

Научный журнал

ВЕСТНИК

Сибирского
государственного
индустриального
университета

№ 3 (41), 2022

Основан в 2012 году
Выходит 4 раза в год

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего об-
разования «Сибирский государственный
индустриальный университет»

Редакционная коллегия

Коновалов С.В.
(главный редактор)
Запольская Е.М.
(отв. секретарь)

Агеев Е.В.
Бецофен С.Я.
Бурков В.Н.
Буркова И.В.
Гречников Ф.В.
Громов В.Е.
Данилов В.И.
Деев В.Б.
Jayalakshmi Subramanian
Жеребцов С.В.
Захарова А.А.
Затеякин О.А.
Зеркаль С.М.
Зимин А.В.
Колубаев Е.А.
Копеин В.В.
Нехорошева Л.Н.
Осколкова Т.Н.
Пантелеев В.И.
Петрова Т.В.
Ramachandra Arvind Singh
Рыбенко И.А.
Симченко Н.А.
Siddiquee Arshad Noor
Смагин В.И.
Стрижак П.А.
Султангузин И.А.
Темлянцев М.В.
Хамзаева А.М.
Chen Xizhang
Чехонадских А.В.
Шиплюк А.Н.
Юлдашев Н.Х.
Юрьев А.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

У ЖУРНАЛА ЮБИЛЕЙ3

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

**Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Юрьев А.А., Ефимов М.О., Куз-
нецов Р.В., Панченко И.А.** Перераспределение карбидной фа-
зы и атомов углерода в дифференцированно закаленных рельсах
при ультрадлительной эксплуатации.....4
Столяров В.В. Аномальный эффект упрочнения при растяже-
нии, сопровождаемом импульсным током.....11

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Рыбенко И.А., Сеченов П.А. Инструментальная система расче-
та термодинамических функций индивидуальных веществ, хи-
мических реакций и сложной многокомпонентной гетерогенной
системы.....18

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Одинцов А.А. Современное состояние технологии производства
железородного агломерата в отечественной металлургии.....28
Прусов Е.С., Шабалдин И.В., Деев В.Б. Оценка влияния леги-
рующих элементов на межфазное взаимодействие компонентов
литых алюмоматричных композитов по изменению термодина-
мической активности.....37
**Jayalakshmi S., Arvind Singh R., Vivek Anand A., Srinivas Rao K.,
Konovalov S.** Microstructure dependence of Al6061 surface compo-
site on tool rotation speed during friction stir processing.....45

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Перекрест Н.В., Перекрест А.А. Инновационная составляющая инструментария устойчивого развития горнодобывающего предприятия.....	56
Бобко Т.В., Петрова Т.В. Пространственная организация региональной системы высшего образования Кемеровской области.....	63
К сведению авторов	74

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС77-77872 от 03.03.2021 г.

Адрес редакции:

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 433 М
тел. 8-3843-74-86-28
[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)
e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Адрес издателя:

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 336 Г
тел. 8-3843-46-35-02
e-mail: rector@sibsiu.ru

Адрес типографии:

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 280 Г
тел. 8-3843-46-44-02

Подписные индексы:

Объединенный каталог «Пресса России» – 41270

Подписано в печать

30.09.2022 г.

Выход в свет

30.09.2022 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл.печ.л. 4,3.

Уч.-изд.л. 4,6.

Тираж 300 экз.

Заказ № 249.

Цена свободная.

У ЖУРНАЛА ЮБИЛЕЙ!!!!

Наш журнал празднует свой первый Юбилей – 10 лет!

Много или мало проделано редакционной коллегией журнала за этот небольшой период? Вероятно, судить не нам, а нашим читателям и авторам.

В 2012 г. университетом был учрежден новый научный журнал «Вестник Сибирского государственного индустриального университета». Изначально журнал содержал разделы: материаловедение, горное дело, геотехнологии, машиностроение, транспорт, энергетика, электротехнологии, химия, химические технологии, архитектура, строительство, автоматизация, информационные технологии, металлургия, экология, рациональное природопользование, экономика и управление, образование, педагогика, гуманитарные науки, социальные науки.

Охват столь широкого спектра отраслей наук и научных направлений связан со структурой исследований, проводимых научно-педагогическими школами Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ), фактически полным отсутствием в регионе специализированных научных журналов по целому ряду технических направлений и инновационных отраслей развития экономики. Издание направлено на пропаганду научных достижений и передового опыта ученых университета, Кузбасса, России, создание условий для публикации соискателями, аспирантами и докторантами результатов диссертационных исследований, повышение результативности функционирования диссертационных советов, вовлечение талантливой и одаренной молодежи в науку.

Мы очень трудно начинали, несмотря на то, что имели прочную основу в виде издаваемого в СибГИУ совместно с НИТУ МИСИС журнала «Известия вузов. Черная металлургия». Это предполагало высокие требования к качеству и форме подачи материала, поначалу редколлегия с трудом набирала в очередной номер достойные статьи. Постепенно стало формироваться устойчивое ядро авторов нашего журнала, среди которых были ведущие российские и зарубежные ученые. Очевидно, что в существенной степени журнал «Вестник СибГИУ», издающийся на базе Сибирского государственного индустриального университета, стал своеобразным научным рупором университета, позволяя широкому кругу российских и зарубежных читателей знакомиться с результатами его исследований и разработок (конечно, с особым акцентом на сибирскую проблематику). Многие наши молодые авторы стали за прошедшие 10 лет авторитетными учеными, и мы выражаем им искреннюю признательность за верность журналу и его традициям.

За 10 лет деятельности журнал выпустил 40 очень интересных, уникальных по содержанию, красочных по оформлению номеров, в которых были опубликованы более 400 научно-популярных статей о результатах фундаментальных исследований.

Тематика публикаций в журнале была весьма разнообразной. На страницах журнала оставили свой след не только российские ученые и специалисты, но и авторы (представители) многих стран. Мы охотно предоставляли свои страницы и маститым ученым, и молодым специалистам, преподавателям ВУЗов, магистрантам, студентам. Так будет и дальше.

Журнал «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» включен в РИНЦ (elibrary.ru), в «КиберЛенинку». Он имеет современный и удобный для читателей и авторов двуязычный сайт, где выкладываются электронные версии статей. В наших планах ввести на сайте дискуссионный онлайн-раздел, что позволит обеспечить хорошую обратную связь с читателями.

Несмотря на серьезные трудности, в которых находится современная российская наука, издатель и редколлегия остаются верны базовому принципу нашего издания: все публикации должны быть бесплатными, главное – высокое качество статей.

Принято говорить, что юбилей – не повод рассуждать о заслугах, но время подумать о будущих свершениях. Издателем и редакционной коллегией журнала поставлена задача на ближайшие 5 лет: войти в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук», в Российский индекс научного цитирования (RSCI) и в международную базу данных Scopus. В связи с этим было принято трудное решение сократить количество разделов журнала, оставив наиболее перспективные для науки Кузбасса. Однако такое решение открыло возможность создания новых журналов на базе СибГИУ.

Благодарим всех, кто взял на себя труд и смелость выпускать номера наших журналов. Отдельная благодарность нашим многочисленным рецензентам. Мы преодолели первый рубеж. Впереди новые горизонты. Оставайтесь с нами.

Желаем журналу «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» много лет процветания, интересных материалов для публикаций, новых замечательных авторов и читателей!

Оригинальная статья

УДК 669.539.382:669.17:625.1

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ И АТОМОВ УГЛЕРОДА В ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСАХ ПРИ УЛЬТРАДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю. Ф. Иванов¹, В. Е. Громов², А. А. Юрьев³, М. О. Ефимов², Р. В. Кузнецов²,
И. А. Панченко²

¹Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический 2/3)

²Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

³АО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Космическое шоссе, 16)

Аннотация. Методами сканирующей, просвечивающей электронной микроскопии выполнены исследования перераспределения карбидной фазы и атомов углерода в сечении головки на расстояниях 0, 2 и 10 мм от поверхности по радиусу скругления выкружки и по центральной оси 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов после экстремально длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж с 2013 г. 1770 млн т брутто).

Ключевые слова: рельсы, карбидная фаза, углерод, перераспределение, эксплуатация

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., А.А., Юрьев А.А., Ефимов М.О., Кузнецов Р.В., Панченко И.А. Перераспределение карбидной фазы и атомов углерода в дифференцированно закаленных рельсах при ультрадлительной эксплуатации // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 4 – 10.

Original article

REDISTRIBUTION OF THE CARBIDE PHASE AND CARBON ATOMS IN DIFFERENTIALLY HARDENED RAILS UNDER ULTRA-LONG OPERATION

Y. F. Ivanov¹, V. E. Gromov², A. A. Yuriev³, M. O. Efimov², R. V. Kuznetsov²,
I. A. Panchenko²

¹Institute of High-Current Electronics SB RAS (2/3 Akademicheskyy Ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

²Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

³JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoye Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654043, Russian Federation)

Abstract. The methods of scanning, transmission electron microscopy were used to study the redistribution of carbide phases and carbon atoms in the cross section of the head at distances of 0, 2, 10 mm from the surface along the rounding radius of the fillet and along the central axis of 100-meter differentially hardened rails after extremely long term operation (passed tonnage with 2013 1770 million gross tons).

Keywords: rails, carbide phase, carbon, redistribution, exploitation

For citation: Ivanov Yu.F., Gromov V.E., A.A., Yuriev A.A., Efimov M.O., Kuznetsov R.V., Panchenko I.A. Redistribution of the carbide phase and carbon atoms in differentially hardened rails under ultra-long operation. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 4 – 10. (In Russ.).

Введение

Анализ причин износа и деградации свойств рельсов при эксплуатации является традиционным направлением в физике сталей. Изучение работ отечественных и зарубежных исследователей за последние два десятилетия показывает, что как в объемно-закаленных, так и в дифференцированно закаленных рельсах изменение структуры в поверхностных слоях головки, накопление плотности дислокаций, аномально высокая микротвердость, наличие белого слоя способны привести к выходу рельсов из строя [1].

Длительные деформационные воздействия на рельсы инициируют в них сложные процессы, которые способствуют ухудшению механических свойств. Получение информации в этой области определяется как фундаментальностью проблем физики конденсированного состояния, так и практической их значимостью. Установление закономерностей эволюции параметров структурно-фазового состояния и дислокационной субструктуры при длительной эксплуатации рельсов возможно лишь при применении высокоинформативных методов современного физического материаловедения и, в первую очередь, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [2 – 8]. Полученный с помощью методов ПЭМ банк данных позволяет количественно оценить вклады структурных составляющих и дефектной субструктуры в упрочнение рельсов при эксплуатации. Пластинчатый перлит является основной структурной составляющей рельсов. В процессе длительной эксплуатации его трансформация будет во многом определять эксплуатационные свойства рельсов.

Целью настоящей работы является количественная оценка перераспределения карбидной фазы и атомов углерода в головке рельсов при длительной эксплуатации.

Материал и методы исследования

Материалом исследования являлись образцы дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» после пропущенного тоннажа 1770 млн т брутто в процессе полигонных испытаний на Экспериментальном кольце АО «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (г. Щербинка).

Количественный анализ структуры стали осуществляли методами стереологии и количественной электронной микроскопии; фазовый анализ стали проводили путем индирования микроэлек-

тронограмм с применением темнопольной методики. Металлографические исследования выполнялись на оптическом микроскопе Olympus GX51, оснащенный цифровой камерой с программным обеспечением Siam Photolab 700. Макроструктуру металла рельсов выявляли в соответствии с требованиями Российского стандарта 51685 – 2013 на полнопрофильном темплете, вырезанном из рельса в поперечном направлении.

Концентрацию атомов углерода в кристаллической решетке α -железа определяли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD-6000, Shimadzu). Исследования дефектной субструктуры, морфологии фаз и состояния карбидной фазы рельсов осуществляли методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Фольги для исследования изготавливали методами электролитического утонения пластинок, вырезанных электроискровым методом на расстоянии 2 мм, 10 мм и вблизи поверхности катания вдоль центральной оси и по рабочей выкружке [1].

Результаты и их обсуждение

Независимо от направления исследования в слое толщиной не менее 2,0 мм преобразование зерен и колоний пластинчатого перлита протекает в несколько этапов. Во-первых, выявляются зерна, сохранившие структуру пластинчатого перлита с фрагментированными пластинами феррита. Во-вторых, наблюдаются колонии перлита, пластины цементита в которых разбиваются на отдельные фрагменты, сдвинутые относительно друг друга. В-третьих, наблюдаются колонии перлита, пластины цементита в которых разделены на отдельные частицы карбида железа округлой формы, декорирующие пластины феррита. Их размеры изменяются в пределах от 10 до 45 нм на поверхности и увеличиваются по мере удаления от поверхности катания на 2 мм до 80 – 95 нм и 60 – 75 нм соответственно при измерении по центральной оси и радиусу выкружки. В-четвертых, наблюдаются области материала с поликристаллической структурой.

Микроэлектроннограмма, полученная с фольги вблизи поверхности катания, имеет кольцевое строение. Последнее указывает на субмикронномасштабный размер кристаллитов. Количественный анализ такой структуры показывает, что размеры кристаллитов изменяются в пределах от 150 до 250 нм. Дифракционные кольца сформированы отдельно расположенными точечными рефлексами. Такое строение колец свидетельствует о большеугловой разориентации кристаллитов, то есть о формировании именно зеренной

Количественные характеристики структуры рельсов после пропуска 1770 млн т брутто
Table 1. Quantitative characteristics of the structure of rails after passing 1770 million tons gross

Параметр (среднее по анализируемому слою)	Расстояние до поверхности катания, мм			Расстояние до рабочей выкружки		
	10	2	поверхность	10	2	поверхность
Объемная доля Fe ₃ C, %	10,40	8,20	4,50	9,60	3,60	3,10
Доля углерода, %	0,74	0,59	0,32	0,69	0,26	0,22

структуры. На границах зерен феррита располагаются частицы карбидной фазы. Размеры частиц изменяются в пределах от 25 до 75 нм. Можно предположить, что такой тип структуры сформировался в результате динамической рекристаллизации стали, имеющей место при циклическом нагружении металла рельсов в процессе сверхдлительной эксплуатации [9 – 11].

Эксплуатация рельсов сопровождается деформационным преобразованием структуры перлита, проявлениями которого являются разрушение и растворение пластин цементита. Выполненные оценки показали, что вне зависимости от направления исследования объемная доля цементита увеличивается от 4,5 % на поверхности до 10,4 % на глубине 10 мм при анализе вдоль центральной оси и от 3,1 до 9,6 % вдоль радиуса скругления рабочей выкружки соответственно (табл. 1).

Выполненные оценки показывают, что концентрация углерода в слое на глубине 2 мм составляет 0,26 % (по массе), а в поверхностном слое выкружки – 0,22 % (по массе). Для центральной оси симметрии эти значения составляют 0,59 и 0,32 % (по массе) соответственно (табл. 1).

Согласно литературным данным [1, 16, 17] оценку количества атомов углерода, формирующих карбид железа Fe₃C, проводили с использованием выражения $\Delta C = (Fe_3C) = 0,07\Delta V$ (где ΔV – объемная доля частиц карбидной фазы).

Выявленная потеря углерода может быть обусловлена как обезуглероживанием поверхностного слоя металла рельсов в процессе сверхдлительной эксплуатации, так и выходом атомов углерода на дефекты структуры стали (линии дислокаций, границы зерен и субзерен), то есть реализацией процесса динамического

старения стали. Взаимодействие дислокаций с атомами внедрения приводит к закреплению дислокаций, препятствующему их дальнейшему движению, что способствует существенному упрочнению материала и приводит, в конечном итоге, к его охрупчиванию. Факт охрупчивания поверхностного слоя металла проявляется в формировании множественных микро- и макротрещин в головке рельсов.

Известно, что углерод в структуре стали может находиться в твердом растворе на основе α - и γ -железа (на позиции элементов внедрения), на дислокациях (в виде атмосфер Коттрелла и Максвелла), на межфазных (карбид – матрица) и внутрифазных (границы зерен, пакетов и кристаллы пакетного и пластинчатого мартенсита) границах, в частицах карбидной фазы.

Оценку относительного содержания углерода в кристаллической решетке α -Fe и частицах карбидных фаз стали осуществляли по выражениям, приведенным в табл. 2 (где ΔV_α и ΔV_i – объемная доля α -Fe и карбидных фаз; $a_\alpha = 0,28782$ нм – текущий параметр решетки α -фазы; $a_\alpha^0 = 0,28668$ нм – табличное значение параметра решетки α -фазы; C_0 – среднее содержание углерода в стали).

Результаты выполненных оценок представлены в табл. 3. Если в исходном состоянии основной фазой, содержащей атомы углерода, являются частицы цементита, то после эксплуатации рельсов местом расположения углерода (наряду с частицами цементита) являются дефекты кристаллической структуры стали (дислокации, границы зерен и субзерен), а в поверхностном слое стали углерод обнаруживается и в кристаллической решетке α -железа.

Из табл. 3 также следует, что процессы эво-

Оценочные выражения для анализа распределения углерода в стали
Table 2. Evaluation expressions for the analysis of carbon distribution in steel

Место расположения углерода	Оценочное выражение
Твердый раствор на основе α -железа	$\Delta C_\alpha = \Delta V_\alpha \frac{a_\alpha - a_\alpha^0}{39 \pm 4} \cdot 10^3$
Частицы карбидных фаз	$\Delta C(Fe_3C) = 0,07 \cdot \Delta V_i$
Элементы дефектной структуры	$\Delta C_d = C_0 - \Delta C_\alpha - \Delta C(Fe_3C)$

Распределение атомов углерода в структуре рельсов (пропущенный тоннаж 1770 млн т брутто)
Table 3. Distribution of carbon atoms in the structure of rails (missed tonnage 1770 million tons gross)

Структурный элемент	Концентрация углерода, % (по массе)					
	Расстояние до поверхности катания, мм			Расстояние до поверхности выкружки, мм		
	0	2	10	0	2	10
Частицы цементита	0,32	0,59	0,74	0,22	0,26	0,69
Кристаллическая решетка α -Fe	0	0	0	0	0	0
Дефекты структуры стали (дислокации, субграницы, границы)	0,44	0,17	0,02	0,54	0,50	0,07

люции/деградации карбидной фазы и перераспределения атомов углерода наиболее интенсивно реализуются в поверхностных слоях до 2 мм. Увеличение пропущенного тоннажа также сопровождается заметным перемещением атомов углерода на дефекты структуры стали в рабочей выкружке по сравнению с поверхностью катания.

