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 2

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. 2 / под ред. Е.В. Протопопова; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2019. – 463 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

способствовать улучшению осаждения запутавшихся корольков ферромарганца. Выделяющееся тепло экзотермических реакций способствует образованию жидкоподвижного шлака.

Проведенными расчетами показано, что углетермическое восстановление марганца требует высокой температуры (~1500-1700К), и, соответственно, большого расхода тепла. Как показывают результаты расчетов, процесс металлотермического восстановления марганца, напротив, носит экзотермический характер. Участвующие в восстановлении марганца из руды кремний и алюминий во всем исследованном интервале температур имеют отрицательные значения изменения энергии Гиббса, что, в свою очередь, подтверждает высокую вероятность протекания реакций в прямом направлении, в сторону образования продуктов реакции. Результаты термодинамической оценки прохождения вышеупомянутых реакций теоретически подтверждают позитивное влияние совместного участия кремния и алюминия в восстановительных процессах при выплавке ферромарганца. Рассчитанные данные по изменению энергии Гиббса в интервале температур 298-2773 К, указывают на целесообразность применения комплексных сплавов на основе алюминия и кремния в качестве восстановителей при выплавке средне-низкоуглеродистых марок ферромарганца.

Библиографический список

1. Глушко В.П. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Справочное издание. -3-изд. –М.: Наука, 1979. –Т.2. –Кн.1. -440 с.; 1981. –Т.3. –Кн.1. -472 с.; 1982. –Т.4. –Кн.1. - 623 с.

2. Рузинов Л.П., Гуляницкий Б.С. Равновесные превращения металлургических реакций. –М.: Металлургия, 1975. - 416 с.

3. Наумов Г.Б., Рыженко Б.Н., Ходаковский И.Л. Справочник термодинамических величин. -М.: Атомиздат, 1971. - 240 с.

4. Касенов Б.К., Алдабергенов М.К., Пашинкин А.С. Термодинамические методы в химии и металлургии. –Алматы: Рауан, Демеу, 1994. - 256 с.

УДК 621.783.22

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ

Стерлигов В.В., Михайличенко Т.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, archimih@mail.ru

Аннотация. *Для реализации эффективных моделей управления процессом нагрева металла в нагревательных печах с разным температурным режимом в тепловых расчетах целесообразно использовать единый подход к описанию процесса нагрева, что позволяет свести весь алгоритм расчета нагрева металла к частным решениям при различных граничных условиях.*

Ключевые слова: *нагревательные печи, нагрев металла, температурный режим, граничные условия, управление процессом нагрева, унификация математических моделей.*

ENGINEERING METHODS OF CONTROL OF METAL'S HEATING IN FURNACES

Sterligov V.V., Mihaylichenko T.A.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, archimih@mail.ru

Abstract. *In order to implement effective models for controlling the process of metal heating in heating furnaces with different temperature conditions in thermal calculations, it is advisable to*

use a unified approach to describing the heating process, which makes it possible to reduce the entire algorithm for calculating metal heating to particular solutions under different boundary conditions.

***Keywords**: heating furnaces, metal heating, temperature conditions, boundary conditions, heating process control, unification of mathematical models.*

Главной тенденцией развития современной металлургии является рост эффективности производства, снижение его энергозатрат с учетом экологических аспектов, при этом основные проблемы металлургии в полной мере отражают общегосударственные и даже глобальные тенденции в экономике. Базовый принцип наращивания темпов и объемов производства должен быть вписан в актуальный в настоящее время процесс перехода на «цифровую» экономику. Наряду с технологическим обеспечением и созданием специализированного инструментария для реализации «цифроизации» целесообразно также использовать методы управления, соответствующие этим задачам. В оперативном производстве это выразится в более широком использовании компьютерных схем и методов, реализующих эффективные модели управления процессами.

В соответствии с общепринятой классификацией [1, 2] модели по целям их создания подразделяются на исследовательские, обучающие и управленческие. И каждой группе соответствует своя глубина и детализация влияния разных факторов на конечный результат. При реализации какого-либо производственного процесса важно выбрать модель, в наибольшей мере соответствующую поставленной задаче.

Важным этапом технологической цепочки металлургического производства является нагрев металла, который осуществляется с целью придания металлу пластичности перед последующей обработкой давлением, либо с целью подготовки структуры металла перед термообработкой. Печи для нагрева металла могут работать по методическому или камерному режиму, что определяет их конструкцию и особенности тепловой работы, т.е. все теплотехнические показатели. Известно, что металлургия потребляет около 17-20 % всего объема топливно-энергетических ресурсов страны [3], и совершенствование работы печей может принести значительный экономический эффект.

