

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

рода значительно меньше 0,5 % об.

2) В условиях ООО «Полимет» проведено обследование условий и показателей 174 катодов плазмотронов ЭДП-104А за период 2015 – 2018 гг., достигнутых при работе в магистральном азоте с содержанием кислорода (0,7 – 1,6) % об. Средний ресурс работы катодов составил 59 час., что существенно ниже заявляемого паспортного значения (100 час.) и соответствует примерным значениям удельной эрозии $(1,8 - 2,2) \cdot 10^{-12}$ кг/Кл.

3) В условиях ООО «Полимет» проведено исследование работы катодов плазмотронов ЭДП-104А реактора мощностью 150 кВт в газе-теплоносителе, содержащем азот, кислород (0,6 – 1,2) % об. и природный газ (метана до 94,0-96,0 % об.) (1 – 3) % об. Подтверждено повышение среднего значения ресурса работы катодов до 105 час. при содержании метана в газе-теплоносителе 2 – 3 % об., что свидетельствует о технологической целесообразности введения газообразных углеводородов в состав плазмообразующей азот-кислородной смеси для связывания кислорода в монооксид углерода.

Библиографический список

1. Жуков М.Ф. Плазмотроны. Исследования. Проблемы / М.Ф. Жуков [и др.]. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1995. – 202 с.
2. Ноздрин И.В. Борид хрома – нанотехнологии, свойства, применение : монография / И.В. Ноздрин, В.В. Руднева, Г.В. Галевский. – Саарбрюкен (Германия) : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 233 с.
3. Ноздрин И.В. Теплотехнические, ресурсные и технологические характеристики плазмометаллургического реактора для обработки и производства тугоплавких материалов / И.В. Ноздрин [и др.] // Вестник машиностроения. – 2012. - № 12. – С. 78-83.
4. Ноздрин И.В. Определение ресурса работы плазмотронов плазмометаллургического реактора / И.В. Ноздрин [и др.] // Metallurgia : технологии, управление, инновации, качество : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. – СибГИУ. - Новокузнецк, 2011. – С. 119 – 123.
5. Пат. на ПМ № 107740 РФ, МПК H05B 7/18, H05H 1/24. Электродуговой подогреватель газа азотно-кислородной смеси для трейструйного прямооточного химико-металлургического реактора / И.В. Ноздрин [и др.]. – СибГИУ. - № 2011112115, заяв. 30.03.2017 ; опубли. 10.08.2011. Бюл. № 22. – 1 с.

УДК 661.665:621.793.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМООБРАБОТКИ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Галевский Г.В.¹, Руднева В.В.¹, Галевский С.Г.²,
Черновский Г.Н.³, Крушенко Г.Г.⁴, Стафеев Л.⁵, Черепанов А.Н.⁶

¹Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, kafcmet@sibsiu.ru

²Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия, sgalevskii@gmail.com
³АО «ЕВРАЗ ЗСМК»,
г. Новокузнецк, Россия, grex2141@mail.ru

⁴ФИЦ КНЦ Институт вычислительного моделирования СО РАН,
г. Красноярск, Россия, genry@icm.krasn.ru

⁵NeomatCo, Саласпилс, Латвия, neomat@neomat.lv,

⁶ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ANCHER@itam.nsc.ru

Аннотация. Проведено моделирование взаимодействия потоков газа-теплоносителя и сырья при плазмообработке микропорошка карбида кремния, включающее термодинамическое моделирование высокотемпературных взаимодействий в системах Si – C – N, Si – C – H – N и математическое моделирование теплообмена сырьё – плазма. Определена возмож-

ность образования карбида кремния по газофазным реакциям при условии газификации углерода в интервале температур 3000 – 4000 К. Установлено, что полное испарение карбидных частиц микроразмерного диапазона возможно в плазменном потоке с начальной температурой 5400 К.

Ключевые слова: плазмообработка, карбид кремния, микропорошок, термодинамический анализ, теплообмен плазма - сырье.

MODELLING OF PROCESS PLASMA PROCESSING OF SILICON CARBIDE

Galevskiy G.V.¹, Rudneva V.V.¹, Galevskiy S.G.²,
Chernovsky G.N.³, Krushenko G.G.⁴, Stafetskis L.⁵, Cherepanov A.N.⁶

¹*Siberian state industrial university,
Novokuznetsk, Russia, kafcmet@sibsiu.ru*

²*St. Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, sgalevskii@gmail.com*

³*JSC «EVRAZ ZSMK», Novokuznetsk, Russia, grex2141@mail.ru*

⁴*FITS KNTS Institute of computing modeling of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Science, Krasnoyarsk, Russia, genry@icm.krasn.ru*

⁵*NeomatCo, Salaspils, Latvia, neomat@neomat.lv*

⁶*ITPM Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Novosibirsk, Russia, ANCHER@itam.nsc.ru*

Abstract. The modeling of interaction of streams of gas heat carrier and raw materials at plasma processing of silicon carbide micropowder including thermodynamic modeling of high-temperature interactions in systems Si – C – N, Si – C – H-N and mathematical modeling of heat exchange raw materials – plasma is carried out. The possibility of formation of silicon carbide is determined by gas-phase reactions under a condition of gasification of carbon in the range of temperatures 3000 – 4000 K. It is established that full evaporation of carbide particles of microdimensional range is possible in a plasma stream with a reference temperature of 5400 K.