Эксплуатация рельсов по определению должна происходить при нагрузках ниже предела текучести стали. Более того, преимущественной схемой нагружения материала на поверхности катания является сжатие, что должно препятствовать возможному зарождению микротрещин. Наконец, воздействие движущегося железнодорожного транспорта имеет циклический характер, поэтому происходящие изменения следует классифицировать как имеющие преимущественно усталостную природу.

Механизм распада цементита заключается в «вытягивании» в процессе пластической деформации дислокациями атомов углерода из решетки карбидной фазы с образованием атмосфер Коттрелла вследствие заметной разницы средней энергии связи атомов углерода с дислокациями (0,6 эВ) и с атомами железа в решетке цементита (0,4 эВ). Согласно классическим представлениям диффузия углерода протекает в поле напряжений, создаваемом дислокационной субструктурой, которая формируется вокруг пластин цементита. При этом степень распада цементита, как правило, определяется величиной плотности дислокаций и типом субструктуры [12–15].

При «вытягивании» атомов углерода из кристаллической решетки наблюдается изменение дефектной субструктуры карбида из-за проникновения дислокаций в решетку цементита. Однако некогерентная межфазная граница α -Fe – Fe₃C будет этому препятствовать, оставляя возможным лишь диффузионный массоперенос, который может быть реализован по различным механизмам, обсуждаемым в работах В.Г. Гаврилюка (диффузией по междоузлиям и по деформационным вакансиям).

В работах академика В.Е. Панина показано, что ротационные моды пластической деформации связаны с формированием локальной кривизны решетки; в этой связи можно полагать, что развитие подобного эффекта в металле рельсов делает возможным (облегченным) перемещение атомов углерода. В силу циклического характера приложения нагрузки такой механизм может развиваться обратимо, что позволяет элементам внутренней структуры перестраиваться без образования несплошностей. Следует особо отметить, что данный процесс не носит диффузионного характера, поскольку развивается в условиях невысоких температур, а нагрузка прикладывается нерегулярно, но циклически. При пропущенном тоннаже 1770 млн т в поверхностном слое накапливается критическая плотность дефектов, что сдерживает развитие обратимой упругой деформации и вовлечение (развитие) механизма пластической дисторсии. Формирование подобной «критической» структуры будет завершаться зарождением микротрещин по усталостному механизму и выходом рельсов из строя. По этой причине повышение ресурса работы рельсов может быть достигнуто за счет как можно более длительного сохранения структуры, способной к развитию обратимых деформационных процессов, которые исключают разрушение цементитных пластин в перлитных колониях с последующим перемещением атомов углерода на дефекты (дислокации) и области решетки α -железа.

Выводы

Сверхдлительная эксплуатация рельсов сопровождается существенным снижением объемной доли карбидной фазы в поверхностном слое головки (от 10,4 % на расстоянии 10 мм по центральной оси до 4,5 % на поверхности катания и от 9,6 до 3,1 % по радиусу скругления выкружки соответственно), что может быть обусловлено как обезуглероживанием поверхностного слоя, так и выходом атомов углерода на дефекты структуры стали. При этом данный процесс в

поверхностном слое выкружки развит в значительно большей степени по сравнению с поверхностью катания.

Проведена оценка перераспределения атомов углерода в структуре рельсов и показано, что если в исходном состоянии основное содержание углерода наблюдается на частицах цемента (0,74 % (по массе)), то после эксплуатации – на дефектах структуры и его концентрация составляет 0,24 и 0,4 % на поверхности катания и поверхности выкружки соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation / A.A. Yuriev, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, Yu.A. Rubannikova, M.D. Starostenkov, P.Y. Tabakov. Materials Research Forum LLC, 2021. 193 p.
- Эволюция структурно-фазовых состояний металла рельсов при длительной эксплуатации / В.Е. Громов, О.А. Перегудов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, А.А. Юрьев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 164 с.
- Формирование микроструктуры и рельсов при закалке и длительной эксплуатации / В.Е. Громов, К.В. Морозов, О.А. Перегудов, Ю.Ф. Иванов. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2017. 373 с.
- Microstructure of quenched rails / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, A.B. Yuriev, K.V. Morozov. Cambridge. CISP Ltd, 2016. 153 p.
- Ivanisenko Yu., MacLaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite // Acta Mater. 2006. Vol. 54. P. 1659–1669.
- Ning Jiang-li, Courtois-Manara E., Kurmanaeva L., Ganeev A.V., Valiev R.Z., Kübel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion // Materials Science and Engineering: A. 2013. Vol. 581. P. 8–15.
- Ivanisenko Yu., Wunderlich R.K., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Annealing behavior of nanostructured carbon steel produced by severe plastic deformation // Scripta Materialia. 2003. Vol. 49. No. 10. P. 947–952.
- MacLaren I., Ivanisenko Yu., Fecht H.-J., Sauvage X., Valiev R.Z. Early stages of nanostructuring of a pearlitic steel by high pressure torsion deformation. In: Ultrafine Grained Materials IV. Ed. By Zhu E.T. et al. The Minerals, Metals & Materials Society. 2006. P. 1–6.
- Кузнецов Р.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Рубанникова Ю.А., Кормышев В.Е., Юрьев А.А., Попова Н.А. Структурно-фазовое состояние и упрочнение рельсов после экстремально длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18. № 3. С. 328–337.
- Кузнецов Р.В., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Рубанникова Ю.А. Трансформация структурно-фазовых состояний в головке рельсов при экстремально длительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 4. С. 278–283.
- Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Кузнецов Р.В., Глезер А.М., Шлярова Ю.А., Перегудов О.А. Деформационное преобразование структуры и фазового состава поверхности рельсов при сверхдлительной эксплуатации // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 1. С. 35–39.
- Кузнецов Р.В., Перегудов О.А., Шляров В.В. Перераспределение атомов углерода в рельсах при сверхдлительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 2. С. 134–136.
- Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Кузнецов Р.В., Шлярова Ю.А., Юрьев А.А., Кормышев В.Е. Структура рельсов после экстремально длительной эксплуатации // Известия вузов. Физика. 2022. № 3. С. 160–165.
- Кузнецов Р.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Кормышев В.Е., Шлярова Ю.А., Юрьев А.А. Градиенты структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры рельсов при сверхдлительной эксплуатации // Известия Алтайского государственного университета. 2022. № 1. С. 44–50.
- Григорович К.В., Григорович К.В., Громов В.Е., Кузнецов Р.В., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Формирование тонкой структуры перлитной стали при сверхдлительной пластической деформации // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 503. С. 8–12.
- Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. Москва: Наука, 1977. 236 с.
- Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1978. 647 с.

REFERENCES

- Yuriev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. *Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation*. Materials Research Forum LLC, 2021, 193 p.
- Gromov V.E., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Yur'ev A.A. *Evolution of structural-phase states of metal rails during*

- long-term operation*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2017, 164 p. (In Russ.).
3. Gromov V.E., Morozov K.V., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F. *Formation of microstructure and rails during quenching and long-term operation*. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2017, 373 p. (In Russ.).
 4. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yuriev A.B., Morozov K.V. *Microstructure of quenched rails*. Cambridge, CISP Ltd, 2016, 153 p.
 5. Ivanisenko Yu., MacLaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe-C composite. *Acta Mater.* 2006, vol. 54, pp. 1659–1669.
 6. Ning Jiang-li, Courtois-Manara E., Kurmanaeva L., Ganeev A.V., Valiev R.Z., Kübel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion. *Materials Science and Engineering: A*. 2013, vol. 581, pp. 8–15.
 7. Ivanisenko Yu., Wunderlich R.K., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Annealing behavior of nanostructured carbon steel produced by severe plastic deformation. *Scripta Materialia*. 2003, vol. 49, no. 10. P. 947–952.
 8. MacLaren I., Ivanisenko Yu., Fecht H.-J., Sauvage X., Valiev R.Z. Early stages of nanostructuring of a pearlitic steel by high pressure torsion deformation. In: *Ultrafine Grained Materials IV*. Ed. By Zhu E.T. et al. The Minerals, Metals & Materials Society. 2006, pp. 1–6.
 9. Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A., Kormyshev V.E., Yur'ev A.A., Popova N.A. Structural-phase state and hardening of rails after extremely long operation. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2021, vol. 18, no. 3, pp. 328–337. (In Russ.).
 10. Kuznetsov R.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A. Transformation of structural-phase states in the rail head during extremely long operation. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2022, vol. 65, no. 4, pp. 278–283. (In Russ.).
 11. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kuznetsov R.V., Glezer A.M., Shlyarova Yu.A., Peregudov O.A. Deformation transformation of the structure and phase composition of the rail surface during ultra-long operation. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2022, no. 1, pp. 35–39. (In Russ.).
 12. Kuznetsov R.V., Peregudov O.A., Shlyarov V.V. Redistribution of carbon atoms in rails during ultra-long operation. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2022, vol. 65, no. 2, pp. 134–136. (In Russ.).
 13. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kuznetsov R.V., Shlyarova Yu.A., Yur'ev A.A., Kormyshev V.E. Structure of rails after extremely long operation. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2022, no. 3, pp. 160–165. (In Russ.).
 14. Kuznetsov R.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kormyshev V.E., Shlyarova Yu.A., Yur'ev A.A. Gradients of structure, phase composition and dislocation substructure of rails during ultra-long operation. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2022, no. 1, pp. 44–50. (In Russ.).
 15. Grigorovich K.V., Grigorovich K.V., Gromov V.E., Kuznetsov R.V., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A. Formation of a fine structure of pearlitic steel under ultra-long plastic deformation. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki*. 2022, vol. 503, pp. 8–12. (In Russ.).
 16. Kurdyumov V.G., Utevskii L.M., Entin R.I. *Transformations in iron and steel*. Moscow: Nauka, 1977, 236 p. (In Russ.).
 17. Gulyaev A.P. *Metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 647 p. (In Russ.).
- Сведения об авторах**
- Юрий Федорович Иванов**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН
Email: yufi55@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8022-7958
- Виктор Евгеньевич Громов**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: gromov@physics.sibsui.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343
- Антон Алексеевич Юр'ев**, к.т.н., менеджер по управлению продуктами и ресурсами, АО «ЕВРАЗ – объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
Email: ant-yurev@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343
- Михаил Олегович Ефимов**, соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: moefimov@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4890-3730
- Роман Владимирович Кузнецов**, соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: mail@kuzmash.com
ORCID: 0000-0003-1024-1572
- Ирина Алексеевна Панченко**, к.т.н., заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработ-

ки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

Email: i.r.i.ss@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

Information about the authors

Yurii F. Ivanov, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher*, Institute of High Current Electronics SB RAS

Email: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

Viktor E. Gromov, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel'*, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Anton A. Yuriev, *Cand. Sci. (Eng.), Manager of Product and Resource Management*, JSC «EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant»

Email: ant-yurev@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

Mikhail O. Efimov, *Applicant of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel*, Siberian State Industrial University

Email: moefimov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4890-3730

Roman V. Kuznetsov, *Applicant of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel*, Siberian State Industrial University

Email: mail@kuzmash.com

ORCID: 0000-0003-1024-1572

Irina A. Panchenko, *Cand. Sci. (Eng.), Chief of Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing*, Siberian State Industrial University

Email: i.r.i.ss@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 19.07.2022

После доработки 07.09.2022

Принята к публикации 12.09.2022

Received 19.07.2022

Revised 07.09.2022

Accepted 12.09.2022

Оригинальная статья

УДК 669.620.172.2

АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ, СОПРОВОЖДАЕМОМ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ

В. В. Столяров

Институт машиноведения РАН (Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., 4)

Аннотация. Работа посвящена изучению внешних воздействий на деформационное поведение металлических материалов. На основе литературных источников кратко рассмотрены эффекты, сопровождающие прохождение импульсного тока и связанные с ними структурные изменения в металлах и сплавах. Особая роль во вкладе каждого эффекта принадлежит виду (постоянный, импульсный) и режимам (плотность, скважность) тока, а также природе материала. Представлены результаты собственных исследований взаимодействия импульсного тока большой скважности ($Q \geq 10^3$) и пластической деформации квазистатическим растяжением в материалах разной физической природы: чистые металлы (титан и алюминий), сплавы с памятью формы TiNi с обратимым мартенситным превращением (стехиометрического и застехиометрического составов), феррито-перлитная (Ст3) и нержавеющая аустенитная (0X18H10T) стали. Используется импульсный ток плотностью выше критической и большой скважности, позволяющий наблюдать электропластический эффект в виде скачков напряжения при минимальном тепловом эффекте. В отличие от известного классического проявления электропластического эффекта в виде снижения напряжений течения и повышения пластичности демонстрируется проявление аномального упрочнения от нескольких десятков до сотен МПа. Предполагается, что причинами видимых эффектов являются внешние и внутренние факторы: высокая скважность тока, термомеханическое циклирование, смена дислокационного механизма деформации, мартенситное превращение, измельчение структуры, растворение частиц избыточных фаз. При снижении скважности (повышении частоты импульсного тока до 10^3 Гц) и переходе от одиночных импульсов тока к многоимпульсному току эффекты упрочнения на этих же материалах исчезают и заменяются традиционным снижением напряжений течения из-за теплового эффекта тока.

Ключевые слова: импульсный ток, скважность, растяжение, упрочнение, титан, алюминий, сталь, сплавы

Для цитирования: Столяров В.В. Аномальный эффект упрочнения при растяжении, сопровождаемом импульсным током // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 11 – 17.

Original article

ANOMALOUS STRENGTHENING EFFECT IN TENSION ACCOMPANIED BY IMPULSE CURRENT

V. V. Stolyarov

Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences (4 M. Kharitonyevskiy per., Moscow, 101990, Russian Federation)

Abstract. The work is related to the study of external influences on the deformation behavior of metallic materials. On the basis of literary sources, the effects accompanying the passage of a pulsed current and related structure changes in the metals and alloys are briefly considered. A special role in the contribution of each effect belongs to the current mode (direct, pulse) and regimes (density, off-duty factor), as well to the material. The results of our own studies of the interaction of pulsed current with a large off-duty factor ($Q \geq 10^3$) and plastic deformation by quasi-static tension in materials of different physical nature are presented: pure metals (titanium and aluminum), shape memory TiNi alloys with reversible martensitic transformation

(stoichiometric and behind stoichiometric composition), ferrite-pearlitic (ST3) and stainless austenitic (0Kh18N10T) steels. A pulsed current with a density above the critical and high off-duty factor is used, which makes it possible to observe the electroplastic effect in the form of stress drops with a minimum thermal effect. In contrast to the well-known classical manifestation of the electroplastic effect in the form of a decrease in flow stresses and an increase in plasticity, a manifestation of anomalous strengthening from several tens to hundreds of MPa is demonstrated. It is assumed that the reasons of visible effects are external and internal factors - high off-duty factor, thermomechanical cycling, change in the dislocation mechanism of deformation, martensitic transformation, structure refinement, dissolution of particles of excess phases. With a decrease in the off-duty factor (increasing the frequency of the pulsed current to 10^3 Hz) and transition from single pulse to multi-pulse current, the hardening effects are replaced by the traditional decrease in flow stresses due to the thermal effect of the current.

Keywords: pulse current, off-duty ratio, tension, strengthening, titanium, aluminum, steels, shape memory alloys

For citation: Stolyarov V.V. Anomalous strengthening effect in tension accompanied by impulse current. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 11 – 17. (In Russ.).

Введение

Электропластический эффект (ЭПЭ) – известное явление, обнаруженное более полувека назад [1]. Традиционно ЭПЭ проявляется в сопровождаемых током снижении напряжений течения и увеличении пластичности при использовании разных схем деформации [2 – 8]. В настоящей работе под ЭПЭ понимаются все сопутствующие эффекты, связанные с импульсным током: тепловой, скин, пинч, магнито-пластический эффекты, вибрация и другие. Практическая значимость ЭПЭ обусловлена возможностью исключить промежуточные этапы отжига и деформации в процессах металлообработки. Научное значение ЭПЭ связано с необходимостью понимания физических механизмов пластической деформации, взаимодействующей с электрическим током.

Ранее было показано влияние вида тока [9], режимов тока [10], сопровождающего теплового эффекта [11] и самого материала [12] на механические свойства металла. В большинстве этих исследований наблюдались разупрочнение материала и увеличение пластичности до разрушения. Одной из первых работ, в которой обнаружено упрочнение материала под влиянием импульсного тока, было исследование в сплавах с памятью формы TiNi [13]. В работе [14] авторы также наблюдали упрочнение в крупнозернистом ($d = 80$ мкм) сплаве Ti – 7 % Al (атом.), которое связано с изменением механизма деформации скольжением на двойникование и соответствующим переползанием дислокаций. Упрочнение, вызванное электроимпульсной обработкой (без деформации), наблюдалось в малоуглеродистых и феррито-перлитных сталях [15, 16].