В настоящее время существует классическая, достаточно глубоко проработанная теория нагрева металла [4-6] с решениями, представляющими собой детерминированные математические модели [7], полученные на основе дифференциальных уравнений.

При нагреве металла тепло от внешней среды (рабочего пространства печи) попадает на поверхность металла и уходит вглубь его. Внешний теплообмен в общем виде выражается уравнением Ньютона – Рихмана:

$$q_{нар} = \alpha\,(t_г - t_м), \qquad (1)$$

где $q_{нар}$ – плотность теплового потока, Вт/м^2 ;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м^2·К;

$t_г$, $t_м$ – температуры газа и поверхности металла, соответственно.

Плотность внутреннего теплового потока, (Вт/м^2), определяется уравнением Фурье:

$$q_{вн} = -\lambda \frac{dt}{dx}, \qquad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности металла, Вт/м·К;

$\frac{dt}{dx}$ – температурный градиент, К/м.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности в общем виде может быть представлено:

$$\Phi_\tau'(x, y, z, \tau) = a\,\Phi_x''(x, y, z, \tau), \qquad (3)$$

где Φ_τ' – первая производная функции Φ во времени;

Φ_x'' – вторая производная функции Ф в пространстве.

Для упрощения считают, что тепло передается только в одном направлении *x* (одномерная задача), что позволяет записать уравнение (3) так:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \qquad (4)$$

где $a = \lambda / c \cdot \rho$ – коэффициент температуропроводности, $м^2/с$;

с – удельная теплоемкость металла, Дж / кг·К;

ρ – плотность металла, $кг/м^3$.

Уравнение (4) дает общее решение задачи, а для расчета конкретного случая необходимо вводить дополнительные условия, так называемые «условия однозначности». Они включают в себя геометрию тела (поэтому нагрев пластины будет отличаться от нагрева цилиндра), физические свойства металла, граничные условия, которые учитывают теплообмен на поверхности тела, и временные, которые сводятся к начальному распределению температур в нагреваемом теле и закону его последующего изменения.

Температурный режим нагрева означает выбор характера изменения температуры греющей среды во времени, т.е. определяется функция $t_{печь}=f(\tau)$. При этом считается, что значение температуры одинаково во всем рабочем пространстве, что и дает некоторую осредненную температуру $t_{печь}$, которую называют эффективной (действующей) температурой. Расчет внешнего теплообмена ведут с использованием приведенного коэффициента излучения «печь-металл» $C_{печь-м}$. То же самое требование однородности температур существует, когда в качестве определяющей (расчетной) температуры принимается температура газа $t_Г$. В этом случае характеристикой внешнего теплообмена является приведенный коэффициент излучения «газ-кладка-металл» $C_{гкм}$.

Температурный режим нагрева включает в себя также определение скорости изменения температуры поверхности металла и разности температур по сечению заготовки, особенно в конце нагрева.

На рисунке 1 представлены два типичных варианта температурных режимов нагрева:

а)$t_{печь}$=const; применяется, когда максимально допустимая температура печи больше конечной температуры нагрева металла ($t_{печьmax}>t_{мк}$). Здесь $t_{мк}$ – конечная температура поверхности металла.

б) Если максимально допустимая температура печи меньше конечной температуры нагрева металла ($t_{печьmax}<t_{мк}$), то в начальный момент устанавливается максимально допустимая температуры печи, с точки зрения возникновения температурных напряжений: $t_{печь}= t_{печьmax}$. Затем $t_{печь}$ возрастает до $t_{печь}=t_{мк}+(150 \div 200\ ^0C)$. При термообработке эта разница температур печи и металла может быть меньше: обычно $t_{печь}=t_{мк}+ (50 \div 70\ ^0C)$.

Температурный режим будет определять граничные условия, что скажется на методике расчета.

Различные температурные режимы реализуются за счет различия систем отопления, рисунок 2.

Представленные варианты режимов нагрева металла не всегда реализуются в чистом виде. Так, например, в методических печах может реализовываться камерный режим с постоянной температурой в рабочем пространстве печи, что существенно упрощает конструкцию печи, т.к. не нужны пережимы для разделения зон. Это, в свою очередь, открывает возможности сводового отопления плоскопламенными горелками, обеспечивающего более интенсивную теплопередачу от факела к металлу [8].