Keywords: plasma processing silicon carbide, micropowder, the thermodynamic analysis, heat exchange plasma - raw materials.

Введение

Специфика термомеханических, электрофизических, физико-химических свойств карбида кремния предопределяет следующие направления его традиционного и перспективного применения:

- материалы на связках, представляющие собой гетерогенные композиции, в которых зерна карбида кремния цементированы связками, отличающимися по своему составу и физико-химическим свойствам от основной фазы;

- керамика (конструкционная и функциональная);

- композиционные материалы и покрытия;

- поверхностное модифицирование материалов;

- модифицирование сплавов;

- модифицирование полимеров;

красочные составы специального назначения.

При этом к размерночувствительным областям могут быть отнесены производство конструкционной керамики, электроосаждение композиционных покрытий, поверхностное и объемное модифицирование металлических и полимерных материалов, создание новых красочных составов специального назначения.

Наряду с отмеченными областями в связи с постоянным ростом цен на синтетические алмазы для разнопрофильного абразивного инструмента активно исследуются возможности

замены их в ряде случаев ближайшим кристаллографическим аналогом – карбидом кремния. При этом технологически более целесообразно использование карбида кремния в виде порошковой композиции, содержащей частицы микро- и наноразмерных диапазонов. Однако известные способы смешивания порошков не позволяют решить эту задачу. Смесь нано- и микрочастиц карбида кремния может быть получена при плазменном модифицировании особо тонкого микрошлифпорошка карбида.

В связи с этим целью настоящей работы является моделирование взаимодействия плазменного и сырьевого потоков при плазмообработке карбида кремния.

Плазмообработка при получении высокотемпературных соединений включает следующие стадии: генерацию плазменного потока, введение в него компонентов сырья и их смешивание, нагрев и изменение их состояния (для твердого – плавление), формирование реакционной парогазовой смеси требуемого состава, образование и конденсация целевого продукта, формирование его дисперсного состава при коалесценции и коагуляции, принудительное охлаждение и выделение его из потока. Высокие скорость движения и температура газа – теплоносителя, достигающие 60 м/с и 5500 К соответственно, определяют крайне ограниченное время эволюции сырья в целевой продукт, оцениваемое для условий трехструйного прямоточного реактора в 20-30 мс. Быстротечность процесса, протекающего в малом реакционном пространстве объемом порядка 0,002 м³, фактически исключает экспериментальное исследование отдельных стадий процесса, выявление их точных геометрических, температурных и скоростных профилей и границ. В таких условиях весьма важным становится накопление и использование технологической информации прогнозного характера, получаемой при моделировании взаимодействия сырьевого и плазменного потоков.

Как правило, это направление исследований включает:

- моделирование высокотемпературных взаимодействий в выбранных для анализа многокомпонентных системах, позволяющее оценить термодинамическую возможность реализации процессов образования тех или иных высокотемпературных соединений;
- моделирование теплообмена сырья с плазменным потоком, обеспечивающее прогнозирование энергетических режимов его эффективной переработки.

Моделирование высокотемпературных взаимодействий в карбидообразующих системах Si – C – N, Si – C – H – N

Плазмометаллургические процессы получения высокотемпературных соединений имеют следующую специфику, требующую обязательного методологического учета при проведении их термодинамического моделирования:

- крайне ограниченное время пребывания дисперсного сырья в зоне испарения и реакционной смеси в зоне образования целевого продукта в потоке газа – теплоносителя с температурой 5500-2000 К, составляющее несколько микро- и миллисекунд соответственно, что позволяет предположить главенствующую роль температурного фактора над временным и, следовательно, возможность достижения равновесия;
- высокую реальность образования в анализируемых условиях целевых продуктов при взаимодействиях в газовой фазе или с её участием;
- необходимость реализации плазменного процесса в системах, состоящих из нескольких химических элементов, вводимых с перерабатываемым сырьем и плазмообразующим газом и образующих многофазные и многокомпонентные системы, определяет безусловное применение при проведении термодинамического моделирования компьютерных технологий.
- особая важность результатов термодинамического моделирования плазменных процессов при отсутствии реальной возможности описания их кинетических закономерностей и механизма с достаточной достоверностью;
- прогнозный характер результатов термодинамического моделирования плазменных процессов, что позволяет рассматривать их как технологические ориентиры, требующие экспериментального подтверждения.