Электропластический эффект был исследован во многих чистых металлах (цинк, кадмий, свинец, олово, титан, медь) и термически стабильных сплавах на основе титана (Ti64), магния (AZ31), алюминия (AA6000 и AA7000), меди (латунь), железа (аустенитные стали). Во всех случаях деформация растяжением в присутствии тока сопровождалась

либо скачками напряжения вниз, либо снижением напряжений течения при плотности тока выше критической [2]. Это практически важное свойство тока было широко использовано в практике металлообработки, а также показана его эффективность для подавления прерывистой деформации (эффект Портевена-Ле Шателье) в алюминиевых сплавах АМгб [17]. Тем не менее оказалось, что в ряде случаев могут наблюдаться аномальные эффекты упрочнения, вызванные специальными режимами тока или природой исследуемых материалов. Особый интерес представляют термически нестабильные сплавы, в которых возможны структурно-фазовые превращения в процессе нагрева или деформации.

Целью настоящей работы является демонстрация нетипичного (аномального) деформационного поведения при растяжении в сопровождении импульсного тока высокой скважности в материалах различной природы.

Исследуемые материалы

В настоящей работе исследовали материалы: чистые металлы (титан и алюминий), сплавы с памятью формы на основе TiNi, стали. Титан разной чистоты (BT1-0 / BT1-00) применяли в виде проволоки диаметром 1 мм, с размером зерен 20 мкм. Образцы алюминия представляли собой монокристаллические пластины, полученные в условиях невесомости. Изучали закаленные крупнозернистые ($d = 20$ мкм) сплавы Ti_{49,3}Ni_{50,7} и Ti₅₀Ni₅₀ (образцы в форме листа). Низкоуглеродистую феррито-перлитную сталь Ст3 использовали в виде волоченной проволоки диаметром 1,5 мм, а нержавеющую сталь 0X18N10T – в форме полос. Все материалы, кроме стальной проволоки, находились в отожженном крупнозернистом состоянии. По скольку все образцы для механических испытаний на растяжение имели разные рабочие размеры $L_{раб}$, то для адекватного сравнения пластичности

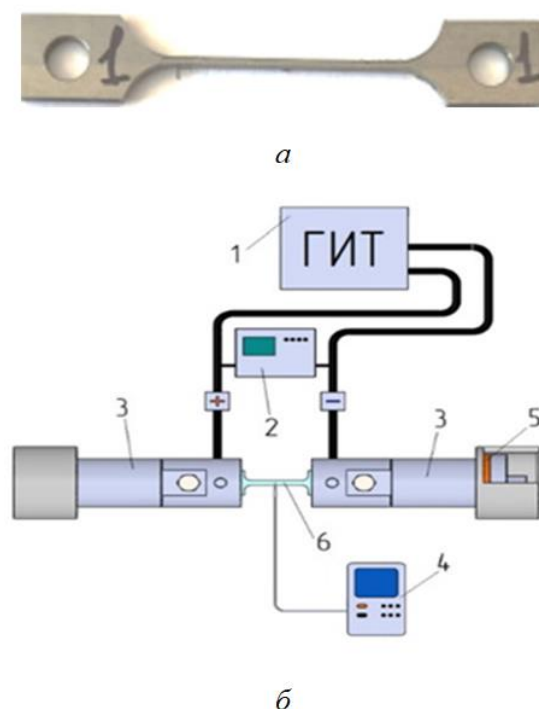


Рис. 1. Вид плоского образца (а) и схема подвода тока к зажимам (б):
 1 – генератор импульсного тока (ГИТ); 2 – осциллограф; 3 – образец; 4 – термопара; 5 – изоляция;
 6 – зажимы испытательной машины

Fig. 1. View of a flat sample (a) and scheme of current supply to the terminals (b):
 1 – pulse current generator; 2 – oscilloscope; 3 – sample; 4 – thermocouple; 5 – insulation; 6 – clamps of testing machine

значения относительного удлинения до разрушения были приведены к единой расчетной длине $L_0 = 25$ мм. Для образцов из сплавов TiNi ввиду использования микрообразцов расчетная длина L_0 составляла 10 мм. Форма образцов для испытаний листовых материалов показана на рис. 1, а.

Испытания на растяжение проводились при комнатной температуре и скорости 1 мм/мин на горизонтальной машине ИР 5081-20 с использованием одиночных импульсов тока большой скважности, которые вводили одновременно с началом растяжения. Плотность тока j (от 100 до 2600 А/мм²), длительность импульса τ (от 100 до 1000 мкс) и скважность Q (более 10^3) варьировали в соответствии с удельным электросопротивлением и теплопроводностью исследуемых материалов таким образом, чтобы нагрев образца за время растяжения был минимальным, а скачки напряжения наблюдались визуально. Температуру образца контролировали термопарой и инфракрасной камерой. Расхождение измеренных температур не превышало ± 5 °С.

На рис. 2 показаны кривые напряжение – деформация технически чистого титана ВТ1-0, ВТ1-00 (рис. 2, а, б) (одиночные импульсы тока, $j = 250$ А/мм², $Q = 10000$) и монокристаллического алюминия (рис. 2, в) без тока (кривые 1) и

при приложении тока в форме одиночных импульсов (кривые 2).

На кривых 2 наблюдаются скачки напряжения с разной для титана (до 40 МПа) и алюминия (до 5 МПа) амплитудой, соответствующие каждому импульсу тока. Видно, что введение импульсов тока во всех материалах привело к упрочнению: повышению предела прочности на 20 и 4 МПа соответственно для титана и алюминия по сравнению с образцами, испытанными без тока. Относительное удлинение образцов из ВТ1-0 и монокристаллического алюминия также повысилось на 15 и 30 % соответственно, а образцов ВТ1-00 не изменилось. Характерной особенностью кривых при наложении тока является высокое равномерное удлинение без формирования шейки. Отметим, что температуры образцов при растяжении с током и без тока практически не отличались от комнатной.

Интерпретация наблюдаемого упрочнения в чистых металлах без структурных исследований является наиболее трудной, поскольку никаких фазовых превращений не происходит. Можно предположить, что упрочнение связано с малоциклового усталостью, вызванной импульсным током. В результате термомеханического циклирования накапливаются внутренние напряжения. Заслуживает внимания объяснение, связанное с изменением механизма деформации сколь-

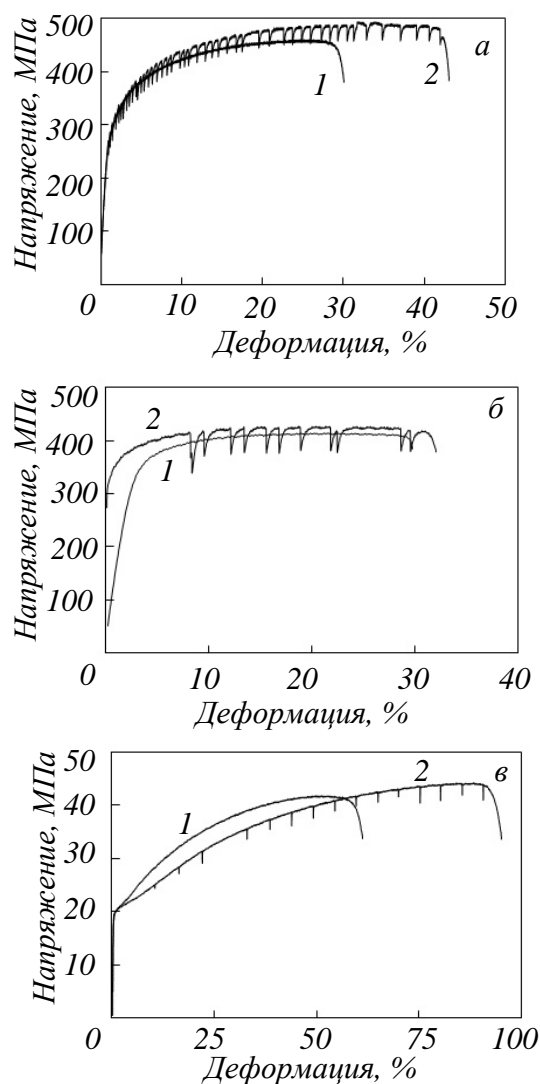


Рис. 2. Кривые напряжение – деформация при растяжении без тока (1) и при приложении тока (2) для титана VT1-0 (а), VT1-00 (б) (проволока диаметром 1 мм) и монокристаллического алюминия (в) (одиночные импульсы тока; для VT1-0, VT1-00 $j = 250 \text{ A/mm}^2$; для алюминия $j = 450 \text{ A/mm}^2$)

Fig. 2. Tensile stress-strain curves without current (1) and at application of current (2) for titanium VT1-0 (a), VT1-00 (б) (wire of 1 mm diameter) and single-crystal aluminum (в) (single current pulses; for VT1-0, VT1-00 $j = 250 \text{ A/mm}^2$; for aluminum $j = 450 \text{ A/mm}^2$)

жением на переползание дислокаций, способствующего двойникованию и упрочнению. Такой механизм был предложен для сплава Ti – 7 % Al (атом.) в работе [14]. Авторы показали наличие существенного упрочнения при растяжении в сопровождении импульсного тока большой скважности и подтвердили это структурными исследованиями.

Рассмотрим деформационное поведение сплавов системы TiNi. Наиболее ярко эффект упрочнения наблюдался в аустенитном сплаве системы $\text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$ (рис. 3, а).

Видно, что кривая 2 (с одиночными импульсами тока) в начале деформации располагается на 200 МПа выше по сравнению с кривой 1 (без тока). С увеличением деформации эффект упрочнения уменьшается и исчезает. Отметим, что температура образца в момент прохождения импульса повышалась до 50 °С. Однако в эквиатомном сплаве близ-

кого состава $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ с мартенситной структурой эффект упрочнения отсутствовал (рис. 3, б). Из-за пластинчатой структуры мартенсита скачки напряжения вниз имеют малую амплитуду. Столь разное поведение сплавов при растяжении с током связано с их фазовым составом при комнатной температуре и температурами начала обратного мартенситного превращения A_s , которые в крупнозернистых сплавах $\text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$ и $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ сильно отличаются. В аустенитном сплаве деформационный мартенсит при незначительном нагреве током превращается в аустенит и, как следствие, упрочняет сплав [14]. В мартенситном сплаве незначительный нагрев не приводит к обратному превращению и упрочнение отсутствует.

На рис. 4 показаны деформационные кривые двух типов сталей: феррито-перлитной стали Ст3 и нержавеющей стали 0Х18Н10Т.

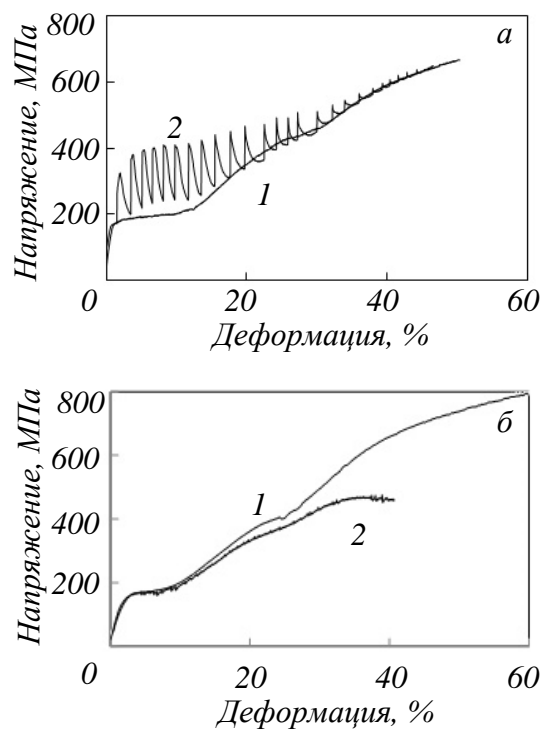


Рис. 3. Кривые напряжение – деформация при растяжении без тока (1) и при наложении тока (2):
 а – $\text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$, $j = 500 \text{ A/mm}^2$, $\tau = 100 \text{ мкс}$ ($Q = 140000$); б – $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$, $j = 500 \div 1500 \text{ A/mm}^2$, $\tau = 1000 \text{ мкс}$

Fig. 3. Tensile stress-strain curves without current (1) and with current (2):
 а – $\text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$, $j = 500 \text{ A/mm}^2$, $\tau = 100 \text{ }\mu\text{s}$; б – $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$, $j = 500 \div 1500 \text{ A/mm}^2$, $\tau = 1000 \text{ }\mu\text{s}$

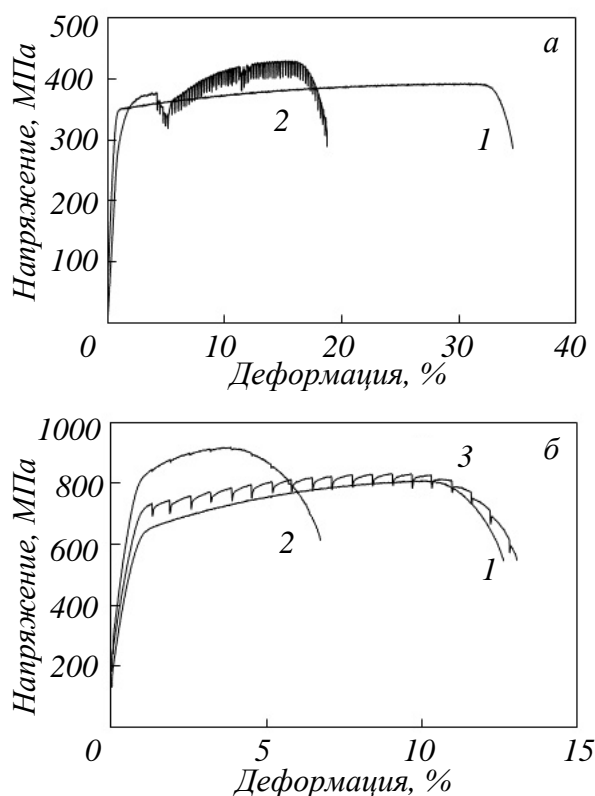


Рис. 4. Кривые напряжение – деформация при растяжении сталей Ст3 (а) и Х18Н10Т (б):
 1 – без тока; 2, 3 – с током (на поз. а кривая 2: $j = 115 \text{ A/mm}^2$, $\tau = 1000 \text{ мкс}$, температура $\leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; на поз. б кривая 2: $j = 820 \text{ A/mm}^2$, $\tau = 250 \text{ мкс}$; кривая 3: $j = 2600 \text{ A/mm}^2$, $\tau = 1000 \text{ мкс}$, $54 \text{ }^\circ\text{C}$; на вкладке (поз. а) – участок растяжения в увеличенном масштабе)

Fig. 4. Tensile stress-strain curves for steels St3 (a) and Cr18Ni10T (b):
 1 – without current; 2, 3 – with current (on item a curve 2: $j = 115 \text{ A/mm}^2$, $\tau = 1000 \text{ }\mu\text{s}$, temperature $\leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; on item б curve 2: $j = 820 \text{ A/mm}^2$, $\tau = 250 \text{ }\mu\text{s}$; curve 3: $j = 2600 \text{ A/mm}^2$, $\tau = 1000 \text{ }\mu\text{s}$, $54 \text{ }^\circ\text{C}$; on tab (item a) – tensile section in enlarged scale)

Здесь, как и в приведенных выше материалах, введение импульсного тока привело в процессе растяжения как к разной интенсивности упрочнения, так и к существенному снижению пластичности. В отличие от предыдущих примеров в волооченной неотожженной проволоке из стали Ст3 при растяжении импульсный ток вводили на стадии пластической деформации (рис. 4, а). В момент введения ток сначала вызвал резкое снижение напряжений течения на коротком участке деформации, а затем продолжительную стадию упрочнения до 30 – 40 МПа (рис. 4, а). Похожий эффект упрочнения при электропульсировании (без деформации) наблюдался в малоуглеродистой стали [15] и феррито-перлитной стали [16]. Авторы объяснили упрочнение в феррито-перлитной стали структурным измельчением под влиянием тока и предложили соответствующие механизмы: повышенная скорость зарождения в малоуглеродистой стали и сфероидизация цементита в перлитной составляющей. В стали Ст3 не исключается конкуренция действующих механизмов: динамическая рекристаллизация (начальное разупрочнение из-за повышенной плотности дислокаций в феррите) и малоцикловая усталость.

Более сильное (100 – 150 МПа) упрочнение наблюдалось в аустенитной нержавеющей стали (рис. 4, б, кривая 2), когда применили высокую скважность (низкая частота) и низкую плотность тока, при которой амплитуда скачков была слабо видима. Меньший (60 – 70 МПа) эффект упрочнения наблюдался при большей плотности тока и меньшей скважности (рис. 4, б, кривая 3). Упрочнение в этом случае при электро-пульсировании может быть связано с растворением в аустените частиц вторых фаз, обогащенных хромом или никелем [18]. Неясной остается роль энергии дефектов упаковки в дуплексных феррито-аустенитных сталях [19]. В настоящих исследованиях аустенитно-мартенситной ТРИП стали, дуплексной феррито-мартенситной стали и стали 45 подобный эффект не наблюдался. В упрочняемых термической обработкой алюминиевом (АМгб) и медном (БрАЖ9-4) сплавах эффекты упрочнения наблюдались при большой скважности импульсного тока.