Методика расчета нагрева металла может различаться в зависимости от постановки задачи [5] : по принятым параметрам температурного режима печи (как правило, по температуре уходящих дымовых газов) либо по принятой длине печи, или напряженности ее активного пода и др. Модернизация и реконструкция методических печей привела к тому, что современные методические печи конструктивно и по тепловому режиму существенно отли-

чаются от классической методической печи, которая традиционно имела три зоны - методическую, сварочную и томильную. Так, например, сводовое отопление в первой по ходу металла методической зоне лишает ее роли утилизатора тепла, отсутствие конструктивных «пережимов» в своде отчасти стирает различие в режиме работы печи (камерный или методический), а равномерное распределение дымоотводящих каналов по длине печи обеспечивает камерный режим работы печи и т.д. И поскольку расчет нагрева металла зависит от условий теплообмена на поверхности (границе) тела, все содержание и логика алгоритма расчета нагрева металла сводится к аддитивному расчету нагрева металла при различных граничных условиях (I, II и III рода). Такой подход позволяет унифицировать расчеты нагрева металла и управление процессом нагрева металла вне зависимости от режима работы печи: камерный или методический.

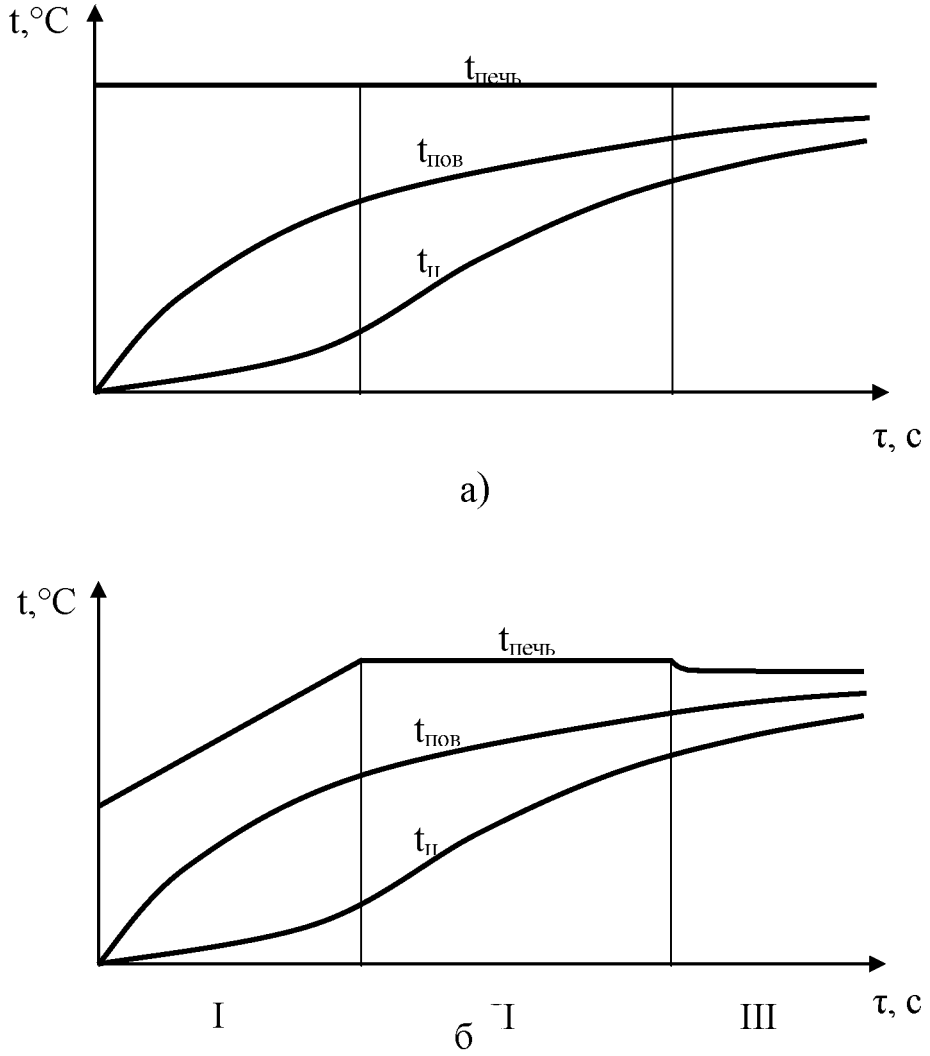
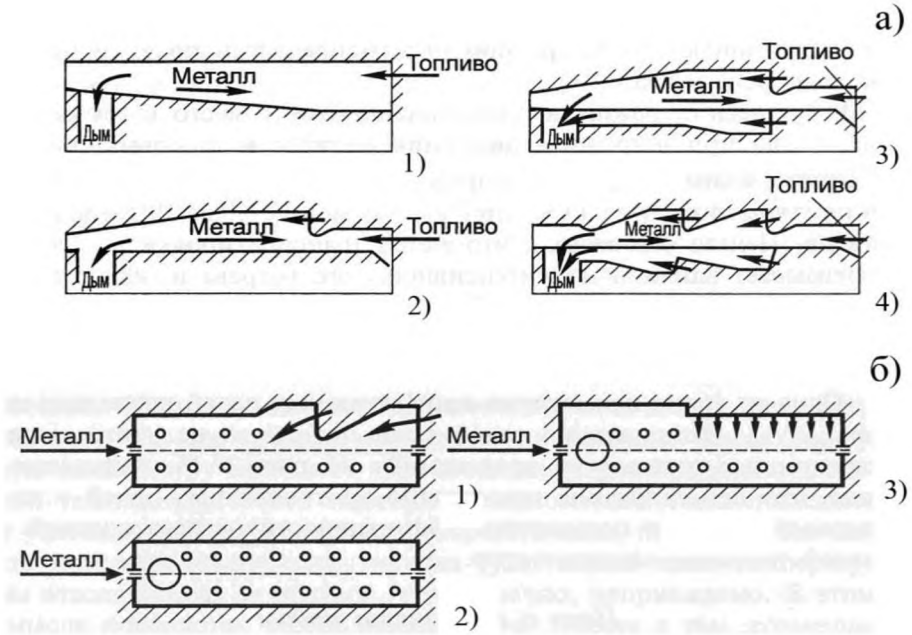