Цели, задачи и методика моделирования

Термодинамическое моделирование плазменных процессов модифицирования проведено с целью прогнозирования оптимальных параметров получения карбида кремния (соотношения компонентов и температуры), определения равновесных показателей процесса (степени превращения сырья в карбид, составов газообразных и конденсированных продуктов), оценки вклада в процессы карбидообразования газофазных реакций, обеспечивающих в условиях плазмометаллургических технологий эффективную переработку дисперсного сырья.

В связи с использованием в процессах модифицирования в качестве кремнийсодержащего сырья карбида кремния и плазмообразующего газа – азота объектами исследования являлись системы Si-C-N и Si-C-H-N. Следует отметить, что системы Si-C-H-N и Si-C-O-H-N анализировались авторами работ [1 – 3], но применительно к условиям использования в качестве восстановителя и карбидизатора пропана и без учета в [3] возможности образования в газовой фазе таких соединений, как HCN, Si₂C, SiC₂, углеводородных радикалов типа C₂H, C₃H и ряда других. Поэтому использование имеющихся данных о равновесных составах этих систем не представляется возможным вследствие существенного отличия соотношения компонентов по сравнению с достигаемыми в исследуемых плазменных процессах.

Необходимые для анализа равновесные составы газообразных и конденсированных продуктов синтеза рассчитывались "константным" методом [4, 5]. «Константный» метод основан на совместном решении следующих уравнений: закона действующих масс, материального баланса, суммарного числа молей газовой смеси, существования конденсированной фазы, закона Дальтона. При расчетах рассматривалась область температур 1000-6000 К при общем давлении в системе 0,1 МПа. Исходными данными служили константы равновесия реакций образования соединений из элементов. Температурная зависимость составов продуктов взаимодействия для исследуемых систем рассчитывалась с использованием программ компьютерного моделирования «PLASMA» (ИХТТМ СО РАН – СибГИУ).

Термодинамика высокотемпературных взаимодействий в системах Si-C-N и Si-C-H-N

Анализ систем Si-C-N, Si-N, Si-C-H-N выполнен с учетом возможности существования в газовой фазе компонентов системы C-H-N, Si, Si⁺, Si₂, Si₃, SiH, SiH₂, SiH₃, SiH₄, SiN, SiC, SiC₂ [4], Si⁻, Si₂C₂, Si₃C [6], Si₂N [7], конденсированной – Si, Si₃N₄, SiC, C [8]. Результаты расчетов представлены на рисунках 1, 2.

В системе Si-C-N (рисунок 1), отвечающей условиям процесса модифицирования карбида кремния, карбид образуется в основном по реакции 1, реализация которой в условиях плазменного потока представляется кинетически маловероятной.

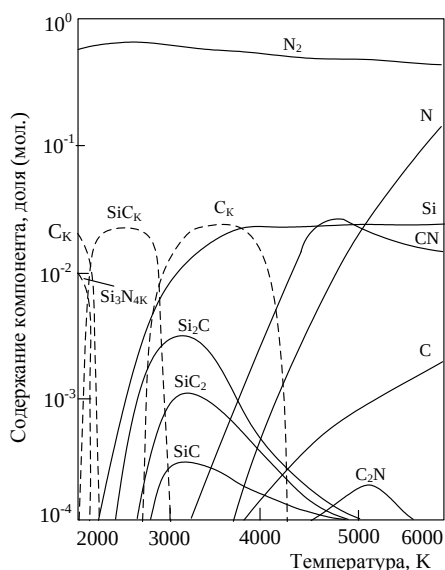
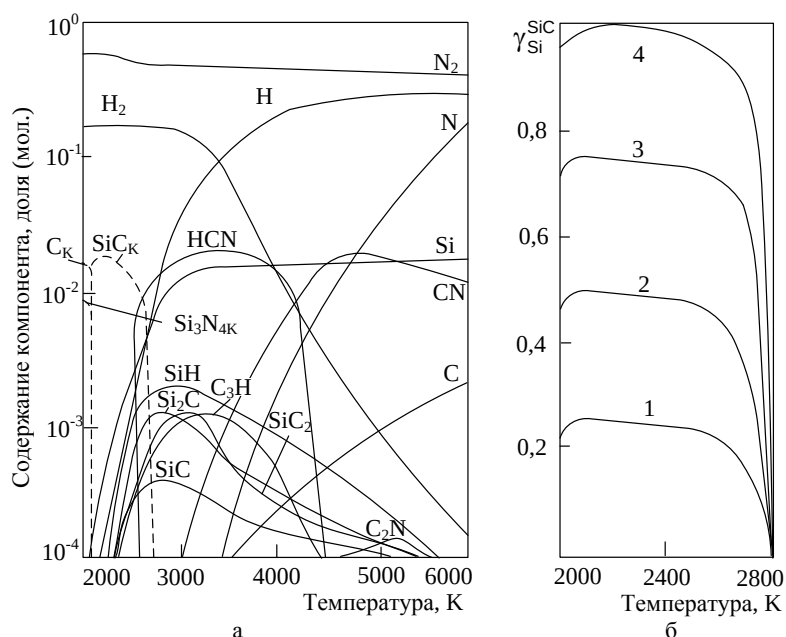


