

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»  
Российская академия естественных наук

**ВЕСТНИК  
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

*Сборник научных трудов*

*Издается с 1994 г. ежегодно*

Выпуск 38

Москва  
Новокузнецк  
2017

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

В 387

**В 387 Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии:** Сборник научных трудов. Вып. 38 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянец (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2017 – 230 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

Электронная версия сборника представлена на сайте <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания»

Ил. 45, табл. 28, библиогр. назв. 222.

*Редакционная коллегия:* Аренс В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянец М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., НИ ИрГТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спирин Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., АО «Евраз – ЗСМК», г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2017

## Содержание

|                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ .....                                                                                                                                                                                                               | 7  |
| МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....                                                                                                                                                                           | 8  |
| <i>Чжан Кэ</i>                                                                                                                                                                                                                  |    |
| Проектно-исследовательский институт цветной металлургии Китая: научно-технологический потенциал, проектирование, строительство, инжиниринг, рециклинг горно-металлургических, энергетических и водохозяйственных объектов ..... | 9  |
| <i>И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, И.Т. Амонов, Н.Р. Эсанов</i>                                                                                                                                                                    |    |
| Влияния щелочноземельных металлов на анодное поведение сплава Al + 2,18 % Fe в нейтральной среде .....                                                                                                                          | 13 |
| <i>В.М. Павловец</i>                                                                                                                                                                                                            |    |
| Анализ технических решений, направленных на управление пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании .....                                            | 22 |
| <i>В.М. Павловец</i>                                                                                                                                                                                                            |    |
| Анализ технических решений, направленных на организацию предварительного влагоудаления на участке окомкования в производстве железорудных окатышей .....                                                                        | 30 |
| <i>В.М. Павловец</i>                                                                                                                                                                                                            |    |
| Анализ технических решений, направленных на управление процессом зародышеобразования в производстве окатышей, основанном на принудительном зародышеобразовании .....                                                            | 37 |
| <i>В.Б. Деев, Е.С. Прусов, С.В. Сметанюк, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева</i>                                                                                                                                                   |    |
| Влияние железа на характер кристаллизации, литейные и механические свойства заэвтектического силумина .....                                                                                                                     | 43 |
| <i>М.В. Темлянец, К.С. Коноз, О.В. Кузнецова, Э.Я. Живаго, В.Я. Целлермаер</i>                                                                                                                                                  |    |
| Исследование высокотемпературного окисления рессорно-пружинной стали марки 40С2 и особенностей строения ее окарины .....                                                                                                        | 48 |
| <i>А.А. Уманский, В.В. Дорофеев, А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков, А.В. Добрянский</i>                                                                                                                                            |    |
| Совершенствование режимов прокатки острых рельсов на универсальном рельсобалочном стане .....                                                                                                                                   | 55 |
| <i>Е.С. Прусов, В.Б. Деев</i>                                                                                                                                                                                                   |    |
| Перспективы применения ультразвука при вводе наночастиц в алюминиевые расплавы .....                                                                                                                                            | 64 |
| <i>Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев, С.Н. Кратько, Р.Е. Крюков</i>                                                                                                                                                    |    |
| Поиск оптимальных технологических параметров режима работы рельсосварочной машины К1000 .....                                                                                                                                   | 70 |
| <i>Р.А. Шевченко, С.Н. Кратько, П.Е. Шишкин, Н.А. Козырев, В.И. Базайкин</i>                                                                                                                                                    |    |
| Применение методов математического моделирования для оптимизации технологических параметров процесса контактной сварки рельсов на машине К1000 .....                                                                            | 76 |
| <i>Р.А. Шевченко, В.И. Базайкин, С.Н. Кратько, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев</i>                                                                                                                                                  |    |
| Анализ токового режима работы сварочной машины К1000 при сварке рельсов на этапе оплавления .....                                                                                                                               | 81 |
| ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....                                                                                                                                                                         | 88 |
| <i>Т.И. Алексеева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева</i>                                                                                                                                                                             |    |
| Термодинамическое моделирование плазмосинтеза карбида циркония .....                                                                                                                                                            | 89 |
| <i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова</i>                                                                                                                                                                               |    |
| Исследование механизма плазмосинтеза диборида титана .....                                                                                                                                                                      | 97 |