Выводы

Все приведенные примеры в совершенно различных по природе сплавах свидетельствуют о возможности фиксации не только эффектов разупрочнения, но заметных эффектов упрочнения под действием импульсного тока. Условием упрочнения является высокая скважность тока, которая позволяет снизить влияние теплового эффекта и выявить структурные причины, к которым можно отнести динамическое деформационное старение; мартенситные превращения, вызванные температурой или деформацией; замену дислокационного механизма скольжения на переползание; динамическую рекристаллизацию;

двойникование; измельчение структуры; дефекты упаковки. Эти структурные изменения требуют экспериментального подтверждения путем тщательного наблюдения тонкой структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Troitskii O.A. Electromechanical effect in metals // JETP Letters. 1969. No. 1. P. 18–22.
2. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, В.Я. Целлермаер. М.: Недра, 1996. 280 с.
3. Conrad H. Effects of electric current on solid-state phase transformation in metals // Mater. Sci. Eng. A. 2000. Vol. 287. No. 227. P. 276–287.
4. Perkins T.A., Kronenberger T.J., Roth J.T. Metallic Forging Using Electrical Flow as an Alternative to Warm/Hot Working // J. of Manufact. Sci. Eng. 2007. Vol. 129. P. 84–94.
5. Salandro W.A., Bunget C., Mears L. Modeling and quantification of the electroplastic effect when bending stainless steel sheet metal. In: ASME 2010 Conference. 2010. Article 34043.
6. Chun X.U., Ya-Nan L.I., Rao X.H. Effect of electropulsing rolling on mechanical properties and microstructure of AZ31 magnesium alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2014. Vol. 24. P. 3777–3784.
7. Zhou Y., Chen G.Q., Fu X.S., Zhou W.L. Effect of electropulsing on deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy during cold drawing // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2014. Vol. 24. P. 1012–1021.
8. Коновалов С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов. Новокузнецк, 2013. 293 с.
9. Lee T., Magargee J., Ng M.K., Cao J. Constitutive analysis of electrically assisted tensile deformation of CP-Ti based on non-uniform thermal expansion, plastic softening and dynamic strain aging // Inter. Journal of Plasticity. 2017. Vol. 94. P. 44–56.
10. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. Additional results on the electroplastic effect in metals // Scr. Metall. 1979. Vol. 13. P. 277–280.
11. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. An Evaluation of the Contributions of Skin, Pinch and Heating Effects to the Electroplastic Effect in Titanium // Mater. Sci. Eng. 1980. Vol. 45. P. 109–116.
12. Rudolf C., Goswami R., Kang W., Thomas J. Effects of electric current on the plastic deformation behavior of pure copper, iron, and titanium // Act. Mater. 2021. Vol. 209. Article 116776.
13. Stolyarov V. Deformation behavior at rolling and tension under current in TiNi alloy. In: ESOMAT 2009. Article 06033.
14. Zhao S., Zhang R., Chong Y., et al. Defect reconfiguration in a Ti–Al alloy via Electroplas

- ticity // *Nat. Mater.* 2021. Vol. 20. P. 468–472.
15. Zhou Y., Zhang W., Wang B., He G., Guo J. Grain refinement and formation of ultrafine-grained microstructure in a low-carbon steel under electropulsing // *J. Mater. Res.* 2002. Vol. 17. P. 2105–2111.
 16. Rahnama A., Qin R.S. Electropulse-induced microstructural evolution in a ferritic-pearlitic 0.14 % C steel // *Scr. Mater.* 2015. Vol. 96. P. 17–20.
 17. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Денисов А.А., Гасанов М.Ф. Исследование механизмов подавления прерывистой деформации электрическим током // *Кристаллография.* 2015. /Т. 60. № 6. С. 938–949.
 18. Qin R.S., Rahnama A., Lu W.J., Zhang X.F., Elliott-Bowman B. Electropulsed steels // *Materials Science and Technology.* 2014. Vol. 30. P. 1040–1044.
 19. Gennari C., Pezzato L., Simonetto E., Gobbo R., Forzan M., Calliari I. Investigation of Electroplastic Effect on Four Grades of Duplex Stainless Steels // *Materials.* 2019. Vol. 12. Article 1911.
 10. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. Additional results on the electroplastic effect in metals. *Scr. Metall.* 1979, vol. 13, pp. 277–280.
 11. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. An Evaluation of the Contributions of Skin, Pinch and Heating Effects to the Electroplastic Effect in Titanium. *Mater. Sci. Eng.* 1980, vol. 45, pp. 109–116.
 12. Rudolf C., Goswami R., Kang W., Thomas J. Effects of electric current on the plastic deformation behavior of pure copper, iron, and titanium. *Act. Mater.* 2021, vol. 209, article 116776.
 13. Stolyarov V. Deformation behavior at rolling and tension under current in TiNi alloy. In: *ESOMAT 2009*, article 06033.
 14. Zhao S., Zhang R., Chong Y., et al. Defect reconfiguration in a Ti–Al alloy via Electroplasticity. *Nat. Mater.* 2021, vol. 20, pp. 468–472.
 15. Zhou Y., Zhang W., Wang B., He G., Guo J. Grain refinement and formation of ultrafine-grained microstructure in a low-carbon steel under electropulsing. *J. Mater. Res.* 2002, vol. 17, pp. 2105–2111.
 16. Rahnama A., Qin R.S. Electropulse-induced microstructural evolution in a ferritic-pearlitic 0,14 % C steel. *Scr. Mater.* 2015, vol. 96, pp. 17–20.
 17. Shibkov A.A., Zolotov A.E., Zheltov M.A., Denisov A.A., Gasanov M.F. Investigation of the mechanisms of suppression of intermittent deformation by electric current. *Kristallografiya.* 2015, vol. 60, no. 6, pp. 938–949. (In Russ.).
 18. Qin R.S., Rahnama A., Lu W.J., Zhang X.F., Elliott-Bowman B. Electropulsed steels. *Materials Science and Technology.* 2014, vol. 30, pp. 1040–1044.
 19. Gennari C., Pezzato L., Simonetto E., Gobbo R., Forzan M., Calliari I. Investigation of Electroplastic Effect on Four Grades of Duplex Stainless Steels. *Materials.* 2019, vol. 12, article 1911.
- ### REFERENCES
1. Troitskii O.A. Electromechanical effect in metals. *JETP Letters.* 1969, no. 1, pp. 18–22.
 2. Gromov V.E., Zuev L.B., Kozlov E.V., Tsellermaer V.Ya. *Electrostimulated plasticity of metals and alloys.* Moscow: Nedra, 1996, 280 p. (In Russ.).
 3. Conrad H. Effects of electric current on solid-state phase transformation in metals. *Mater. Sci. Eng. A.* 2000, vol. 287, no. 227, pp. 276–287.
 4. Perkins T.A., Kronenberger T.J., Roth J.T. Metallic Forging Using Electrical Flow as an Alternative to Warm/Hot Working. *J. of Manufact. Sci. Eng.* 2007, vol. 129, pp. 84–94.
 5. Salandro W.A., Bunget C., Mears L. Modeling and quantification of the electroplastic effect when bending stainless steel sheet metal. In: *ASME 2010 Conference.* 2010, article 34043.
 6. Chun X.U., Ya-Nan L.I., Rao X.H. Effect of electropulsing rolling on mechanical properties and microstructure of AZ31 magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 2014, vol. 24, pp. 3777–3784.
 7. Zhou Y., Chen G.Q., Fu X.S., Zhou W.L. Effect of electropulsing on deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy during cold drawing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 2014, vol. 24, pp. 1012–1021.
 8. Konovalov S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. *Influence of electromagnetic fields and currents on plastic deformation of metals and alloys.* Novokuznetsk, 2013, 293 p. (In Russ.).
 9. Lee T., Magargee J., Ng M.K., Cao J. Constitutive analysis of electrically assisted tensile deformation of CP-Ti based on non-uniform thermal expansion, plastic softening and dynamic strain aging. *Inter. Journal of Plasticity.* 2017, vol. 94, pp. 44–56.
- ### Сведения об авторах
- Владимир Владимирович Столяров**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт машиноведения РАН
E-mail: vlstol@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7604-3961
- ### Information about the authors
- Vladimir V. Stolyarov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences
E-mail: vlstol@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7604-3961
- Поступила в редакцию 26.07.2022
 После доработки 07.09.2022
 Принята к публикации 12.09.2022
- Received 26.07.2022
 Revised 07.09.2022
 Accepted 12.09.2022

Оригинальная статья

УДК 004.942

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ, ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ И СЛОЖНОЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЫ

И. А. Рыбенко, П. А. Сеченов

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Представлена программная реализация инструментальной системы расчета термодинамических функций индивидуальных веществ, химических реакций и равновесного состояния сложной многокомпонентной гетерогенной системы. Приведен обзор существующих баз данных и программных продуктов. Рассмотрен алгоритм расчета основных термодинамических функций вещества (удельной теплоемкости, энтальпии, энтропии и приведенной энергии Гиббса для фиксированной температуры и изменения в интервале температур). Создана база данных для 2500 индивидуальных веществ. Разработан блок расчета для определения основных термодинамических параметров. Программно реализован алгоритм расчета изменения термодинамических функций химических реакций на основе закона Гессе. Рассмотрен метод расчета равновесного состояния сложной многокомпонентной гетерогенной системы на основе принципа максимума энтропии, который реализован в третьем модуле инструментальной системы.

Ключевые слова: термодинамические функции, индивидуальное вещество, химическая реакция, сложная многокомпонентная гетерогенная система, термодинамическое равновесие, база данных, алгоритм расчета, инструментальная система

Для цитирования: Рыбенко И.А., Сеченов П.А. Инструментальная система расчета термодинамических функций индивидуальных веществ, химических реакций и сложной многокомпонентной гетерогенной системы // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 18 – 27.

Original article

INSTRUMENTAL CALCULATION SYSTEM THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF INDIVIDUAL SUBSTANCES, CHEMICAL REACTIONS AND COMPLEX MULTICOMPONENT HETEROGENEOUS SYSTEM

I. A. Rybenko, P. A. Sechenov

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. A software implementation of an instrumental system for calculating the thermodynamic functions of individual substances, chemical reactions and the equal state of a complex multicomponent heterogeneous system is presented. An overview of existing databases and software products is provided. An algorithm for calculating the basic thermodynamic functions of a substance (specific heat capacity, enthalpy, entropy and reduced Gibbs energy for both a fixed temperature and a change in the temperature range) is considered. A database has been created for 2500 individual properties. A calculation block has been developed to determine the basic thermodynamic parameters. An algorithm for calculating changes in the

thermodynamic functions of chemical reactions based on Hesse's law is implemented programmatically. The method of calculating the equilibrium state of a complex multicomponent heterogeneous system based on the principle of maximum entropy, which is implemented in the third module of the instrumental system, is considered.

Keywords: thermodynamic functions, individual substance, chemical reaction, complex multicomponent heterogeneous system, thermodynamic equality, database, calculation algorithm, instrumental system

For citation: Rybenko I.A., Sechenov P.A. Instrumental system for calculating thermodynamic functions of individual substances, chemical reactions and a complex multi-component heterogeneous system. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 18 – 27. (In Russ.).

Введение

Термодинамическое моделирование технологических процессов возможно только при использовании современных инструментальных систем. В настоящее время создано уже несколько сотен алгоритмов и программ, предназначенных для расчета равновесного состава химически реагирующих систем. Причины создания такого количества инструментальных программ связаны с существованием множества различных термодинамических систем, имеющих свои конкретные особенности, и соответствующих им большим числом термодинамических моделей. Для определения параметров моделей необходимо располагать достоверными экспериментальными и теоретическими данными.

Передовые научно-исследовательские центры по изучению термодинамических свойств веществ занимаются экспериментальным определением свойств веществ, а также закономерностей, дающих возможность прогнозировать свойства неизученных объектов. К таким центрам относятся термоцентр имени В.П. Глушко РАН (Россия) [1 – 5], национальное управление по авиации и исследованию космического пространства NASA (США), национальный институт стандартов и технологий NIST (США) [6], центр исследований в области вычислительной термодинамики CRCT (Франция, Канада, Германия), японское общество калориметрии и термического анализа Kagaku Gijutsu-Sha (Япония) и многие другие центры.

Существенной и неотъемлемой частью любого программного комплекса, предназначенного для термодинамического моделирования, является база данных по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ

Выделим два наиболее полных справочника (базы данных) по термодинамическим свойствам веществ [1, 2]. В России одним из ведущих является термоцентр им. В.П. Глушко. По термодинамическим свойствам веществ издано восемь томов [3], а также два тома доступны на сайте [4]. Существует электронная версия в виде отсканированных страниц, а также и электрон-

ные базы данных [5], взятые из справочников [3, 4]. К иностранным разработкам следует отнести справочник по термодинамическим и теплофизическим свойствам веществ, количество которых составляет более 6000, разработанный национальным институтом стандартов и технологий США (NIST) [6].

Существуют программы (базы данных термодинамических параметров индивидуальных веществ), которые не обновляются, например NASA CEA [7], написанная на языке Fortran, с последним обновлением от 2003 г., IVTANTHERMO – термоцентр имени В.П. Глушко (последнее обновление происходило в 2003 г.). Также существуют платные актуальные программы с демонстрационной версией (FactSage [8, 9], Thermo-Calc [10, 11] и HSC Chemistry [12]).

Несмотря на многообразие программ расчета термодинамического равновесия, большинство из них имеют узкую область применения [13] и могут быть использованы только для конкретного типа задач в определенной области знаний (термодинамическая база данных для сталей с высоким содержанием марганца) [14]. К универсальным программам следует отнести лишь программные комплексы IVTANTHERMO, REAL и TERPA.

Была поставлена задача разработки базы данных и программы расчета термодинамических свойств индивидуальных веществ, химических реакций и сложных многокомпонентных гетерогенных систем с использованием справочников [3, 4]. В качестве среды разработки выбрана Visual Studio 2022, объектно-ориентированный язык программирования C#.

Термодинамические свойства индивидуальных веществ

В первом модуле инструментальной системы осуществляется расчет термодинамических функций индивидуальных веществ. Исходными данными для расчетов являются коэффициенты аппроксимационного уравнения для приведенной энергии Гиббса и температуры фазовых переходов. Для каждого вещества на основе коэффициентов приведенной энергии Гиббса и эн-

тальпии образования рассчитываются остальные термодинамические функции индивидуальных веществ.

Стандартная приведенная энергия Гиббса вычисляется по следующей формуле:

$$F(T) = \frac{-(G(T) - H(0))}{T} = f_0 + f \ln X + \frac{f_{-2}}{X^2} + \frac{f_{-1}}{X} + f_1 X + f_2 X^2 + f_3 X^3, \quad (1)$$

где $G(T)$ – энергия Гиббса, Дж/(моль·К); $H(0)$ – энтальпия при температуре 0 К, Дж/(моль·К); $X = T/10000$ – приведенная температура, К; T – температура, К.

На основе уравнения (1) определяются следующие термодинамические функции (удельная теплоемкость, энтропия и изменение энтальпии):

$$C_p(T) = c_0 + \frac{c_{-2}}{X^2} + c_1 X + c_2 X^2 + c_3 X^3, \quad (2)$$

$$S(T) = s_0 + s \ln X + \frac{s_{-2}}{X^2} + s_1 X + s_2 X^2 + s_3 X^3, \quad (3)$$

$$\frac{H(T) - H(0)}{T} = h_0 + \frac{h_{-2}}{X^2} + \frac{h_{-1}}{X} + h_1 X + h_2 X^2 + h_3 X^3. \quad (4)$$

Коэффициенты уравнений (2) – (4) рассчитываются на основе уравнения для приведенной энергии Гиббса:

$$\begin{array}{lll} c_0 = f; & s_0 = f_0 + f; & h_0 = f; \\ c_{-2} = 2f_{-2}; & s_{-2} = -f_{-2}; & h_{-2} = -2f_{-2}; \\ c_1 = 2f_1; & s_1 = 2f_1; & h_{-1} = -f_{-1}; \\ c_2 = 6f_2; & s_2 = 3f_2; & h_1 = f_1; \\ c_3 = 12f_3. & s_3 = 4f_3. & h_2 = 2f_2; \\ & & h_3 = 3f_3. \end{array}$$

На основании приведенных выше теплофизических функций определяется энтальпия, изобарно-изотермический потенциал, полные внутренняя энергия и энтальпия при произвольной температуре:

$$H(T) = H(0) + \frac{h_{-2}}{X^2} + \frac{h_{-1}}{X} + h_1 X + h_2 X^2 + h_3 X^3 T; \quad (5)$$

$$G(T) = H(0) - F(T)T; \quad (6)$$

$$U = H(T) - H(0) - nRT; \quad (7)$$

$$I(T) = \Delta_f H^\circ(298) + H(T) - H(0), \quad (8)$$

где n – количество вещества, моль; R – универсальная газовая постоянная; $\Delta_f H^\circ(298)$ – энтальпия образования вещества при температуре 298 К, Дж/моль.

Расчет вышеперечисленных функций реализован в программном модуле «Термодинамические свойства индивидуальных веществ». База данных программы содержит информацию по термодинамическим параметрам более 2500 веществ. По формуле вещества, вводимого в поле «Имя индивидуального вещества», отображается следующая информация: энтальпия образования вещества и молярная масса, а для выбранного значения температуры рассчитываются удельная теплоемкость, приведенная энергия Гиббса, энтропия и изменение энтальпии. На рис. 1 представлена диаграмма классов взаимодействия. Интерфейс программы приведен на рис. 2.

В программе выделены следующие классы: «Основная форма», «Расчет», «Таблица», «Свойства». В классе «Расчет» реализован алгоритм расчета термодинамических функций вещества (приведенной энергии Гиббса, удельной теплоемкости, энтропии, энтальпии, полной энергии, внутренней энергии, изменения энтальпии, энергии Гиббса и др.). Класс «Основная форма» взаимодействует с формой «Отображения значений коэффициентов приведенной энергии Гиббса», а также с формой «Таблица», в которой отображаются основные термодинамические функции. Также в программе реализован модуль отображения информации в виде графика (рис. 3) и таблицы (рис. 4).

Термодинамические функции химических реакций

В следующем блоке программно-инструментальной системы осуществляется расчет термодинамических функций химических реакций. Расчет основан на законе Гесса. Все параметры определяются как разность между термодинамическими функциями продуктов реакций и исходных веществ с учетом стехиометрических коэффициентов.