Рисунок 1 – Варианты температурных режимов печи



а – толкательные печи с торцевым отоплением: 1 – двухзонная печь с монолитным подом, 2 – трехзонная печь с монолитным подом, 3 – то же с нижним обогревом, 4 – многозонная печь с нижним обогревом;
б – печи с распределенным отоплением: 1 – торцевое и боковое отопление, 2 – боковое отопление, 3 – боковое и сводовое отопление.

Рисунок 2 – Профили печей с различными системами отопления

Произведенные нами расчеты по реальным условиям работы печей АО «ЕВРАЗ ЗСМК» показали возможность использования более простых математических моделей расчета и управления работой печей. В этих расчетах использовался единый (унифицированный) подход к описанию процесса нагрева. Следует отметить, что такая возможность заложена и в детерминированной модели. Нагрев при постоянной температуре поверхности (граничные условия I рода) может быть рассчитан по уравнениям для нагрева при граничных условиях III рода, если предположить, что коэффициент теплоотдачи $\alpha = \infty$, а нагрев в методической зоне с переменной по длине температурой при постоянной плотности теплового потока q = const. (граничные условия II рода) можно рассчитывать , используя математическую модель нагрева при постоянной температуре печи (граничные условия III рода), если принять в качестве эффективной температуры печи среднее значение температуры в методической зоне.

На основе выполненных расчетов были даны некоторые практические рекомендации по управлению процессами нагрева [9, 10].

Заготовки относительно небольшого сечения (до 100 мм) можно нагревать под горячую деформацию при постоянной температуре печи ($t_{печь}= t_{мк.} +(100 \div 120\ ^0C)$) без последующей выдержки для выравнивания температур по сечению. При этом перепад температур по сечению ($\Delta t=t_{мк}-t_{цк}$), т.е. разница температур между поверхностью металла в конце нагрева $t_{мк}$ и центром (осью, серединой) тела признается удовлетворяющей требованиям качества нагрева при изменении температуры 4-5 К (^{0}C) на 1 см глубины прогрева для ковки, и 2-3 К (^{0}C) при прокатке.

Заготовки (изделия) толщиной более 100 мм нагревают при $t_{печь}$ не более 1400 ^{0}C при последующей выдержке для достижения приемлемого перепада температур по сечению, как было упомянуто в предыдущем абзаце текста.