УДК 669. 162. 12:622

В.М. Павловец

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

## АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОКАТЫШЕЙ, ОСНОВАННОМ НА ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИИ

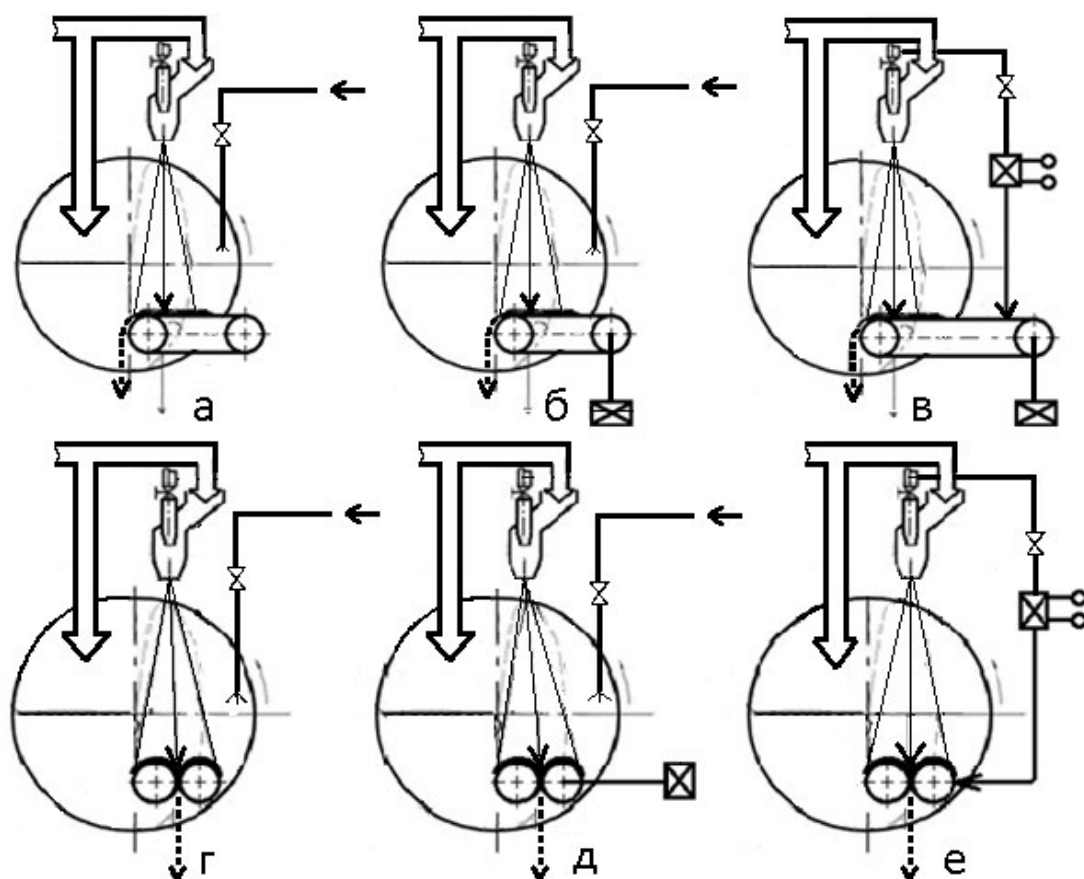
В работе проанализированы технические решения, направленные на управление процессом окомкования и зародышеобразования в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании.

The paper analyzes technical solutions aimed at controlling the process of pelletization and nucleation in pellet production technology based on forced nucleation.