Рисунок 1 – Равновесные составы газовой и конденсированной фаз системы Si-C-N при соотношении Si:C:N = 1:1:60

Введение в систему водорода делает возможным развитие процесса карбидообразования по газофазной реакции (2) с участием циановодорода в соответствии с закономерностями высокотемпературных взаимодействий в системе Si-C-H-N (рисунок 2).



- а) равновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении (4) Si:C:H:N = 1:1:12:60
 б) зависимость степени превращения Si в SiC от соотношения Si:C = 1:0,25 (1); 1:0,5 (2); 1:0,75 (3); 1:1 (4)

Рисунок 2 – Результаты термодинамических расчетов системы Si-C-H-N

Результаты термодинамических расчетов для системы Si-C-H-N приведены на рисунке 2 а, б. 100 %-ное превращение кремния в карбид достигается уже при стехиометрическом соотношении компонентов (рисунок 2 б).

Проведенный термодинамический анализ систем Si-C-N и Si-C-H-N подтверждает, что в процессе плазменного модифицирования карбида кремния использование азотно-водородной плазмы представляется обязательным условием, обеспечивающим газификацию углерода в широком интервале температур и газофазный характер реакций карбидообразования.

Моделирование теплообмена плазменного и сырьевого потоков

Моделирование теплообмена плазменного и сырьевого потоков проведено с целью прогнозирования условий эффективной «газификации» порошкообразного сырья: термодинамических и теплофизических свойств плазмы и сырья, начальной температуры плазмы, крупности, массовой расходной концентрации и скорости ввода сырья.

Основные этапы развития математического моделирования процессов обработки дисперсного сырья применительно к условиям трехструйного прямоточного реактора подробно описаны в работах [10, 11]. Их анализ позволяет отдать предпочтение математической модели взаимодействия плазменного и сырьевого потоков А.Л. Мосса – И.С. Букова. Модель достаточно хорошо адаптирована к условиям трехструйного прямоточного реактора: учитывает вынужденную турбулизацию плазменного потока, влияние дисперсного сырья и теплоизоляции канала на теплообмен плазма-стенка реактора, изменение коэффициентов теплоотдачи от плазмы к стенке канала и от плазмы к дисперсному сырью по длине реактора. Положительный опыт применения этой модели изложен в работах [10, 11]. В основе модели – решение тепловой задачи нагрева, плавления и испарения частиц порошкообразного сырья при движении его в турбулентном высокоскоростном газовом потоке, истекающем в охлаждаемый канал.

При построении модели приняты следующие допущения: среда является двухскоростной и двухтемпературной, т.е. в каждой точке имеются две скорости (скорость газа и скорость

частицы) и две температуры (температура газа и температура частицы); давление создается только газом; гравитационные и электрические силы отсутствуют; частицы являются сферами одного и того же радиуса, не взаимодействуют между собой и стенками реактора, равномерно распределены по его поперечному сечению, занимают пренебрежительно малый объем и имеют температуру, равную их среднemasсовой; температура и скорость плазменного потока в поперечном сечении реактора одинаковы и равны среднemasсовым; нагрев и испарение равномерны по объему частицы; начальное сечение реактора $x = 0$ соответствует точке соударения плазменных струй и сырьевого потока. Поэтому рассматриваемая тепловая задача не имеет точного решения, а результаты моделирования носят прогнозный характер.

Начальные условия решения соответствуют: $x = 0$: $T = 0$. Граничные условия соответствуют следующим: диаметр реактора постоянен $D = \text{const}$; температура плазмы больше температуры частицы $T_g > T_p$, температуры плавления и испарения перерабатываемых материалов T_{pm} и T_{pr} .