Практика работы печей подтвердила эффективность этих рекомендаций, а

адекватность таких упрощенных инженерных моделей была подтверждена практическими данными работающих печей. Это подтверждает рациональность и возможность представленного в докладе подхода.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 4

О ВЛИЯНИИ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ КВАРЦИТОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ КРЕМНИЯ И ВЫСОКОПРОЦЕНТНОГО ФЕРРОСИЛИЦИЯ
Ёлкин К.С., Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Сивцов А.В., Кашлев И.М., Карлина А.И., Ёлкин Д.К. 4

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПОЛУЧЕНИЯ АКТИВНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ
Ёлкин Д.К., Ёлкин К.С., Сивцов А.В. 13

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ КОЛЕСНОЙ СТАЛИ КАЛЬЦИЕМ И БАРИЕМ НА МОДИФИЦИРОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ
Гайворонский А.В., Павлова Н.В. 16

ТЕРМОДИНАМИКА РАСТВОРОВ КИСЛОРОДА В РАСПЛАВАХ NI-CO
Александров А.А., Дашевский В.Я. 23

РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
Жуков Д.В, Коновалов С.В. 29

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАРГАНЦА ПРИ КАРБО- И МЕТАЛЛОТЕРМИИ
Есенгалиев Д.А., Исагулов А.З., Байсанов С.О., Байсанов А.С., Заякин О.В. 33

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ
Стерлигов В.В., Михайличенко Т.А. 38

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВЫСОКООСНОВНЫХ БОРСОДЕРЖАЩИХ ШЛАКОВ
Бабенко А.А., Шартдинов Р.Р., Уполовникова А.Г., Сметанников А.Н., Гуляков В.С. 43

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРАКТИКА ОЧИСТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ И КРЕМНИСТЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ ОТ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ
Ёлкин К.С., Кашлев И.М., Карлина А.И. 47

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ ОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГАЗОВОЙ СТРУИ И ВАННЫ РАСПЛАВА В КИСЛОРОДНОМ КОНВЕРТЕРЕ
Солоненко В.В., Протопопов Е.В., Сарычев В.Д., Грановский А.Ю., Темлянцев М.В. 53

СТРОИТЕЛЬСТВО ПЕЧЕЙ ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА В ЕВРАЗ ЗСМК
Леонтьев А.С. 57

НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕЗОНАНСНО-ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА
Лубяной Д.А.,Толстикова Ю.А., Буймов Д.В., Мусохранов В.В., Кузин Е.Г., Марченко И.А. 62

ЛИНЕЙКА ДЛЯ РАСЧЕТА ШИХТЫ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ КУЗЬМИЧЕВА И.Я. – ПРООБРАЗ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ШИХТЫ
Лубяной Д.А. 62

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕСКОВ ПРИБАЙКАЛЬЯ В КАЧЕСТВЕ СУХИХ БАРЬЕРНЫХ СМЕСЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ АЛЮМИНИЯ
Немчинова Н.В., Яковлева А.А., Тютрин А.А., Гудкова О.П. 71

РАСЧЕТ СЕРОПОГЛОТИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ШЛАКА ДСП В РАЗЛИЧНЫЕ ПЕРИОДЫ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ОСНОВНОСТИ
Журавлев А.А. 76

РАСЧЕТ УДАЛЕНИЯ АЗОТА ИЗ СТАЛИ ШЛАКОВЫМИ СМЕСЯМИ С ВЫСОКОЙ НИТРИДНОЙ ЕМКОСТЬЮ
Журавлев А.А. 77

ВЛИЯНИЕ ВНЕДРЕНИЯ НАНОПОРОШКА W НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОГО СПЛАВА МАРКИ АК12
Башев В.С. 79

ДИВЕРСИФИКАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКА ПЫЛЕВИДНЫХ ОТХОДОВ И РУД НА ОСНОВЕ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО АГРЕГАТА СЭР
Цымбал В.П., Рыбушкин А.А., Рыбенко И.А., Кожемяченко В.И., Калашников С.Н., Ермакова Л.А. 85

Научное издание

МЕТАЛЛУРГИЯ: ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО

«Металлургия – 2019»

Труды XXI Международной научно-практической конференции

Часть 2

Под общей редакцией профессора Е.В. Протопопова

Технический редактор В.Е. Хомичева

Компьютерная верстка Н.В. Ознобихина

Подписано в печать 04.10.2019 г.
Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага офисная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 27,0 Уч.-изд. л. 29,4 Тираж 300 экз. Заказ № 236

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