Технология получения сырых окатышей на окомкователе по технологии ЗНД (зародышеобразование напылением и доокомкование) включает две основные стадии: формирование зародышей теплосиловым напылением влажной шихты на основу для напыления и формирование оболочки окатышей методом доокомкования. Для формирования зародышей необходимо последовательно загрузить влажную шихту в струйный аппарат, в корпусе которого она ускоряется сжатым воздухом с давлением  $P_v$  и температурой  $t_v$ . Напыление шихты для формирования напыленного слоя шихты (НС) может быть организовано на шихтовый гарнисаж (ШГ) в холстой зоне окомкователя или на движущуюся бесконечную транспортную ленту (ЭТЛ), расположенную в корпусе окомкователя, либо на вращающиеся металлические барабаны, конструктивно напоминающие вальцовый пресс в технологии брикетирования [1, 2]. После деления НС на зародыши формируется зародышевая масса определённой влажности, плотности, прочности, величина которых непосредственно зависит от давления ВШС. Зародыши, полученные по этой технологии, являются шихтовой матрицей для формирования оболочки окатышей традиционным методом доокомкования, основанного на перекате материала по поверхности шихтового гарнисажа (ШГ) в рабочей зоне окомкователя. В этой технологической схеме от параметров напыления, характеристик напыленного слоя (коэффициент напыления, диаметр и высота) и зародышей (прочность, плотность, влажность) зависят металлургические свойства окатышей и производительность окомкователя и всего технологического передела.

Целью работы явился анализ технических решений, направленных на управление процессом зародышеобразования путем установки в рабочем пространстве окомкователя основы для зародышеобразования в виде транспортной ленты или вращающихся барабанов.

Экспериментальные схемы, показанные на рисунке 1, были оформлены в виде объектов интеллектуальной собственности.



Схемы формирования НС и зародышей : а – напылением одной ВШС на движущуюся эластичную транспортную ленту (патент РФ №2297461), б – тоже с учетом взаимосвязи между скоростью ленты и скоростью напыления шихты (патент РФ №2347826), в – тоже с подогревом транспортной ленты нагретым сжатым воздухом (патент РФ №2387720), г – напылением одной ВШС на цилиндрические барабаны, вращающиеся во встречном направлении (патент РФ №2278172), д – тоже с увлажнением поверхности барабанов перед напылением и механической очисткой их поверхности (патент РФ №2385351), е – тоже с одновременным подогревом поверхности барабанов и сдуванием с поверхности барабанов остатков шихты нагретыми струями сжатого воздуха (патент РФ №2625857)

Рисунок 1 – Технические схемы, позволяющие формировать НС и зародыши на поверхности эластичной транспортной ленты и вращающихся металлических барабанов

На их основе были построены физические модели в масштабе 1:10, в которых окомкователь имел диаметр  $D=0,62$  м, работал с частотой вращения 12 об/мин, а угол наклона тарели составлял  $45^\circ$ . Расход шихты на зародышеобразование не превышал 0,05 кг/с, что составляло 40 % от общей массы загружаемого материала. Остальная масса шихты поступала в окомкователь для формирования оболочки окатышей в режиме переката. В качестве основы для напыления шихты в первой серии экспериментов использовали бесконечную эластичную транспортерную ленту шириной 250 мм и длиной 450 мм, намотанную на цилиндрические барабаны диам. 100 мм. Один из барабанов был снабжен электроприводом с частотным регулированием мощности (схема б). Конструктивно устройство для формирования зародышей представляло собой конвейерный транспортер. Для удобства проведения экспериментов процессы зародышеобразования и доокомкования были организованы последовательно. Для этого сначала формировали зародыши, после чего накатывали шихтовую оболочку. Поэтому после формирования зародышей на ЭТЛ их загружали в рабочее пространство окомкователя и доокомковывали в режиме переката в течение 5 минут. Во второй серии экспериментов в качестве основы для напыления шихты и зародышеобразования использовали встречно вращающиеся металлические барабаны, установленные с зазором друг к другу в рабочем пространстве окомкователя. Эти схемы реализованы на принципе работы вальцевого пресса [3]. Для анализа эффективности экспериментальной схемы окатыши в количестве 0,5 кг отбирали после завершения процесса окомкования. Для них определяли влажность  $W_{ок}$  стандартным методом ( $t=105^\circ\text{C}$ ,  $\tau=30$  минут), и которую сравнивали с влажностью загружаемой шихты ( $W_{ш}$ ), определяя коэффициент безразмерной влажности  $\theta_w$  ( $\theta_w = W_{ок}/W_{ш}$ ), часто используемый для характеристики технологии принудительного зародышеобразования [1, 2]. Сложность экспериментальной схемы определяли по количеству конструктивных элементов схемы, налипанию шихты на детали схемы, по уровню стабильности работы, по появлению отказов и затруднений в работе при визуальном наблюдении за процессом. Выход годного (ВГ) являлся сопутствующим показателем. Численное значение выхода годного вычисляли по разности между массой загружаемой шихты и массой образовавшейся мелочи фракции  $\leq 5$  мм в течение определенного цикла зародышеобразования и доокомкования (5 минут). При определении ВГ учитывали, что годные окатыши имели размер 12-16 мм, а их прочность составляла более 0,5 кг/окатыш. Поэтому в настоящей статье ограничились основными параметрами (сложность схемы, выход годного, прочность зародышей, относительное влагоудаление), которые непосредственно связаны с режимом зародышеобразования на участке окомкования. Характеристика технических схем и результаты выполненных экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика технических схем и результаты экспериментов