Структурно модель состоит из 3-х блоков: блока (1) задания начальных условий; блока (2) изменения гидродинамических условий, описывающего движение частиц дисперсного сырья и плазменного потока; блока (3) изменения тепловых условий, описывающего теплообмен плазменного потока со стенками канала реактора и дисперсным сырьем. Модель базируется на использовании следующих уравнений:

1) Блок задания начальных условий. Ввод постоянных параметров и коэффициентов: ρ_p , C_p , λ_p , T_{p0} , T_{pm} , T_{pr} , ΔH_r , ΔH_m , N_1 , G_p , G_g , G_t , D , D_0 , d_p , x/D , f_p ;

2) Блок изменения гидродинамических условий, описывающий движение частицы и плазменного потока уравнениями:

$$\frac{d(\rho_g v_g)}{d\tau} = 0, \quad (2)$$

$$m \frac{dv_p}{d\tau} = C_d \rho_g \frac{(v_g - v_p)^2}{2} F_d + mg, \quad (3)$$

$$x = \int_0^{\tau} v_p d\tau, \quad (4)$$

$$D_c = D_0 + 1,4x, \quad (5)$$

3) Блок изменения тепловых условий, описывающий теплообмен плазменного потока со стенками канала реактора и дисперсным сырьем уравнениями:

$$\rho_g = f(T_g), \mu_g = f(T_g), C_g = f(T_g), \lambda_g = f(T_g), \rho_p = f(T_p), \mu_p = f(T_p), C_p = f(T_p), \lambda_p = f(T_p), \quad (6)$$

$$N_1 = Q_w + Q_N + Q_m + Q_R + Q_g, \quad (7) \quad G_g(H_{1g} - H_{2g}) = q_{wp} \pi D \Delta x + \alpha_p (T_g - T_p) S_p d\tau, \quad (8)$$

$$S_p = \frac{G_p f_p}{\rho_p d_p}, \quad (9)$$

$$q_{wp} = St(N_1 - H_w \cdot G_g) \frac{4\Delta x}{D} \cdot \varepsilon_{wp}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_{wp} = 0,945(\beta \cdot 10^4)^{-0,125} \quad (11)$$

$$St = 0,70 Re_{f,x}^{-0,422} \cdot Pr_{f,x}^{-0,05}, \quad (12)$$

$$Re_D = \frac{4G_g}{\pi \cdot D \cdot \mu_{f,x}}, \quad (13)$$

$$Re_x = \frac{4G_g \cdot x}{\pi \cdot D^2 \cdot \mu_{f,x}}, \quad (14)$$

$$St = \frac{q_w}{\rho_{f,x} \cdot v_{f,x} \cdot (H_{f,x} - H_{w,x})}, \quad (15)$$

$$Pr_{f,x} = \frac{C_{p_{f,x}} \cdot \mu_{f,x}}{\lambda_{f,x}}, \quad (16)$$

$$\alpha_p = \frac{Nu_p \lambda_g}{d_p \sqrt{f_p}}, \quad (17)$$

$$Nu_p = 2 \frac{\lambda_s}{\lambda_g} + 0,78 Re_p^{0,5} Pr^{0,33} \left(\frac{\rho_g \mu_g}{\rho_s \mu_s} \right)^{0,2}, \quad (18)$$

$$Re_p = \frac{(v_g - v_p) \rho_g d_p}{\mu_g}, \quad (19)$$

$$K_p = \frac{Q_R}{\Delta H_r \cdot G_p}, \quad (20)$$

$$C_{p1} \cdot G_p (T_{pm} - T_{p0}) + \Delta H_m \cdot G_p + C_{p2} \cdot G_p (T_{pr} - T_{pm}) + K_p \cdot \Delta H_r \cdot G_p = \alpha_p (T_g - T_p) S_p \Delta \tau, \quad (21)$$