Изменение удельной теплоемкости химической реакции рассчитывается по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \Delta C_{P1} &= \sum_i C_{P_i,1}^{\text{прод}} - \sum_j C_{P_j,1}^{\text{исх}} \nu_j; \\ &\dots \\ \Delta C_{Pk} &= \sum_i C_{P_i,k}^{\text{прод}} - \sum_j C_{P_j,k}^{\text{исх}} \nu_j. \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Delta C_{P1}, \dots, \Delta C_{Pk}$ – изменение теплоемкости химической реакции при постоянном давлении в

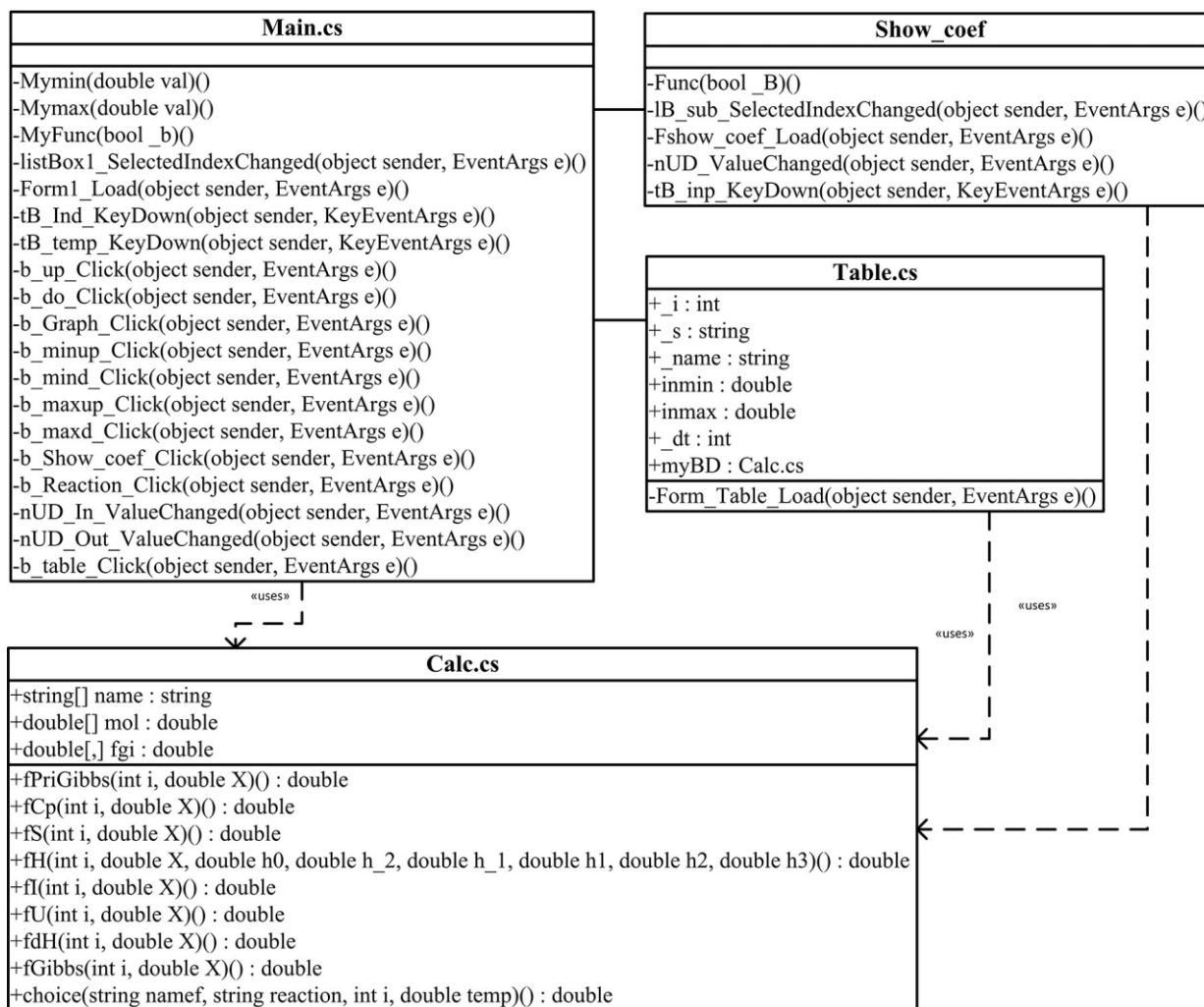


Рис. 1. UML диаграмма взаимодействия классов
 Fig. 1. UML diagram of class interaction

интервале температур, кДж/(моль·К); k – номер фазового перехода с учетом фазовых переходов всех веществ, участвующих в реакции; $C_{p1}^{prod}, C_{p2}^{prod}, C_{pk}^{prod}$ и $C_{p1}^{isx}, C_{p2}^{isx}, C_{pk}^{isx}$ – теплоемкости продуктов реакций и исходных веществ со-

ответственно до 1-го, 2-го и после k -го фазовых переходов в интервале температур от 298 К до T для всех реагирующих веществ, кДж/(моль·К); ν_i, ν_j – стехиометрические коэффициенты.

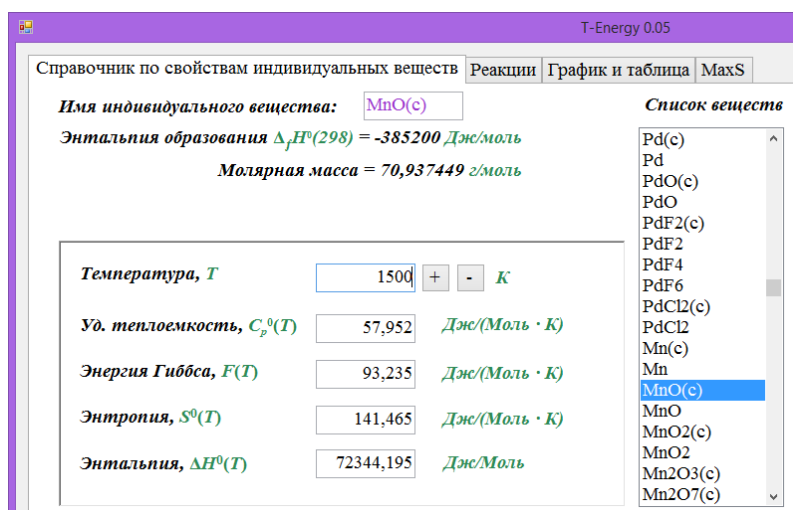


Рис. 2. Интерфейс справочника по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ
 Fig. 2. Interface of the handbook on thermodynamic properties of individual substances

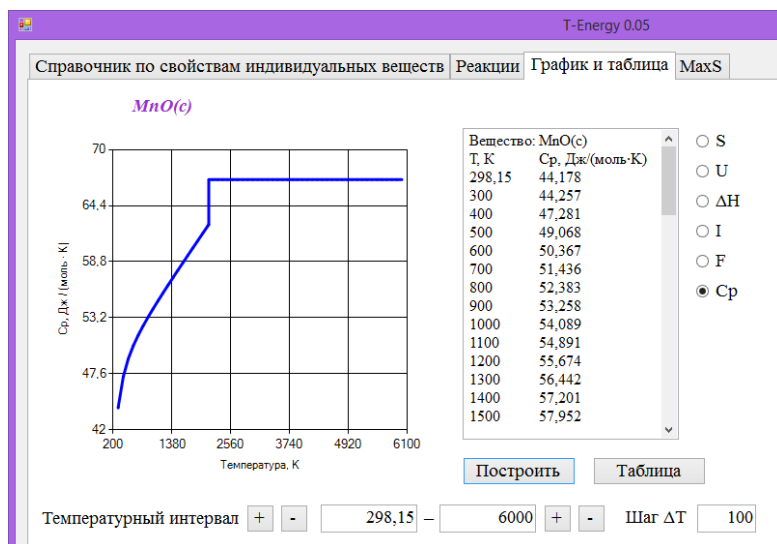


Рис. 3. Графическое отображение термодинамических функций вещества в интервале температур
 Fig. 3. Graphical representation of thermodynamic functions of a substance in the temperature range

Изменение энтальпии ΔH_T° , кДж/моль, химической реакции при температуре T рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta H_T^\circ = \sum_i \Delta_f H_{298_i}^{\text{прод}} \nu_i - \sum_j \Delta_f H_{298_j}^{\text{исх}} \nu_j + \int_{298}^{T_{\text{ф.п1}}} \Delta C_{p1} dT + \Delta H_{\text{ф.п1}} + \int_{T_{\text{ф.п1}}}^{T_{\text{ф.п2}}} \Delta C_{p2} dT + \Delta H_{\text{ф.п2}} + \dots + \int_{T_{\text{ф.пк}}}^T \Delta C_{pk} dT, \quad (10)$$

где $T_{\text{ф.п1}}$, $T_{\text{ф.п2}}$, $T_{\text{ф.пк}}$ – температуры фазовых переходов, К; $\Delta H_{\text{ф.п1}}$, $\Delta H_{\text{ф.п2}}$, $\Delta H_{\text{ф.пк}}$ – изменение энтальпий в результате фазовых переходов, кДж/моль; $\Delta_f H_{298}^{\text{прод}}$ и $\Delta_f H_{298}^{\text{исх}}$ – энтальпии образования продуктов и исходных веществ реакции при стандартной температуре, кДж/моль.

Интерфейс модуля для работы с химическими реакциями приведен на рис. 5. Перед расчетом термодинамических параметров обязательно проходит проверка на соответствие количества

моль входных веществ и продуктов реакций [13]. Также для удобства пользователя реализована возможность сохранения в текстовый файл химических реакций. Это позволит в дальнейшем быстро найти и загрузить химическую формулу по ее части, например, по одному из веществ.

Алгоритм для расчета термодинамических функций химических реакций следующий:

- 1 – создание двух одномерных массивов для исходных веществ и продуктов реакции;
- 2 – проверка наличия введенных веществ в базе данных;
- 3 – при успешном выполнении второго пункта, создание двумерных массивов исходных веществ и продуктов реакции для запоминания значений выбранной термодинамической функции и количества молей веществ;
- 4 – определение суммы термодинамических функций для исходных веществ и продуктов реакции с учетом количества молей веществ;

Таблица							
Т К	Cp (Т)		Вещество: MnO (с)		G° (Т) Дж/(К·Моль)	H° (Т)	H° (Т) Дж/Моль
	Дж/(К·Моль)	Ф° (Т) Дж/(К·Моль)	S° (Т) Дж/(К·Моль)	H° (Т) - H° (0) Дж/Моль			
298,15	44,178	28,951	58,851	8914,000	-393831,725	-376286,000	
300,00	44,257	29,136	59,124	8996,475	-393940,853	-376203,525	
400,00	47,281	38,343	72,318	13589,840	-400537,366	-371610,160	
500,00	49,068	46,247	83,074	18413,195	-408323,623	-366786,805	
600,00	50,367	53,160	92,139	23387,540	-417096,069	-361812,460	
700,00	51,436	59,301	99,986	28479,018	-426711,029	-356720,982	
800,00	52,383	64,829	106,917	33670,700	-437062,821	-351529,300	
900,00	53,258	69,856	113,138	38953,182	-448070,799	-346246,818	
1000,00	54,089	74,472	118,792	44320,820	-459671,540	-340879,180	
1100,00	54,891	78,740	123,985	49770,024	-471813,915	-335429,976	
1200,00	55,674	82,713	128,795	55298,400	-484455,865	-329901,600	
1300,00	56,442	86,432	133,282	60904,290	-497562,202	-324295,710	
1400,00	57,201	89,931	137,493	66586,511	-511103,057	-318613,489	
1500,00	57,952	93,235	141,465	72344,195	-525052,769	-312855,805	
1600,00	58,697	96,368	145,229	78176,690	-539389,053	-307023,310	
1700,00	59,438	99,348	148,809	84083,499	-554092,385	-301116,501	
1800,00	60,176	102,192	152,228	90064,233	-569145,510	-295135,767	
1900,00	60,911	104,912	155,501	96118,589	-584533,080	-289081,411	
2000,00	61,644	107,521	158,644	102246,320	-600241,345	-282953,680	

Рис. 4. Полная таблица основных термодинамических функций индивидуального вещества
 Fig. 4. Complete table of basic thermodynamic functions of an individual substance

Рис. 5. Интерфейс модуля ввода химической реакции
 Fig. 5. Interface of the chemical reaction input module

5 – определение по закону Гесса заданной термодинамической функции химической реакции как разности между суммой термодинамических функций исходных веществ и продуктов.

Введенная исходная информация проверяется на корректность. Если реакция прошла проверку на правильность, то ее можно сохранить в файле реакций. В программе имеется возможность расчета таких термодинамических функций химических реакций, как энтропия, внутренняя энергия, энтальпия, полная энергия, энергия Гиббса и удельная теплоемкость. На этапе расчета выбранной термодинамической функции сначала происходит проверка наличия отдельных веществ в базе данных, если вещество отсутствует или написано некорректно (например, на русском языке), то программа сообщит об ошибке. Расчет значений выбранной термодинамической функции химической реакции осуществляется как для одной температуры, так и в интервале температур с заданным шагом. Пример расчета представлен на рис. 6.

Равновесное состояние сложной многокомпонентной гетерогенной системы

Для расчета равновесного состояния сложной многокомпонентной гетерогенной системы используется метод термодинамического моделирования, основанный на поиске экстремума термодинамического потенциала (максимума энтропии). Этот метод предоставляет уникальную возможность обобщенного описания любого высокотемпературного состояния с помощью одних только фундаментальных законов термодинамики, независимо от условий и способов достижения равновесия, и требует минималь-

ной информации о самой системе и об ее окружении.

Термодинамическая система рассматривается как совокупность отдельных подсистем (фаз и индивидуальных конденсированных веществ). В результате для сложной системы (рабочего тела) формулируется задача нахождения для заданных термодинамических условий равновесного состава компонентов, при которых термодинамический критерий (энтропия системы), представленная функцией параметров состояния, принимает экстремальное значение. Такая формулировка приводит к сложной оптимизационной задаче, для решения которой разработаны соответствующие методы и программные средства. Метод максимума энтропии позволяет оценить состав системы в условиях равновесия независимо от способов достижения равновесия и выяснить принципиальную возможность получения тех или иных веществ, выделение которых является основным при решении задачи оценки предельного конечного состояния. Метод заключается в определении максимального значения энтропии системы как функции состава и температуры при условии соблюдения закона сохранения массы ($M_j = \text{const}$) и полной внутренней энергии ($U_n = \text{const}$).

Термодинамическая система разбивается на более простые составляющие (подсистемы), и суммарная энтропия определяется как сумма энтропий всех подсистем (газовой фазы, конденсированных растворов и компонентов), находящихся в конденсированном состоянии и образующих самостоятельные фазы:

$$S = S_r + \sum_{p=1}^P S_p + \sum_{j=1}^{N_{in}} S_j, \quad (11)$$

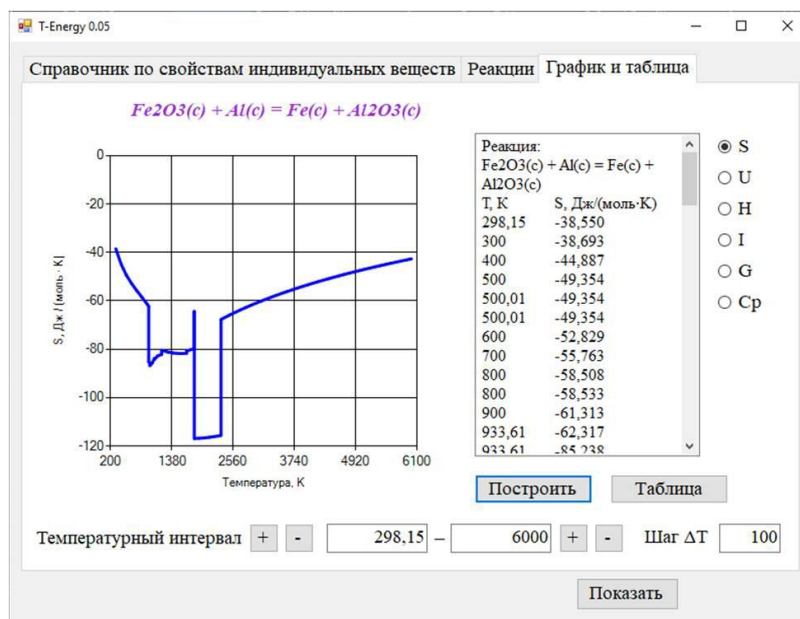


Рис. 6. Расчет изменения энтропии химической реакции в интервале температур
 Fig. 6. Calculation of the entropy change of a chemical reaction in the temperature range

где S – полная энтропия системы, Дж/К; S_r , S_p и S_j – энтропии газовой фазы, p -го конденсированного раствора и j -го конденсированного вещества, образующего самостоятельную фазу, Дж/К; $N_{\text{ТВ}}$ – количество индивидуальных конденсированных веществ; P – количество конденсированных растворов.

Энтропия газовой фазы рассчитывается следующим образом:

$$S_r = \sum_{i=1}^{N_r} \left(S_i^\circ(T) - R_0 \ln \frac{R_0 T}{V} n_i \right) n_i, \quad (12)$$

где $S_i^\circ(T)$ – энтропия i -го компонента газа, Дж/(моль·К); n_i – число молей i -го компонента газа; R_0 – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); V – объем, м³; N_r – количество компонентов газовой фазы.

Вклад конденсированных растворов в энтропию системы представлен в виде суммы вкладов отдельных составляющих. Растворы рассматриваются как идеальные:

$$S_p = \sum_{r=1}^{N_p} (S_r^\circ(T) - R_0 \ln x_r) n_r, \quad (13)$$

где N_p – число компонентов раствора; x_r – мольная доля r -го компонента раствора; n_r – число молей r -го компонента раствора; $S_r^\circ(T)$ – энтропия чистого r -го компонента раствора, Дж/(моль·К).

Для расчета энтропии индивидуальных веществ, представляющих собой самостоятельные фазы, используют соотношение:

$$S_j = S_j^\circ(T) n_j, \quad (14)$$

где n_j – число молей j -го вещества; $S_j^\circ(T)$ – энтропия j -го вещества, Дж/(моль·К).