| Номер технической схемы (рис.1) | Показатели работы устройства ЭТЛ-окомкователь |                  |                          |            |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|------------------|--------------------------|------------|
|                                 | Сложность схемы                               | Выход годного, % | Прочность зародышей, кПа | $\theta_w$ |
| а                               | Простая                                       | 90,4             | 90-105                   | 0,85       |
| б                               | Сложная                                       | 92,6             | 90-105                   | 0,85       |
| в                               | Простая                                       | 86,3             | 95-110                   | 0,83       |
| г                               | Простая                                       | 81,1             | 82-95                    | 0,84       |
| д                               | Сложная                                       | 82,2             | 83-96                    | 0,86       |
| е                               | Сложная                                       | 79,8             | 84-96                    | 0,83       |

Сущность первой технической схемы (а) заключается в напылении влажной шихты на поверхность эластичной ленты и деление напыленного слоя (НС) механическим путем на мерные зародышевые фрагменты. После чего полученные зародыши непрерывно загружаются в рабочее пространство окомкователя и в смеси с влажной шихтой комкуются в режиме перека с получением кондиционных окатышей. Подобная схема относится к технически сложным, но обладает существенным преимуществом – автономность и независимость от работы основного окомковательного агрегата. Это позволяет назначить технологические параметры окомкователя (угол наклона днища тарели, частоту вращения, условия увлажнения) по условиям деформации и формообразования зародышей рабочей зоны окомкователя. При этом существует техническое пространство между ЭТР и окомкователем для организованного воздействия на степень смятия зародышей. Достоинством этой схемы является возможность оребрения и модифицирования поверхности ЭТЛ, повышающих эффективность напыления шихты на эластичную основу. Схема, показанная на рисунке 1, а, позволяет увеличить коэффициент напыления шихты до 95-96 % при интенсивном увлажнении зоны напыления и поверхности НС. Подобные технические мероприятия реализовать на ШГ практически невозможно. На ЭТЛ возможна установка отражающих экранов для ориентации влажной шихты в окомкователь. Транспортная лента имеет некоторую степень свободы, позволяя ориентировать и загружать зародыши в любую зону окомкователя. Наличие дополнительной поверхности ЭТЛ позволяет прогнозировать повышение производительности всего комплекса агрегатов транспортная лента-окомкователь. Схема (а) позволяет менять расход, размеры и прочность зародышей в широких пределах. Она также позволяет организовать процесс влагоудаления в ходе напыления шихты. Устройство можно при необходимости снабдить экранами, а неокомкованная шихтовая мелочь способна организованно поступать в рабочее простран-

ство окомкователя. В качестве недостатка указанной схемы можно отнести отсутствие рабочего процесса формообразования шихты в холостой зоне окомкователя.

В схеме (б) реализован принцип согласованности между скоростью ленты и скоростью напыления, согласно которому скорость ленты необходимо увеличивать на 0,08-0,24 м/с при повышении расхода напыляемой шихты на 1,0 – 2,0 кг/с. Это необходимо для того, чтобы средняя высота НС не превышала величины 5-10 мм и позволяла в процессе доокомкования получить окатыши кондиционных размеров 12-16 мм. Для дополнительного регулирования процесса напыления возможно использовать параметры напыления струйного аппарата: диаметр, расстояние между соплом и напыляемой основой, коэффициент инжекции, подачу более эффективного увлажнителя или связки и др. Свойствами шихты (влажностью, грансоставом, наличием добавок) также можно влиять на эффективность напыления. Эта схема требует установки частотного регулятора мощности и является более сложной по сравнению с техническим решением (а).