В уравнениях (2 – 21) приняты следующие обозначения: m – масса частицы, кг; τ – время, с; ρ_g – плотность, кг/м³; v_g, v_p – скорость газа и частицы, соответственно, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; C_d – коэффициент сопротивления сферической частицы; $F_d = \pi d_p^2 / 4$ – площадь поперечного сечения частицы, м²; d_p – диаметр частицы, м; D_0 – диаметр фурмы, м; x – осевая координата, м; T_g, T_p – среднемассовая температура потока и частиц, соответственно, К; C_g, C_p – удельная теплоемкость потока и частиц, соответственно, Дж/(кг·К); λ_g, λ_p – коэффициент теплопроводности потока и частиц, соответственно, Вт/(м·К); μ_g, μ_p – коэффициент динамической вязкости потока и частиц, соответственно, Па·с; N_1 – мощность, подводимая в реактор, кВт; Q_w, Q_n, Q_m, Q_R, Q_g – количество тепла: отдаваемое потоком плазмы стенкам реактора; затрачиваемое на нагрев, плавление и испарение сырья; отводящееся с плазмообразующим газом, кВт; G_g – массовый расход плазмообразующего газа, кг/с; H_{1g}, H_{2g} – удельная энтальпия газа в начале и в конце расчетного участка, кДж/кг; D – диаметр реактора, м; q_{wp} – тепловой поток от плазмы к стенке реактора на расчетном участке, Вт/м²; α_p – коэффициент теплоотдачи от плазменного потока к частицам дисперсного сырья на расчетном участке, Вт/(м²·К); S_p – площадь поверхности частиц, м²/с; f_p – коэффициент формы; St – число Стэнтона; H_w – удельная энтальпия газа при температуре стенки, кДж/кг; ε_{wp} – поправка на влияние концентрации дисперсного материала; f и x – индексы, соответствующие среднемассовой температуре потока и осевой координате; $\mu_{f,x}$ – коэффициент динамической вязкости; q_w – удельный тепловой поток, Вт/м²; $\rho_{f,x}$ – плотность, кг/м³; $v_{f,x}$ – скорость, м/с; $H_{f,x}$ – теплосодержание, кДж/кг; $C_{pf,x}$ – удельная теплоёмкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); s – условия на поверхности частицы; T_{p0} – начальная температура дисперсного материала, К; $\Delta H_m, \Delta H_r$ – соответственно, теплота плавления и испарения дисперсного материала, кДж/кг.

Моделирование обеспечивает при заданных характеристиках сырья $\rho_p, C_p, \lambda_p, T_{p0}, T_{pm}, T_{pr}, \Delta H_r, \Delta H_m$, параметрах работы реактора и процесса N_1, G_p, G_g, G_t (G_t – массовый расход

транспортирующего газа), геометрических параметрах реактора и частиц D , D_0 , d_p , x/D , f_p расчет следующих величин x , τ , T_g , T_p , T_w , v_g , v_p , K_p , α^* , β^* , γ^* (соответственно доля энергии, переданная газом стенке, частице и оставшаяся в газе).

Результаты расчета параметров эффективной плазмообработки порошкообразного карбида кремния

Расчеты выполнялись с использованием программы компьютерного моделирования «BIS-80/MSW» в соответствии со следующей блок-схемой (рисунок 3).