Для термодинамической системы, содержащей P растворов, газовую фазу и $N_{\text{ТВ}}$ конденсированных веществ, энтропия представлена функцией состава и рассчитывается с учетом вкладов всех компонентов системы:

$$S = \sum_{i=1}^{N_r} \left(S_i^\circ(T) - R_0 \ln \frac{R_0 T}{V} n_i \right) n_i + \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{N_p} \left(S_r^\circ(T) - R_0 \ln x_r \right) n_r + \sum_{j=1}^{N_{\text{ТВ}}} S_j^\circ(T) n_j. \quad (15)$$

Таким образом, целевая функция представляет собой зависимость энтропии сложной системы от химического состава и температуры.

Если вещества находятся только в твердом состоянии, то система из линейных уравнений и ограничений решается симплекс-методом. В большинстве случаев в выходных продуктах есть как твердые, так и газообразные вещества. Для решения без ограничений используется метод Лагранжа, который заключается в преобразовании исходных уравнений и ограничений в систему нелинейных уравнений с помощью вз-

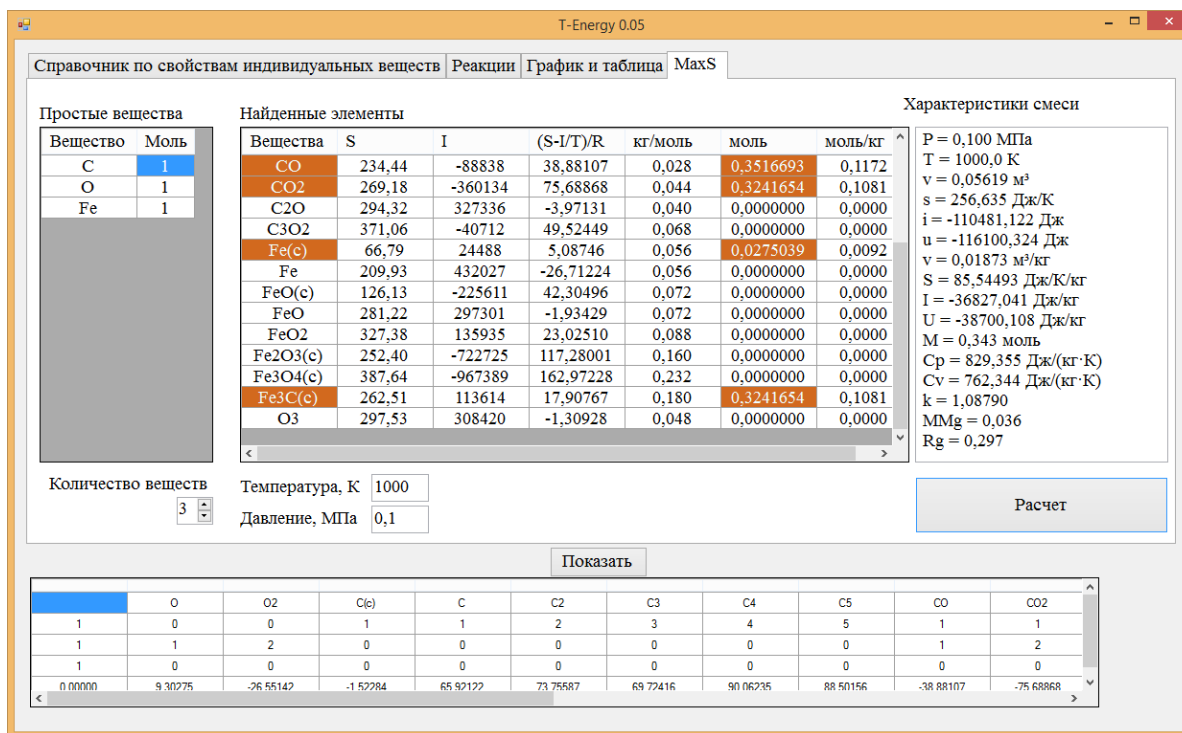


Рис. 7. Расчет равновесного состояния в системе Fe – C – O
Fig. 7. Calculation of the equilibrium state in the Fe – C – O system

тия первой производной, как по концентрациям полученных веществ, так и по ограничениям.

Решение системы нелинейных уравнений осуществляется итерационным методом Ньютона-Рафсона. На каждой итерации осуществляется построение матрицы производных функций, а также нахождение невязок по переменным. Такой переход позволяет свести систему нелинейных уравнений к линейной системе, которая на каждой итерации решается симплекс-методом.

Для составления матрицы Якоби необходимо, чтобы исходная система уравнений имела вторую производную. Для этого в уравнениях (11) – (15) делается замена $n_i = z_i^2$. Следует отметить, что для нахождения максимального значения энтропии на каждой итерации для каждой неизвестной переменной: $z_{i+1} = z_i + \Delta z_i k_i$. Коэффициента приращения $k_i \leq 0,1$. При больших значениях этого коэффициента итерационный метод приходит к решению, когда выполняются ограничения и невязка стремится к нулю, а найденные значения количества молей веществ не соответствуют максимуму энтропии. Пример расчета равновесного состояния системы Fe – C – O представлен на рис. 7.

Выводы

Разработана программа расчета термодинамических функций индивидуальных веществ, химических реакций и равновесного состояния сложной многокомпонентной гетерогенной си-

стемы. В программе реализована база данных и модуль расчета термодинамических функций для более 2500 простых веществ и соединений, который позволяет определять следующие функции: удельную теплоемкость, энергию Гиббса, энтропию, энтальпию, внутреннюю и полную энергию, как при заданной температуре, так и на интервале температур с учетом заданного шага по температуре.

С использованием этого модуля реализован блок расчета термодинамических функций химических реакций (удельной теплоемкости, энтальпии, энтропии, энергии Гиббса, внутренней энергии и полной энергии с использованием базы данных). Реализована проверка баланса количества молей исходных веществ и продуктов реакции.

В программе реализован расчет равновесного состояния сложной многокомпонентной гетерогенной системы на основе принципа максимума энтропии.

Предусмотрена возможность многовариантных расчетов в диапазоне концентраций исходных веществ и термодинамических параметров, определяющих равновесие. В программе имеются удобный интерфейс, а также возможность осуществления многовариантных расчетов и вывод результатов в виде таблицы Excel.

Базу данных и программный продукт можно использовать для термодинамических расчетов в металлургии, нефтепереработке, химической промышленности, переработке отходов и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барахнин В.Б., Молородов Ю.И., Станкус С.В., Федотов А.М. Информационные технологии для задач теплофизических свойств веществ // Информатика и системы управления. 2013. № 4 (38). С. 149–157.
2. Белов Г.В., Еркимбаев А.О., Зицерман В.Ю., Кобзев Г.А., Морозов И.В. Опыт создания теплофизических баз данных с использованием современных информационных технологий (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58. № 4. С. 615–633.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Т. I. Кн. 1. / В.П. Глушко, Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. М.: Наука, 1978.
4. База данных Ивтантермо [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.chem.msu.su/rus/handbook/ivtan/welcome.html> (дата обращения 14.06.2022).
5. Электронный справочник «Термодинамические свойства индивидуальных веществ» [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/2/OIVT/IVTANThermo/Rus/> (дата обращения 14.06.2022).
6. NIST Chemistry WebBook [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://webbook.nist.gov>. (дата обращения 14.06.2022).
7. Chemical Equilibrium with Applications [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www1.grc.nasa.gov/research-and-engineering/ceaweb/> (дата обращения 13.11.2021).
8. FactSage Courses [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.factsage.com/>. (дата обращения 14.06.2022).
9. Bale G.W., Bélislea E., Chartranda P. etc FactSage thermochemical software and databases // Calphad. 2016. Vol. 55. Part 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.05.002>
10. Thermo-Calc Software [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://thermocalc.com/products/databases/> (дата обращения 14.06.2022).
11. Shi P., Engström A., Höglund L. etc. Thermo-Calc and DICTRA enhancematerials design and processing. In: Materials Science Forum. 2005. P. 475–479.
12. HSC Chemistry [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.hsc-chemistry.com/> (дата обращения 14.06.2022).
13. Desterov S.A. Thermodynamic database for multicomponent oxide systems // Chimica Techno Acta. 2018. Vol. 5. No. 1. P. 16–48.
14. Hallstedt B., Khvan A., Lindahl B., Selleby M., Shuhong Liu. PrecHiMn-4-A thermodynamic database for high-Mn steels // Calphad-computer coupling of phase diagrams and thermochemistry. 2017. Vol. 56. P. 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.11.006>
15. Сеченов П.А., Рыбенко И.А. Программа расчета термодинамических свойств химических реакций // Южно-Сибирский научный вестник. 2022. № 1 (41). С. 60–64.
16. Kondepudi D., Prigogine I. Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures. Second edition. 2015. 523 p.

REFERENCES

1. Barakhnin V.B., Molorodov Yu.I., Stankus S.V., Fedotov A.M. Information technologies for problems of thermophysical properties of substances. *Informatika i sistemy upravleniya*. 2013, no. 4 (38), pp. 149–157. (In Russ.).
2. Belov G.V., Erkimbaev A.O., Zitserman V.Yu., Kobzev G.A., Morozov I.V. The experience of creating thermophysical databases using modern information technologies (review). *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2020, vol. 58, no. 4, pp. 615–633. (In Russ.).
3. Glushko V.P., Gurvich L.V., Veits I.V., Medvedev V.A. etc. *Thermodynamic properties of individual substances. T.I. Book 1*. Moscow: Nauka, 1978. (In Russ.).
4. *Ivtantermo database* [Electronic resource]. Available at URL: <http://www.chem.msu.su/rus/handbook/ivtan/welcome.html> (accessed: 14.06.2022). (In Russ.).
5. *Electronic reference book "Thermodynamic properties of individual substances"* [Electronic resource]. Available at URL: <http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/2/OIVT/IVTANThermo/Rus/> (accessed: 14.06.2022). (In Russ.).
6. *NIST Chemistry WebBook* [Electronic resource]. Available at URL: <http://webbook.nist.gov>. (accessed: 14.06.2022).
7. *Chemical Equilibrium with Applications* [Electronic resource]. Available at URL: <https://www1.grc.nasa.gov/research-and-engineering/ceaweb/> (accessed: 13.11.2021).
8. *FactSage Courses* [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.factsage.com/> (accessed: 14.06.2022).
9. Bale G.W., Bélislea E., Chartranda P. etc FactSage thermochemical software and databases. *Calphad*. 2016, vol. 55, part 1, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.05.002>
10. *Thermo-Calc Software* [Electronic resource]. Available at URL: <https://thermocalc.com/products/databases/> (accessed: 14.06.2022).
11. Shi P., Engström A., Höglund L. etc. Thermo-Calc and DICTRA enhancematerials design

- and processing. In: *Materials Science Forum*. 2005, pp. 475–479.
12. *HSC Chemistry* [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.hsc-chemistry.com/> (accessed: 14.06.2022).
 13. Desterov S.A. Thermodynamic database for multicomponent oxide systems. *Chimica Techno Acta*. 2018, vol. 5, no. 1, pp. 16–48.
 14. Hallstedt B., Khvan A., Lindahl B., Selleby M., Shuhong Liu. PrecHiMn-4-A thermodynamic database for high-Mn steels. *Calphad-computer coupling of phase diagrams and thermochemistry*. 2017, vol. 56, pp. 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.11.006>
 15. Sechenov P.A., Rybenko I.A. Program for calculating the thermodynamic properties of chemical reactions. *Yuzhno-Sibirskii nauchnyi vestnik*. 2022, no. 1 (41), pp. 60–64. (In Russ.).
 16. Kondepudi D., Prigogine I. *Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures*. Second edition. 2015. 523 p.

Сведения об авторах

Инна Анатольевна Рыбенко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет

Павел Александрович Сеченов, к.т.н., доцент кафедры прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет

Information about the authors:

Inna A. Rybenko, Dr. Sci., Prof., Head of the Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University

Pavel A. Sechenov, Cand. Sci., Asist. Prof., Head of the Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 13.07.2022

После доработки 18.07.2022

Принята к публикации 25.07.2022

Received 13.07.2022

Revised 18.07.2022

Accepted 25.07.2022

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Оригинальная статья

УДК 669.162.1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНОГО АГЛОМЕРАТА В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

А. А. Одинцов

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Представлены результаты аналитического обзора по современному состоянию технологии производства железорудного агломерата в России. Описана динамика производства агломерата за последние 30 лет, ситуация ввода/вывода производственных мощностей аглофабрик. Обобщены и структурированы основные аспекты технологии, действующей в России, схемы производства агломерата: подготовка шихтовых материалов и их окучивание на агломерационной машине, охлаждение и обработка аглоспека. Отражены тенденции развития цифровых технологий и решения экологических вопросов на аглофабриках.

Ключевые слова: аглофабрика, агломерат, агломерация, шихтовые материалы

Для цитирования: Одинцов А.А. Современное состояние технологии производства железорудного агломерата в отечественной металлургии // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 28 – 36.

Original article

THE CURRENT STATE OF IRON ORE AGGLOMERATE PRODUCTION TECHNOLOGY IN THE DOMESTIC METALLURGY

A. A. Odintsov

Siberian State Industrial University (654007, Kemerovo Region, Russia – Kuzbass, Novokuznetsk, Kirova str., 42)

Abstract. The results of an analytical review on the current state of iron ore agglomerate production technology in Russia are presented. The dynamics of agglomerate production over the past 30 years, the situation of input/output of sinter production capacities are described. The main aspects of the technology operating in Russia, the agglomerate production schemes are summarized and structured: preparation of charge materials and their caulking on an agglomeration machine, cooling and processing of the sinter. The trends of sinter plants in the development of digital technologies and the solution of environmental issues are reflected.

Keywords: sinter plant, agglomerate, agglomeration, charge materials

For citation: Odintsov A.A. The current state of iron ore agglomerate Production Technology in Domestic metallurgy. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 28 – 36. (In Russ.).

Общие аспекты

Основным видом окучиваемого железорудного сырья для производства чугуна по-прежнему остается агломерат. Особенно рассматриваемая тенденция характерна для ме-

таллошихты отечественных доменных печей (среднее содержание агломерата в ней составляет 70 – 80 %).

Требования к показателям качества агломерата по содержанию железа, постоянству хими-

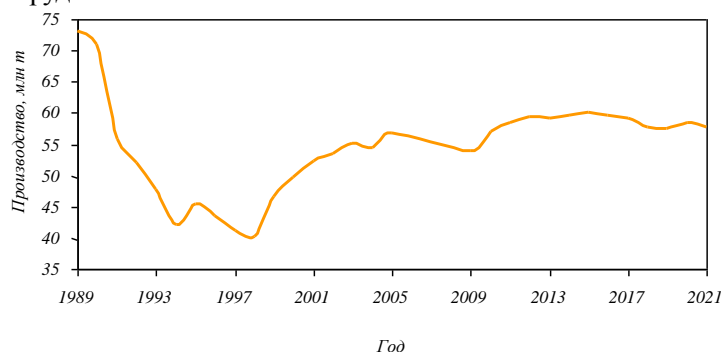
Состав парка агломерационных машин России
Table 1. The composition of the fleet of agglomeration machines in Russia

Предприятие	Год ввода в эксплуатацию	Число агломерационных машин, шт.	Суммарная площадь спекания, м ²	Проектная мощность, млн т/год
ММК (№ 2, 3, 5)	1947 – 1953 (№ 2, 3), 2019 (№ 5)	11	1275	13,0
Чусовской МЗ	Н. д.	2	90	Н. д.
Уральская сталь	1963 – 1964	4	336	2,7
Северсталь	1962 – 1981	8	1008	8,5
НЛМК	1964 – 1973	4	1248	11,7
ЕВРАЗ ЗСМК	1967 – 1971	3	924	7,1
Челябинский МК (№ 2)	2005 – 2006	4	552	4,5
Надеждинский металлургический завод	1946	2	70	1,0
Тулачермет	1960 – 1961	3	298	2,9
ЕВРАЗ Качканарский ГОК	1965	2	472	2,9
Высокогорский ГОК	1958 – 1961	4	300	3,0
ЧЭМК	1963	1	50	0,5
Итого по России	–	48	6623	57,8

ческого состава, содержанию мелочи, холодной и горячей прочности, восстановимости и другим параметрам постоянно повышаются, поэтому перед специалистами в области агломерационного производства стоит задача поэтапного совершенствования технологического процесса агломерации с целью достижения лучших отечественных и мировых показателей.

Производством агломерата в 2021 г. на территории России занимались 12 предприятий: всего действовали 48 агломерационных машин с площадью спекания от 17 до 312 м² (табл. 1).

Динамика производства агломерата в РСФСР и России за последние 30 лет приведена на рисунке. Уровень производства агломерата в настоящее время в России значительно ниже, чем в РСФСР. Это связано, в основном, с финансово-экономическими кризисами первой половины 1990-х и 2009 гг. За период 1991 – 2009 гг. в России из эксплуатации были выведены девять агломерационных фабрик (табл. 2). Большинство из указанных агломерационных машин были введены в эксплуатацию в 30 – 50-х гг. XX в., и на момент вывода из эксплуатации имели не существенную единичную мощность (менее 100 м³) и значительный физический износ основного оборудования.



Динамика производства железорудного агломерата в РСФСР и России
 Dynamics of iron ore agglomerate production in the RSFSR and Russia

В тоже время, за последние 20 лет наметилась тенденция к строительству новых отечественных агломерационных фабрик большой единичной мощности (площадью спекания более 100 м²), отвечающих современным требованиям высокоэффективного производства и экологии. Совершенно новая агломерационная фабрика № 2 ОАО «Мечел» была введена в эксплуатацию в 2005 – 2006 гг., в 2019 г. ПАО «ММК» закончила горячие испытания современной агломерационной фабрики № 5. В других агломерационных цехах модернизация существующего оборудования и совершенствование технологии производства идет эволюционным путем ввиду ограниченности инвестиций в условиях стагнации экономики или площадей для строительства новых объектов в рамках действующего производства.