В схеме (в) эластичную ленту подогревают до 250 °С перед напылением, позволяя за счет теплоотдачи к влажному слою шихты повысить степень влагоудаления у НС до  $\theta_w = 0,83$ . Здесь же предложено обеспечивать повышение равномерности фракционного состава зародышей вращающимся барабаном с ребрами (на схеме не показан), установленным на хвостовой части ЭТЛ. При напылении на водонепроницаемую ЭТЛ не происходит влагопереноса на нижней границе НС, в отличие от напыления на шихтовый гарнисаж. Меньшая величина  $\theta_w$  позволяет в большей степени увеличить уплотнение шихты на жесткой поверхности ЭТЛ и повысить прочность зародышей на 3-5 %. Эта схема также относится к технически сложным решениям и имеет ограничения по температуре и выходу годного. Нагрев поверхности ЭТЛ позволяет усилить влагоудаление на границе НС-ЭТЛ, но одновременно ухудшает условия адгезии на этой границе и снижает выход годного. Чтобы исключить этот негативный процесс следует предпринять дополнительные технические меры: провести модификацию поверхности ТР, применять ПАВ в шихте, нанести клейкое покрытие на ТР, использовать отражающие экраны и применить другие известные инженерные решения.

Второе направление зародышеобразования связано с установкой в рабочем пространстве окомкователя встречно вращающихся металлических барабанов, установленных с зазором друг к другу и моделирующих работу вальцового пресса. Степень влагоудаления у зародышей ( $\theta_w = 0,84-0,85$ ), полученным по этим схемам, близка к параметрам  $\theta_w$  для схем (а-в). Однако условия напыления влажной шихты на криволинейную поверхность барабанов существенно хуже. Процесс сопровождается отскоком шихты и требует снижения мощности струйного аппарата (расхода и ско-

рости напыляемой шихты, давления воздуха) и сооружения отражающих экранов. В этой схеме трудно обеспечить равномерность напыления влажной шихты. Поэтому здесь самый низкий выход годного, более низкая прочность зародышей и большой разброс зародышей по размерам.

Основным достоинством проанализированных технических схем является использование техники напыления, позволяющей в напыленном зародышевом материале формировать открытую пористость и пониженное содержание влаги. Схемы (г), (д), (е) вполне работоспособны, но требуют очистки барабанов от остатков напыляемой шихты, что несколько усложняет аппаратное оформление этих способов. Для устранения этого недостатка предложено устанавливать механические скребки (схема г), предусматривать увлажнение поверхности барабанов перед напылением (схема д), а также организовывать одновременный подогрев поверхности барабанов и сдувание остатков шихты нагретыми струями сжатого воздуха (схема е). Эксперименты выявили основной недостаток в работе указанных схем в системе струйный аппарат – вращающиеся валки: большой разброс размеров получаемых зародышей и трудность регулирования этого процесса. Это объясняется сложностью напыления влажной шихты на криволинейную поверхность валков, наличием отскока и неконтролируемого налипания шихты. Несмотря на широкое распространение процесса брикетирования дисперсных материалов вальцовыми прессами, эксперименты показали необходимость дополнительной проработки технологии зародышеобразования на вращающихся валках с целью повышения стабильности процесса.

**Выводы.** Проанализированы технические схемы, реализующие методы принудительного зародышеобразования влажной шихты с помощью установки дополнительных механических устройств в рабочем пространстве окомкователя, в качестве которых предложено использовать поверхности эластичной транспортерной ленты и вращающихся металлических барабанов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 345 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – 373 с.
3. Ожогин В.В. Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья / В.В. Ожогин. – Мариуполь : ПГТУ, 2010. – 442 с.

**Вестник горно-металлургической секции РАЕН.  
Отделение металлургии**

*Сборник научных трудов*

Компьютерный набор Темлянцева Е.Н.

Подписано в печать 22.09.2017 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 13,5 Уч.-изд.л. 14,4 Тираж 300 экз. Заказ № 447

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