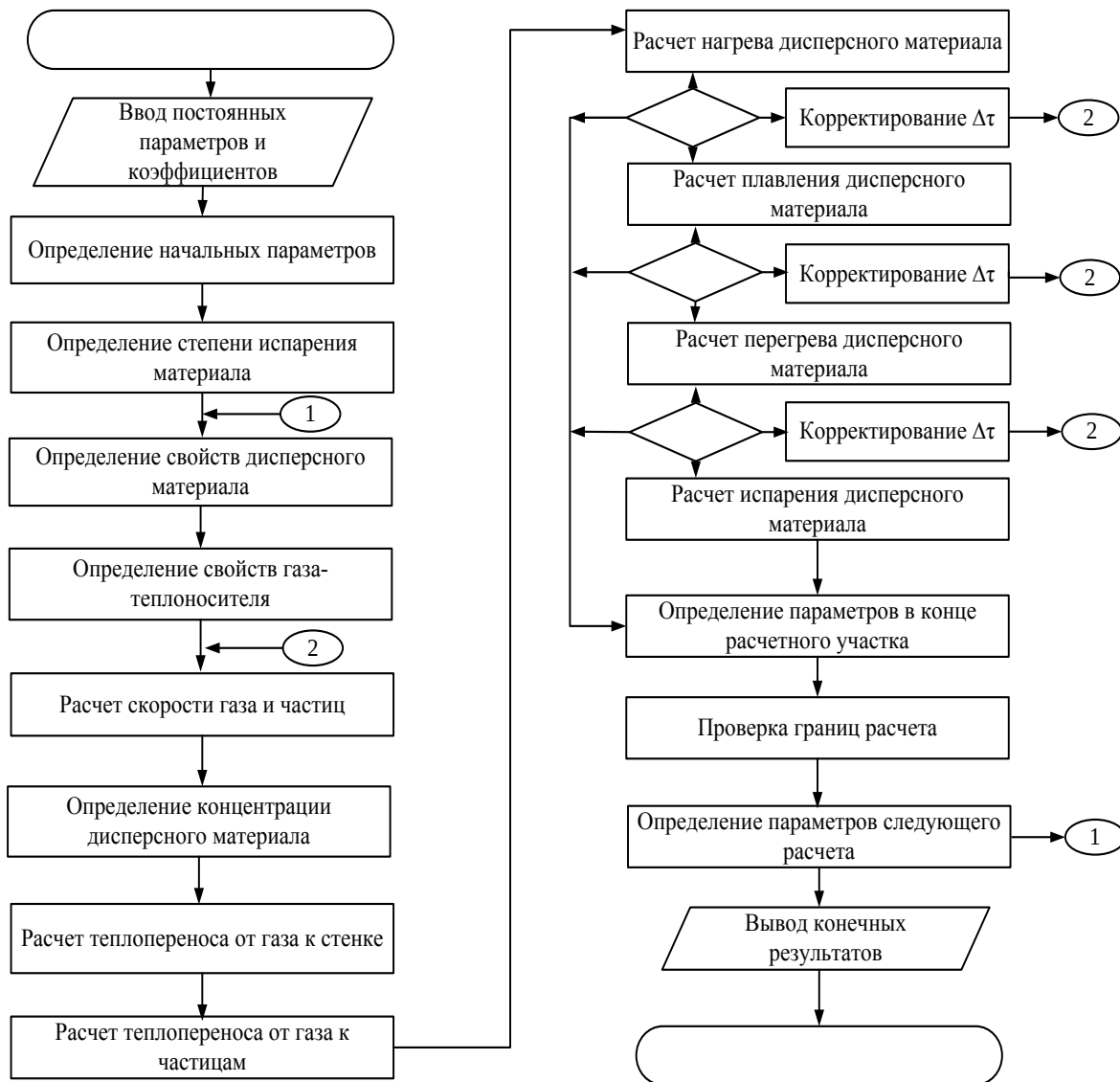


Рисунок 3 – Блок-схема программы расчёта

Для прогнозирования характеристик микропорошка карбида кремния и оценки гидродинамических и энергетических режимов его эффективной плазмообработки проведено модельно-математическое исследование влияния начальной температуры плазменного потока, крупности сырья и массовой расходной концентрации ($\mu_p = G_p / (G_g + G_p)$) на степень испарения. Результаты исследования приведены на рисунке 4. Исследования проводились для следующих режимов работы трехструйного прямоточного реактора: подведенной мощности 75 кВт и массового расхода плазмообразующего газа, составляющего $9 \cdot 10^{-3}$ кг/с. необходимые для расчетов данные о теплофизических свойствах карбида кремния взяты из [12 – 15].

Можно видеть, что высокая термическая устойчивость карбида кремния даже при экстремальных энергетических характеристиках потока ограничивает крупность частиц 3 мкм и массовую расходную концентрацию, составляющую для SiC 0,11.

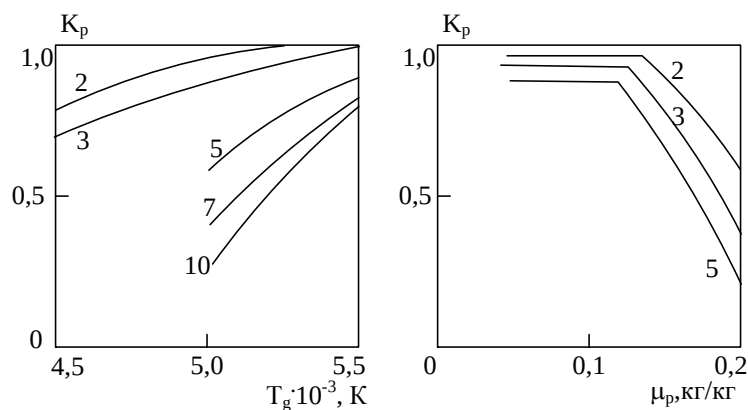


Рисунок 4 – Зависимость степени испарения частиц карбида кремния от начальной температуры плазменного потока и массовой расходной концентрации (2, 3, 5, 7, 10 – размер частиц, м · 10⁶, $\mu_p = 0,071$ кг/кг)

Заключение

Проведено моделирование взаимодействия плазменного и сырьевого потоков.

На основе анализа температурной зависимости равновесных составов газообразных и конденсированных фаз систем Si-C-N, Si-C-H-N определены условия карбидообразования для процессов модифицирования карбида кремния. Установлено, что процессы карбидообразования характеризуются следующими равновесными показателями и особенностями: степень превращения кремния в карбид SiC составляет 100 % в системах Si-C-N и Si-C-H-N; образование карбида SiC по газофазным химическим реакциям термодинамически возможно при формировании состава газовой фазы, обеспечивающего газификацию углерода в интервале температур 3000-4000 К; в процессах модифицирования карбида кремния использование азотно-водородной плазмы представляется обязательным условием, обеспечивающим газофазный характер реакций карбидообразования.

На основе многовариантного модельно-математического исследования теплообмена микропорошка карбида кремния и плазменного потока азота установлено, что при экстремальных энергетических параметрах потока, соответствующих начальной температуре 5400 К, возможно полное испарение частиц карбида кремния размером до 3 мкм.