Далее рассмотрим основные технологические этапы подготовки шихтовых материалов к спеканию и производства железорудного агломерата, а также передовые способы повышения технологической эффективности указанных процессов, которые нашли применение на российских предприятиях.

Агломерационные фабрики России, выведенные из эксплуатации с 1991 по 2019 гг.**Table 2. Agglomeration factories of Russia, decommissioned from 1991 to 2019**

Предприятие	Год ввода в эксплуатацию	Год вывода из эксплуатации	Число агломерационных машин, шт.	Суммарная площадь спекания, м ²
ММК (№ 1)	1937 – 1941	1991	4	250,0
ММК (№ 4)	1964	2019	4	380,8
Высокогорская	1942 – 1948	1992	4	200,0
Мундыбашская	1935 – 1954	1998	4	248,0
Северсталь (№ 1)	1956	1992 – 1993	3	225,0
Фабрика «КМАруда»	1952	1992	1	56,0
Гороблагодатская	1954 – 1958	1994 – 1996	3	200,0
Мечел (№ 1)	1956 – 1958	2008	3	212,5
Абагурская (№ 1, 2)	1956 – 1971	2006 – 2009	9	720,0

Подготовка шихтовых материалов к агломерации

Наиболее примитивная с технологической точки зрения схема подготовки шихтовых материалов на отечественных агломерационных фабриках включает стандартное оборудование для разгрузки, распределения, складирования и усреднения железорудного сырья: вагонопрокидыватели с рудно-грейферными перегружателями, укладываемыми выгруженный материал в штабели и забором материала с помощью тех же мостовых перегружателей или экскаваторов (табл. 3).

Более совершенная схема подразумевает выгрузку материала с помощью саморазгружающейся тележки (работает в автоматическом режиме) с конвейера, проходящего в верхней части склада вдоль продольной оси. Однако в этом случае невозможно достичь стопроцентного усреднения сформированного штабеля по причине забора материала грейферным краном или экскаватором ограниченного количества слоев. Такая схема наиболее широко распространена на отечественных агломерационных фабриках.

Передовые предприятия ориентированы на использование высокопроизводительного оборудования с возможностью подачи материала в любую точку формируемого штабеля и одновременной отработки всего сечения штабеля при заборе его в производство (штабелеукладчики одно- или двухконсольные поворотные, заборно-усреднительные машины, универсальные погрузочно-разгрузочные машины) [1].

На стадии формирования штабеля рекомендуется применение комбинированного способа ввода извести в агломерационную шихту, который подразумевает закладку первой части от общего объема извести в штабель вместе с железорудными материалами и вылеживание известкованной смеси на определенный срок. При этом ввод извести в железорудный материал может осуществляться как на горно-

обогащительном предприятии, так и непосредственно на аглофабрике. В первом случае известь служит профилактическим средством против смерзаемости железорудного сырья при его транспортировке до потребителя [2].

Подготовка твердого топлива к агломерации осуществляется по типовой технологической схеме: дробление материала в конусных дробилках с предварительным грохочением на инерционных грохотах и последующем измельчением дробленого топлива на четырехвалковых дробилках. Иногда вместо конусных дробилок применяют двухвалковые, а в качестве альтернативы четырехвалковой дробилке используют стержневые мельницы (модернизированные молотковые дробилки) [3]. При таких схемах подготовки на агломерацию поступает топливо с содержанием нежелательной фракции 0 – 0,5 мм порядка 30 – 40 % и выходом крупных фракций (3 – 13 мм) более 10 %. На некоторых аглофабриках для повышения качества подготовки топлива применяют четырехвалковые дробилки повышенной производительности и предварительный отсев топлива перед четырехвалковыми дробилками [1]. При использовании стандартных схем и оборудования для подготовки топлива к агломерации остается актуальным вопрос совершенствования режимов работы существующего оборудования в изменяющихся условиях формирования гранулометрического состава исходного топлива на складе [4].

Традиционно подготовка флюсов (известняка/доломита) для производства агломерата осуществляется в молотковых дробилках, которые работают в связке с грохотами для контрольного грохочения уже дробленого материала: крупная фракция направляется на додрабливание в молотковые дробилки, а мелкая – в корпус агломерации. На многих агломерационных фабриках актуальным остается вопрос пропускной способности контрольных грохотов в переходный период (весна, осень), когда исходный флюс со-

Схемы подготовки железорудного сырья на основных предприятиях отрасли
Table 3. Schemes for the preparation of iron ore raw materials at the main enterprises of the industry

Предприятие	Разгрузка ЖРС	Подача и складирование	Забор в производство	Применение извести
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	Вагоноопрокидыватель	Послойная укладка материалов по всей длине штабеля	В разрез штабеля с помощью экскаватора	Ввод извести в ЖРС при подаче усредненной смеси концентратов в шихтовое отделение
ПАО «ММК» (№ 2, 3, 4) № 5	Приемные бункера	Послойная укладка материалов по всей длине штабеля	Поэтапная обработка грейферным краном	Ввод извести и смешивание ее в смеси с ЖРС перед подачей в штабель
			В разрез штабеля с помощью заборщика	
ПАО «Северсталь»	Вагоноопрокидыватель	Послойная укладка материалов по всей длине штабеля	Через разгрузочные устройства под штабелем. Подача остатков штабеля с помощью бульдозера/экскаватора	Дозирование в шихтовом отделении
ПАО «НЛМК»	Вагоноопрокидыватель	Послойная укладка материалов по всей длине штабеля	В разрез штабеля с помощью экскаватора	Ввод извести и смешивание ее в смеси с ЖРС перед подачей в штабель
ПАО «Мечел» (№ 2)	Вагоноопрокидыватель	Послойная укладка материалов по всей длине штабеля	В разрез штабеля с помощью заборно-усреднительной машины	Ввод извести и смешивание ее в смеси с ЖРС перед подачей в штабель
Тулачермет	Вагоноопрокидыватель	Формирование и забор штабелей рудно-козловыми перегружателями		Ввод извести и смешивание ее в смеси с ЖРС перед подачей в штабель
АО «ЕВРАЗ КГОК»	В бункера шихтового отделения	Отсутствует стадия складирования		Не применяется

держит повышенное количество влаги (3 % и более), что приводит к залипанию сит контрольных грохотов и снижению выхода годного флюса. Возможным решением этого вопроса является применение сит с увеличенным живым сечением (с размером ячейкой 4 – 5 мм, вместо 3 мм, если при такой схеме обеспечивается требования к контролируемым классам готового флюса). Кардинальным решением рассматриваемой проблемы является использование грохотов нестандартной конструкции (например, флипплоп), а также работа с поставщиками флюсов по исключению мелкой (менее 5 мм) фракции, подверженной влагонасыщению.

В процессе подготовки шихтовых материалов к агломерации особое внимание уделяется дозированию компонентов шихты. Основные тенденции повышения эффективности процесса дозирования следующие: увеличение точности весодозаторов, реализация современных систем

автоматизации, в том числе с возможностью синхронизации с АСУ ТП спекательного отделения. На шихтовых материалах (точность дозирования которых не принципиальна) по-прежнему используются тарельчатые питатели (устаревшие схемы дозирования).

Смешивание компонентов шихты повсеместно осуществляется в смесителях барабанного типа. На аглофабриках где применяется известь в качестве интенсификатора процесса агломерации рекомендуется часть воды подавать в смеситель для предварительного окомкования и нагрева шихты. Подобная схема подачи воды актуальна для материалов, имеющих в своем составе высокую долю тонкоизмельченных концентратов мокрой магнитной сепарации (особенно в зимний период времени), когда на агломерационную фабрику концентраты поступают в сушеном состоянии (с влажностью менее 3 %). Основное требование к предварительно увлаж-

ненной шихте – это возможность беспрепятственной подачи шихты по перегрузочным узлам и бункерам агломерационного отделения. Для предотвращения налипания и примерзания шихты к стенкам бункеров и перегрузочных узлов рекомендуется использовать специальное оборудование (вибро- и пневмообрушение), а также футеровку стенок особыми материалами (полиуретаном), имеющих низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. В случае если рассматриваемая технология предусмотрена проектом для новой аглофабрики, необходимо, чтобы конфигурация бункеров и перегрузочных узлов уже на стадии проектирования соответствовала физико-химическим свойствам предварительно увлажненной шихты.

Для смесителей устанавливают максимально возможную скорость вращения для обеспечения эффективности смешивания компонентов шихты с учетом ограничений по вибронгрузке основных узлов агрегата. Для сохранения температуры шихты в зимний период времени иногда применяют предварительный нагрев теплоносителем (острым паром), который подают непосредственно в корпус барабана в слой шихты.

На следующей стадии подготовки шихтовой смеси (окомковании) достигается окончательное формирование гранулометрического состава окомкованной шихты перед ее спеканием. Поэтому именно на этой стадии предъявляются особо жесткие требования к оборудованию и технологическому режиму окомкователя шихты. В отечественной практике на стадии окомкования применяют, как и на стадии смешивания, окомкователи барабанного типа. Для подбора технологического режима может изменяться скорость вращения барабана, способ подачи воды на поверхность движущейся в барабане шихты и в редких случаях угол наклона окомкователя. При недостаточной температуре шихты (менее 60 °С), которая обеспечивается в основном вводом в шихту извести и горячего возврата, в корпусе барабана монтируются специальные устройства для подачи острого пара [5] или горелки для сжигания газообразного топлива [6].

Известен отечественный опыт окомкования агломерационной шихты из тонкоизмельченных концентратов в тарельчатых грануляторах [7], установленных и работающих параллельно барабанным окомкователям. Несмотря на полученные положительные результаты (увеличение производительности и качества агломерата), практика использования тарельчатых грануляторов для окомкования агломерационной шихты не получила дальнейшего распространения.

Агломерация шихтовых материалов

Для загрузки шихты на большинстве агломерационных машинах используют стандартную

схему барабанный питатель – наклонный латок, которая дополняется различными специальными устройствами (стабилизаторы потока шихты, горизонтальные стержни, различные вырезы и щели на затворе и дозаторе барабанного питателя, дополнительные отражательные листы), позволяющими более эффективно управлять сегрегацией, равномерностью распределения и плотностью уложенной на паллеты шихты [8, 9].

По-прежнему остается дискуссионным вопрос использования однослойной или двухслойной загрузки шихты на крупных агломерационных машинах, например, типа АКМ-312. Несмотря на положительный опыт по увеличению производительности агломерационных машин Новолипецкого, Череповецкого и Карагандинского металлургических комбинатов, осуществивших переход с двухслойной на однослойную загрузку шихты (за счет демонтажа узла нижней загрузки и переноса зажигательного горна на несколько вакуум-камер вперед машины с соответствующим увеличением полезной площади спекания) [10], выявлено негативное последствие при подобном изменении схемы загрузки шихты: ухудшение качества агломерата (прочностные характеристики) из-за невозможности оперативного регулирования температурно-теплового состояния верхней части спекаемого слоя за счет подшихтовки в него дополнительного топлива.

Для поддержания эффективного живого сечения колосникового поля, увеличения срока службы колосников и уменьшения просыпи мелких частиц шихты в газовый коллектор на части агломерационных фабрик используют постель. Основные проблемы получения качественной постели – неэффективный конструктив и живое сечение грохотов для выделения довольно узкоклассифицированного агломерата (обычно варьируется в диапазоне 5 – 23 мм).

Для повышения эффективности внешнего нагрева агломерационной шихты и экономии топливно-энергетических ресурсов наметилась тенденция сокращения площади зажигательного горна с применением плоскопламенных горелок [11].

Развитие самого конструктива современных агломерационных машин направлено на максимизацию герметичности газоотводящей системы и повышение других технологических показателей (применение подвижной разгрузочной части, поджимаемой с помощью контргрузов; использование шторного уплотнения, высоких и/или уширенных бортов, самоочищающуюся колосниковую решетку на спекательных тележках), а также сокращение эксплуатационных затрат (автоматизация системы смазки спекательных тележек; охлаждение агломерата на агло-

машине; сухая уборка просыпи из-под газового коллектора), повышение эффективности управления производственными процессами (АСУ ТП процесса спекания; видеонаблюдение рабочих площадок) [11, 12].

Охлаждение и обработка агломерационного спека

Для дробления горячего агломерационного спека на металлургических предприятиях широкое распространение получили одновалковые зубчатые дробилки. Качество агломерата после дробления на одновалковой зубчатой дробилке характеризуется высоким содержанием кусков с размерами более 200 мм (более 25 %) и мелочи с размерами 0 – 5 мм (около 10 %) [13], что не удовлетворяет требованиям доменного процесса. Повышение качества дробления на рассматриваемом типе дробилок сводилось к изменению числа и формы зубьев или места их установки относительно друг друга [14, 15].

Известны примеры исследования и эксплуатации в России аглодробилок с консольно расположенными колосниками [16, 17] и роторных дробилок [13]. Несмотря на ряд преимуществ (упрощение конструкции, увеличение выхода годного для первого типа дробилок, снижение верхнего предела крупности, высокая производительность и износостойкость для второго типа дробилок), они не получили дальнейшего распространения по разным причинам. Для агломерационных машин с невысокой единичной мощностью (менее 240 м² – агломерационные машины ПАО «Мечел») возможно использование щековых дробилок для механической обработки агломерационного спека.

В настоящее время на агломерационных фабриках России применяется три типа охладителей (линейный – ЕВРАЗ ЗСМК, Северсталь, НЛМК; кольцевой – ММК и чашевый – ЕВРАЗ КГОК) и два варианта охлаждения агломерата (без отсева – ММК, Мечел и с отсевом горячего возврата – все остальные предприятия). На устаревших агломерационных фабриках стадия охлаждения агломерата вообще отсутствует.

Окончательное формирование гранулометрического состава агломерата осуществляют по различным схемам сортировки. Самая простая схема подразумевает грохочение агломерационного спека сразу после процесса спекания с выделением горячего возврата (агломерационная фабрика ВГОК). Более совершенная схема может включать в себя две стадии получения возврата: горячего и холодного (или только холодного), но без выделения постели (НЛМК, АФ №№ 2, 3 ММК) или только с холодным грохочением и сортировкой постели (Мечел, АФ № 5

ММК). Самая продвинутая схема сортировки агломерата, помимо горячего и холодного грохочения, включает грохота выделения постели (ЕЗСМК, аглоцех № 3 Северстали и др.). Для сортировки аглоспека широкое распространение получили самобалансные отечественные грохота типа ГСТ, реже применяются аналоги зарубежных поставщиков (Schenk Process). Практически на всех металлургических предприятиях обязательным условием подготовки качественных шихтовых материалов для доменной плавки является наличие стадии отсева агломерата в доменном цехе.

Цифровые технологии и экология

В последнее десятилетие большой интерес представляет использование цифровых технологий для оптимизации процессов подготовки шихтовых материалов и производства агломерата на различных стадиях их реализации: закладка и распределение железосодержащих материалов в штабеле, составление и увлажнение агломерационной шихты, контроль качества полученного агломерата; диагностика состояния основного технологического оборудования (агломерационных машин, конвейеров и т.п.). На ряде фабрик (ММК, Северсталь, ЕВРАЗ ЗСМК) тестируются онлайн анализаторы химического состава входящих материалов (смешанной шихты) или готового агломерата [18], что открывает широкие возможности оперативного регулирования качества агломерата и создания экспертных систем агломерационного производства.

На крупных металлургических предприятиях агломерационное производство остается подразделением, перерабатывающем большую часть железосодержащих отходов различных переделов: шламы и пыли коксового, доменного, сталеплавильных цехов, продукты переработки сталеплавильных шлаков, сухая и промасленная окалина прокатных цехов, агломерационные шламы и т.д. [19 – 21]. При вовлечении отходов металлургического производства в каждом конкретном случае оценивается баланс вредных примесей в агломерационной шихте (сера, фосфор, цинк, титан, щелочные металлы и др.) с целью оптимизации состава компонентов шихты и минимизации перехода вредных соединений и элементов на дальнейшие переделы (доменный и сталеплавильный), а также влияние ввода отходов на показатели процесса спекания и качества агломерата.

Агломерационная фабрика традиционно является крупным источником выбросов загрязняющих веществ (СО, SO₂, NO_x) и пыли в атмосферу [22]. Поэтому при строительстве новых или модернизации старых цехов монтируется

современные системы рециркуляции агломерационных газов, устанавливаются высокоэффективные электрофильтры, рукавные фильтры, строятся сероулавливающие установки [23 – 25].

Выводы

Подавляющее большинство агломерационных производств в России имеют традиционную технологическую схему подготовки шихтовых материалов и производства агломерата, разработанную еще во второй половине XX в. Она обеспечивается за счет использования роторных вагоноопрокидывателей, экскаваторов на стадиях разгрузки, распределения, усреднения и подачи шихтовых материалов; весодозаторов, смесительно-окомковательного оборудования барабанного типа, агломашин типа АКМ (на стадиях дозирования, смешивания, окомкования и спекания подготовленной шихты). Обработка агломерационного сепка (дробление, охлаждение и грохочение) не имеет типовой аппаратно-технологической схемы и для каждой фабрики имеет свои особенности.

