХОДА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖЁСТКОСТИ С- И Н-ОБРАЗНОГО ПРОФИЛЕЙ, ФОРМУЕМЫХ ПО ПОЛУЗАКРЫТЫМ СХЕМАМ <i>Филимонов А.В., Филимонов С.В., Филимонов В.И.</i> .....	213
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК Ковалева Т.В., Еремин Е.Н. ....	219
ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ В МЕЛЮЩИХ ШАРАХ <i>Исагулов А.З., Аубакиров Д.Р.</i> .....	223
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ <i>Исагулов А.З., Исагулова Д.А.</i> .....	228
ДЕФОРМАЦИЯ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И СВОЙСТВА ПОРШНЕВЫХ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ <i>Афанасьев В.К., Прудников А.Н., Прудников В.А.</i> .....	234
<b>СЕКЦИЯ 3: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ, ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ</b> .....	241
АНАЛИЗ УСЛОВИЙ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМОТРОНА ЭДП-104А В АЗОТНОЙ ПЛАЗМЕ <i>Галевский Г.В., Руднева В.В., Оршанская Е.Г., Галевский С.Г., Мишне И.</i> .....	241
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОЛЬФРАМА ИЗ ОКСИДА ПРИ НАПЛАВКЕ ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ <i>Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Бащенко Л.П., Михно А.Р.</i> .....	244
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ $WO_3$ АЛЮМИНИЕМ ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ <i>Крюков Р.Е., Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф., Козырев Н.А., Шурупов В.М.</i> .....	251
ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА <i>Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Михно А.Р., Бащенко Л.П.</i> .....	256
ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ ФЕРРОХРОМА <i>Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Прудников А.Н., Михно А.Р.</i> .....	261
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОВШЕВОГО ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА В КАЧЕСТВЕ ФЛЮС – ДОБАВКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ <i>Михно А.Р., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Уманский А.А.</i> .....	267

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК10КС ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В МАШИНОСТРОЕНИИ <i>Осколкова Т.Н., Глезер А.М.</i> .....	272
НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ: ИСТОРИЯ, РЕАЛЬНОСТЬ И ПРОГНОЗЫ <i>Полях О.А., Полях К.Е., Вильдеманн В.</i> .....	277
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМОТРОНА ЭДП-104А В АЗОТНОЙ ПЛАЗМЕ <i>Галевский Г.В., Руднева В.В., Оршанская Е.Г., Галевский С.Г., Мишне И.</i> .....	281
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМООБРАБОТКИ КАРБИДА КРЕМНИЯ <i>Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г., Черновский Г.Н., Крушенко Г.Г., Стафецкис Л., Черепанов А.Н.</i> .....	285
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ <i>Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р.</i> .....	294
РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ПЛАЗМОСИНТЕЗА ДИБОРИДА ТИТАНА <i>Галевский Г.В., Руднева В.В., Оршанская Е.Г., Ефимова К.А.</i> .....	298
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НОВЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК СИСТЕМЫ Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo <i>Козырев Н.А., Усольцев А.А., Гусев А.И., Осетковский И.В., Михно А.Р.</i> .....	306
СВАРОЧНЫЙ ФЛЮС НА ОСНОВЕ БАРИЙ – СТРОНЦИЕВОГО МОДИФИКАТОРА И ШЛАКА СИЛИКОМАНГАНА <i>Козырев Н.А., Михно А.Р., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Попова М.В.</i> .....	322
ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛА, НАПЛАВЛЕННОГО ХРОМИСТОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ <i>Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С.А., Пономарев И.А.</i> .....	328
КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СПЛАВА СИСТЕМЫ Sn-Sb, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ <i>Калашиников И.Е., Болотова Л.К., Быков П.А., Катин И.В., Кобелева Л.И.</i> .....	334
ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ <i>Шевченко Р.А., Кузнецов В.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Михно А.Р.</i> .....	338
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ <i>Кузнецов В.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Михно А.Р.</i> .....	342
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА КАРБИДА ЦИРКОНИЯ <i>Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г.</i> .....	347
ОСОБЕННОСТИ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА(VI) В ПЛАЗМЕННОМ ПОТОКЕ АЗОТА <i>Баротов Ф.Б., Ноздрин И.В.</i> .....	351
<b>СЕКЦИЯ 4: ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И АГРЕГАТАХ. РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ И УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ</b> .....	355
БИОМОНИТОРИНГ РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ШЛАМОХРАНИЛИЩА АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Водолеев А.С., Сияевский Д.В., Кривцова Ю.В.</i> .....	355
ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО, ХИМИЧЕСКОГО И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВОВ ПРОКАТНОЙ ОКАЛИНЫ И ОБЕЗВОЖЕННОГО ШЛАМА ГАЗООЧИСТКИ <i>Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В., Ноздрин Е.В.</i> .....	358

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ <i>Соловьев А.К, Шевченко А.А.</i> .....	364
ВЫБОР МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СТОИМОСТНОЙ ОЦЕНКИ <i>Стерлигов В.В.</i> .....	369
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТОПЛИВА <i>Стерлигов В. В.</i> .....	373
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ШЛАКИ – КАТАЛИЗАТОРЫ ОЧИСТКИ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ <i>Титова О.О., Павлович Л.Б., Медведская Е.В.</i> .....	377
ОЦЕНКА РИСКОВ НА КОКСОХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С ВНЕДРЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ <i>Титова О.О., Павлович Л.Б., Медведская Е.В.</i> .....	379
ТЕХНОГЕННЫЕ КАТАСТРОФЫ И ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ <i>Апасов А.М.</i> .....	384