Библиографический список

1. Галевский Г.В. Плазмохимический синтез тугоплавких карбидов и боридов – высокодисперсных компонентов композиционных материалов : дис.... док. тех. наук : спец. 05.17.01 : защищена 15.05.90 ; утв. 01.02.91 / Г.В. Галевский. – Ленинград, 1990. – 433 с. – Библиогр. С. 340-389. – 2348/10.
2. Жуков М.Ф. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / М.Ф. Жуков [и др.]. – Новосибирск : Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 344 с.
3. Ламихов Л.К. Термодинамический анализ системы Si-O-C-H-N / Л.К. Ламихов [и др.]. // Дисперсные кристаллические порошки в материаловедении : сб. науч. тр. / ИПМ АН УССР. - Киев, 1980. - С. 48-52.
4. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справочник : в 4 т. / Под ред. В.П. Глушко. – М. : Наука, 1978-1982 гг.
5. Сурис А.Л. Термодинамика высокотемпературных процессов : справочник / А.Л. Сурис. – М. : Metallurgy, 1985. – 568 с.
6. Данилова Т.Г. Вычисление термодинамических функций индивидуальных веществ при расчетах на ЭВМ высокотемпературных химических процессов / Т.Г. Данилова, В.В. Калмыков, В.Л. Климов. - М. : ЦНИИТИ, 1979. - 146 с.
7. Рождественский И.Б. Коэффициенты аппроксимации термодинамического потенциала для веществ, образованных атомами Al, B, C, Ca, Cl, Cu, F, H, K, Li, Mg, Na, N, O, P, S, Si, Ti в температурном интервале до 6000 К / И.Б. Рождественский, В.Н. Гутов, Н.А. Жигуль-

ская. // Теплофизические свойства химически реагирующих гетерогенных смесей : сб. науч. тр. / НИИ Мин. энергетики СССР. - М., 1973. - С. 88-92.

8. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания : справочник : в 3 т. / Под ред. В.П. Глушко. - М. : ВИНТИ, 1971 1973 г.г.

9. Косолапова Т.Я. Неметаллические тугоплавкие соединения / Т.Я. Косолапова [и др.]. - М. : Металлургия, 1985. - 224 с.

10. 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.

11. Моссэ А.Л. Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах/А.Л.Моссэ, И.С. Буров. - Минск: Наука и техника, 1980. - 208с.

12. Электронный каталог России [Электронный ресурс], URL: [www.wikipedia.org/wiki/Титан_\(элемент\)](http://www.wikipedia.org/wiki/Титан_(элемент)). (Дата обращения: 12.03.2019).

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

14. Свойства элементов: справочник в двух частях. Ч.1. Физические свойства/ Под ред. Г.В. Самсонова. - М.: Металлургия, 1976. - 600 с.

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

УДК 625.143.48

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru*

Аннотация. Для подтверждения предположения, что причиной снижения механических свойств полученных образцов является наличие неметаллических включений в металле сварного соединения исследовался состав неметаллических включений, образующихся при контактной сварке рельсовой стали. Химический состав включений, выявленных по месту сварного шва показал, что основными их составляющими являются оксиды кремния, марганца, характерные при образовании высокотемпературной окалины. Химический состав неметаллического включения, выявленного в металле, вне зоны шва, типичен для включений, образующихся при выплавке и свидетельствует о шлаковом характере его происхождения.

Ключевые слова: рельсы, контактная сварка, неметаллические включения.

RESEARCH OF THE NONMETALLIC INCLUSIONS WHICH ARE FORMED AT CONTACT BUTT WELDING OF RAIL STEEL

Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Usoltsev A.A., Kryukov R.E., Mikhno A.R.

Siberian state industrial university, Novokuznetsk, Russia, kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Abstract. For confirmation of the assumption that existence of nonmetallic inclusions in metal of a weld joint is the reason of decrease in mechanical properties of the received samples the structure of the nonmetallic inclusions which are formed at contact welding of rail steel was investigated. The chemical composition of inclusions identified at the weld site showed that their main components are oxides of silicon, manganese and are characteristic for the formation of high-temperature scale.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	4
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.¹, 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 CINF – 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.⁴, 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
СЕКЦИЯ 2: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ: ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	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
СЕКЦИЯ 3: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ, ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ	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 СИЛИКОМАНГАНЦА	
<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
СЕКЦИЯ 4: ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И АГРЕГАТАХ. РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ И УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ	355
БИОМОНИТОРИНГ РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ШЛАМОХРАНИЛИЩА АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	
<i>Водолеев А.С., Синяевский 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