Несмотря на отставание отечественных агломерационных фабрик от зарубежных по уровню технического оснащения и технологического развития, новые производства проектируются и строятся уже с учетом современных тенденций в области подготовки шихтовых материалов, автоматизации производственных процессов и экологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков Н.А., Казанцев Е.А., Мягченкова Н.П. и др. Развитие агломерационного производства ОАО «ЧМК» // *Металлург*. 2013. № 3. С. 37–40.
2. Одинцов А.А., Долинский В.А. Особенности использования в агломерационном пелледеле профилированного известью железорудного концентрата // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. № 4. С. 15–20.
3. Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н., Малыгин А.М. Подготовка топлива к агломерации руд и концентратов на конвейерных машинах // *Цветная металлургия*. 2002. № 8-9. С. 10–15.
4. Одинцов А.А., Долинский В.А. Оптимизация производительности дробильно-сортировочного оборудования для подготовки твердого топлива к агломерации // *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук*. Отделение металлургии. 2009. № 23. С. 25–32.
5. Дячок Н.Г., Шарига А.Д., Смольников А.Ф. и др. Опыт подогрева агломерационной шихты паром // *Сталь*. 1999. № 5. С. 10–14.
6. Ав. св. 852951 СССР, МКИЗ С 22 В 1/14. Устройство для подогрева агломерационной шихты / В.И. Литвинов, И.А. Дегтеренко, Б.Н. Николаев, А.М. Брылин. (СССР). № 4102255/23-02; заявл. 05.05.86; опубл. 15.05.89.
7. Исаенко Г.Е., Сапрыкин А.Н., Кузнецов А.С., Пузанов В.П., Фролов Ю.А. Комбинированное окомкование агломерационной шихты в аппаратах барабанного типа и тарельчатых грануляторах // *Сталь*. 2009. № 8. С. 2–7.
8. Фролов Ю.А. и др. Усовершенствованная система загрузки шихты на агломашину АКМ-312 // *Черная металлургия*. Бюллетень НТИ. 1987. № 22. С. 30–33.
9. Осокин Н.А. Комплексная подготовка аглошихты к спеканию. Материалы к техническому совету. Новокузнецк: Кузнецкий ГОК, 2004. 57 с.
10. Викулов Г.С., Кабанов Ю.А. О некоторых проблемах в конструктивных решениях аглофабрик // *Черная металлургия*. 2000. № 5. С. 17.
11. Жилкин В.П., Доронин Д.Н. Производство агломерата. Технология, оборудование, автоматизация. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2004. 292 с.
12. Фролов Ю.А. и др. Научно-техническое обоснование модернизации агломерационной фабрики ОАО «ЧМК» с охлаждением спека на агломерационных машинах // *Черная металлургия*. № 1. 2010. С. 24–36.
13. Борискин И.К., Арыков Г.А., Пыриков А.Н. Интенсивная механическая обработка агломерата. Теория, оборудование, технология. М.: МИСИС, 1998. 248 с.
14. Мартыненко В.А., Кухарь А.С. Производство агломерата (технология, организация рабочего места). М.: Металлургия, 1985. 72 с.
15. Притыкин Д.П. Механическое оборудование заводов цветной металлургии. Ч. 1. Механическое оборудование для подготовки шихтовых материалов. М.: Металлургия, 1988. 392 с.
16. Макаров К.К. Аглодробилки с консольно расположенными колосниками // *Вестник машиностроения*. 2000. № 7. С. 69–70.
17. Пат. 2231387 РФ, МКИ В 02 С 4/08. Одновалковая зубчатая дробилка / Макаров К.К., Невраев В.П., Баринов С.И. (РФ); опубл. 24.06.2004. Бюл. № 18.
18. Рябчиков М.Ю., Гребенникова В.В., Рябчикова Е.С., Богданов Н.В. и др. Обзор существующих систем оперативного управления агломерационным процессом // *Автоматизированные технологии и производства*. 2015. № 3. С. 31–35.

19. Одинцов А.А., Долинский В.А. Использование отходов коксового цеха в агломерационно-известковом производстве ОАО «ЗСМК». В кн.: Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе. Сб. докл. второй межд. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 8-10 окт. 2008. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2008. С. 215–222.
20. Долинский В.А., Никитин Л.Д., Одинцов А.А., Домнин К.И. Рецикл техногенных отходов при производстве агломерата и чугуна // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 8. С. 41–44.
21. Одинцов А.А., Долинский В.А. Опыт утилизации переработанных отвальных мартевских шлаков на агломерационной фабрике. В кн.: Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия промышленных регионов России. Сб. докл. четвертой межд. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 23-25 окт. 2012. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2012. С. 218–227.
22. Фролов Ю.А. Агломерация. Технология. Теплотехника. Управление. Экология. М.: Металлургиздат, 2016. 672 с.
23. Птичников А.Г., Баринов В.Х., Казанцев и др. Повышение эффективности работы аглофабрики ОАО ЧМК // Сталь. 2011. № 7. С. 6–14.
24. Дунаев А.В., Лавошник А.С., Котынский Д.А. и др. Технологические решения по очистке аглогазов от пыли и оксидов серы на ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова» // Экология и промышленность. 2013. № 2. С. 46–48.
25. На ММК завершена реконструкция сероулавливающей установки в аглоцехе // Магнитогорский металлургический комбинат. 2016. Электронный ресурс. URL: http://mmk.ru/press_center/69599/ (дата обращения 20.08.2021).
4. Odintsov A.A., Dolinskii V.A. Optimization of the productivity of crushing and screening equipment for the preparation of solid fuel for agglomeration. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2009, no. 23, pp. 25–32. (In Russ.).
5. Dyachok N.G., Shariga A.D., Smol'nikov A.F. etc. Experience of heating agglomeration charge with steam. *Stal'*. 1999, no. 5, pp. 10–14. (In Russ.).
6. Litvinov V.I., Degterenko I.A., Nikolaev B.N., Brylin A.M. *Device for heating agglomeration charge*. Av. sv. 852951 SSSR, MKI3 S 22 V 1/14. opubl. 15.05.89. (In Russ.).
7. Isaenko G.E., Saprykin A.N., Kuznetsov A.S., Puzanov V.P., Frolov Yu.A. Combined pelletizing of agglomeration charge in drum-type apparatuses and plate granulators. *Stal'*. 2009, no. 8, pp. 2–7. (In Russ.).
8. Frolov Yu.A. et al. Improved charge loading system for the agglomeration machine AKM-312. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' NTI*. 1987, no. 22, pp. 30–33. (In Russ.).
9. Osokin N.A. *Complex preparation of sintering sinter. Materials for the technical council*. Novokuznetsk: Kuznetskii GOK, 2004, 57 p. (In Russ.).
10. Vikulov G.S., Kabanov Yu.A. *About some problems in the design solutions of sinter plants*. *Chernaya metallurgiya*. 2000, no. 5, pp. 17. (In Russ.).
11. Zhilkin V.P., Doronin D.N. *Agglomerate production. Technology, equipment, automation*. Ekaterinburg: Ural'skii tsentr PR i reklamy, 2004, 292 p. (In Russ.).
12. Frolov Yu.A. et al. Scientific and technical substantiation of modernization of the agglomeration factory of JSC "CHMK" with sinter cooling on agglomeration machines. *Chernaya metallurgiya*. 2010, no. 1, pp. 24–36. (In Russ.).
13. Boriskin I.K., Arykov G.A., Pyrikov A.N. *Intensive mechanical treatment of agglomerate. Theory, equipment, technology*. Moscow: MISIS, 1998, 248 p. (In Russ.).
14. Martynenko V.A., Kukhar' A.S. *Agglomerate production (technology, workplace organization)*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 72 p. (In Russ.).
15. Pritykin D.P. *Mechanical equipment of non-ferrous metallurgy plants. Part 1. Mechanical equipment for the preparation of charge materials*. Moscow: Metallurgiya, 1988, 392 p. (In Russ.).
16. Makarov K.K. Agglodrobilki with cantilevered grates. *Vestnik mashinostroeniya*. 2000, no. 7, pp. 69–70. (In Russ.).
17. Makarov K.K., Nevraev V.P., Barinov S.I. *Single-roll gear crusher*. Pat. 2231387 RF, MKI V 02 S 4/08. opubl. 24.06.2004. *Byullten' izobretenii*. 2004, no. 18. (In Russ.).

REFERENCES

1. Gorshkov N.A., Kazantsev E.A., Myagchenkova N.P. etc. Development of agglomeration production of OJSC "CHMK". *Metallurg*. 2013, no. 3, pp. 37–40. (In Russ.).
2. Odintsov A.A., Dolinskii V.A. Features of the use of lime-cured iron ore concentrate in agglomeration redistribution. *Problemy cherno metallurgii i materialovedeniya*. 2013, no. 4, pp. 15–20. (In Russ.).
3. Frolov Yu.A., Bezdezhskii G.N., Malygin A.M. Preparation of fuel for agglomeration of ores and concentrates on conveyor machines. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2002, no. 8-9, pp. 10–15. (In Russ.).

18. Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V., Ryabchikova E.S., Bogdanov N.V. et al. Review of existing systems of operational management of the agglomeration process. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva*. 2015, no. 3, pp. 31–35. (In Russ.).
19. Odintsov A.A., Dolinskii V.A. Use of coke shop waste in agglomeration and lime production of JSC "ZSMK". In: *Waste management is the basis for restoring ecological balance in Kuzbass. Sat. dokl. the second international scientific-practical conf. Novokuznetsk, 8-10 Oct. 2008*. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2008, pp. 215–222. (In Russ.).
20. Dolinskii V.A., Nikitin L.D., Odintsov A.A., Domnin K.I. Recycling of technogenic waste in the production of agglomerate and cast iron. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 8, pp. 41–44. (In Russ.).
21. Odintsov A.A., Dolinskii V.A. The experience of recycling recycled open-hearth slag at an agglomeration plant. In: *Waste management – the basis for restoring the ecological balance of industrial regions of Russia. Sat. dokl. fourth international scientific and practical conference. Novokuznetsk, October 23-25, 2012*. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2012, pp. 218–227. (In Russ.).
22. Frolov Yu.A. *Agglomeration. Technology. Heat engineering. Management. Ecology*. Moscow: Metallurgizdat, 2016, 672 p. (In Russ.).
23. Ptichnikov A.G., Barinov V.Kh., Kazantsev et al. Improving the efficiency of the sinter plant of OJSC CHMK. *Stal'*. 2011, no. 7, pp. 6–14. (In Russ.).
24. Dunaev A.V., Lavoshnik A.S., Kotynskii D.A. etc. Technological solutions for the purification of sinter gases from dust and sulfur oxides at JSC "Metallurgical Plant named after A.K. Serov". *Ekologiya i promyshlennost'*. 2013, no. 2, pp. 46–48. (In Russ.).
25. Reconstruction of the sulfur-collecting plant in the sinter plant has been completed at MMK. *Magnitogorsk Metallurgical Combine*. 2016. Electronic resource. URL: http://mmk.ru/press_center/69599/ (accessed 20.08.2021). (In Russ.).

Сведения об авторах

Антон Александрович Оди́нцов, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: aa_odincov@mail.ru

Information about the authors

Anton A. Odintsov, Associate Professor of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: aa_odincov@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 15.06.2022
 После доработки 15.08.2022
 Принята к публикации 18.08.2022

Received 15.06.2022
 Revised 15.08.2022
 Accepted 18.08.2022

Оригинальная статья

УДК 621.74:669.7.018

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА МЕЖФАЗНОЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМПОНЕНТОВ ЛИТЫХ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ
КОМПОЗИТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ**

Е. С. Прусов¹, И. В. Шабалдин¹, В. Б. Деев²

¹Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, Россия, Владимир, ул. Горького, 87)

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (119991, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4)

Аннотация. Характер межфазного взаимодействия алюминиевых расплавов с экзогенными армирующими компонентами при получении алюмоматричных композиционных материалов литейно-металлургическими методами может существенно изменяться при добавлении различных легирующих элементов. В этой связи учет влияния легирования матричных сплавов на термодинамическую активность компонентов в расплавах может рассматриваться как один из критериев выбора легирующих элементов при проектировании составов литых алюмоматричных композитов. Вместе с тем экспериментальные оценки термодинамической активности компонентов сложных систем сопряжены со значительными затратами времени и материальных ресурсов, характеризуются высокой трудоемкостью и большим разбросом полученных значений. Разработка и верификация расчетных моделей для прогнозирования термодинамического поведения многокомпонентных расплавов может рассматриваться как достаточно эффективный подход к определению их термодинамических характеристик. В настоящей работе проведена оценка термодинамической активности легирующих компонентов матричных алюминиевых сплавов при получении литых композиционных материалов на основе тройной системы Al – Si – X (где X = Si, Cu, Mg, Zn, Mn, Ni, Ti, Fe) с использованием уравнения Уилсона и расчетных значений регулируемых параметров по расширенной модели Миедемы. Расчетные формы уравнений для определения коэффициентов активности компонентов реализованы в программном пакете MS Excel. Полученные результаты могут быть полезны при прогнозировании химической стабильности экзогенных армирующих компонентов в матричных алюминиевых расплавах.

Ключевые слова: литые алюмоматричные композиты, межфазное взаимодействие, легирующие элементы, термодинамическая активность

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-01169.

Для цитирования: Прусов Е.С., Шабалдин И.В., Деев В.Б. Оценка влияния легирующих элементов на межфазное взаимодействие компонентов литых алюмоматричных композитов по изменению термодинамической активности // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 37 – 44.

Original article

**EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ALLOYING ELEMENTS
ON THE INTERFACIAL INTERACTION OF THE COMPONENTS OF CAST
ALUMINUM MATRIX COMPOSITES BY CHANGING
THE THERMODYNAMIC ACTIVITY**

E. S. Prusov¹, I. V. Shabaldin¹, V. B. Deev²

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (87 Gorky st., Vladimir, 600000, Russian Federation)

²National University of Science and Technology "MISIS" (4 Leninsky Prospekt, Moscow, 119991, Russian Federation)

Abstract. The nature of the interfacial interaction of aluminum melts with exogenous reinforcing components in the production of aluminum matrix composite materials by foundry-metallurgical methods can be significantly changed by adding various alloying elements. In this regard, consideration of the influence of alloying of matrix alloys on the thermodynamic activity of components in melts can be treated as one of the criteria for choosing alloying elements during designing the compositions of cast aluminum matrix composites. At the same time, experimental estimates of the thermodynamic activity of the components of complex systems are associated with significant time and material resources, are characterized by high labor intensity and a large spread of the obtained values. The development and verification of computational models for predicting the thermodynamic behavior of multicomponent melts can be considered as a fairly effective approach to determining their thermodynamic characteristics. In the present work, an assessment of the thermodynamic activity of alloying components of matrix aluminum alloys in the production of cast composite materials based on the Al – Si – X ternary system (where X = Si, Cu, Mg, Zn, Mn, Ni, Ti, Fe) was carried out using the Wilson equation and calculated values of adjustable parameters according to the extended Miedema model. The calculation forms of the equations for determining the activity coefficients of the components are implemented in the MS Excel software package. The results obtained can be useful in predicting the chemical stability of exogenous reinforcing components in matrix aluminum melts.

Keywords: cast aluminum matrix composites, interfacial interaction, alloying elements, thermodynamic activity

Funding: The research was carried out with the financial support of the RFBR as part of the scientific project No. 20-08-01169.

For citation: Prusov E.S., Shabaldin I.V., Deev V.B. Evaluation of the influence of alloying elements on the interfacial interaction of the components of cast aluminum matrix composites by changing the thermodynamic activity. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 37 – 44. (In Russ.).

Введение

Возрастающий научный и практический интерес к разработке составов и технологий получения литых металломатричных композитов в значительной степени обусловлен широкими функциональными возможностями, предоставляемыми этим сравнительно новым классом перспективных материалов [1 – 3]. В частности, литые композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов, содержащие в качестве армирующих фаз дисперсные частицы высокомолекулярных тугоплавких соединений, отличаются высокими удельной прочностью, твердостью, жесткостью, износостойкостью в условиях сухого и абразивного изнашивания в широком температурно-силовом диапазоне эксплуатации изделий [4, 5]. Вместе с тем увеличение объемов промышленного использования литых алюмоматричных композитов сопряжено с необходимостью решения ряда технологических и методологических проблем, одной из которых является установление особенностей влияния различных легирующих элементов на характер взаимодействия матричных алюминиевых сплавов с экзогенными армирующими компонентами [6 – 8].

Термодинамические характеристики процессов межфазного взаимодействия армирующих частиц с матричными расплавами важны для понимания механизмов структурообразования при получении литых алюмоматричных композитов [9]. Однако экспериментальные термодинамические исследования многокомпонентных систем сопряжены со значительными затратами

времени и материальных ресурсов, требуют большого числа измерений. Из-за высокой сложности, трудоемкости и недостаточной точности измерений в высокотемпературных экспериментах приводимые в литературе результаты различных научных групп по оценке термодинамических характеристик металлических расплавов имеют, как правило, значительные расхождения [10 – 12]. Именно поэтому разработка теоретических моделей для прогнозирования термодинамического поведения многокомпонентных расплавов может рассматриваться как достаточно эффективный подход к определению их термодинамических характеристик. Несмотря на очевидную приближенность таких моделей и реализующих методик, их применение может приводить к получению полезных результатов при оценке термодинамических параметров сложных систем, в том числе может сформировать теоретические предпосылки для управления процессами межфазного взаимодействия в жидкофазных технологиях получения металломатричных композиционных материалов.

Для прогнозирования термодинамических свойств многокомпонентных систем было разработано множество теоретических, эмпирических и полумпирических моделей, каждая из которых имеет свои преимущества и ограничения. В частности, в начале 1990-х гг. Динг с сотрудниками предложили модель для прогнозирования параметров взаимодействия и коэффициентов активности ком-

понентов в разбавленных растворах путем объединения известной модели А.Р. Миеды и геометрической модели [13]. Последующее развитие данных подходов шло путем объединения модели Чжоу с моделью Миеды [14], добавления расширенной модели Тупа [15], включения избыточной энтропии [11] и др. Несмотря на многообразие существующих решений, актуальной задачей остается поиск универсальной модели, позволяющей выполнять оценочные расчеты с надежными результатами для прогнозирования термодинамических свойств многокомпонентных металлургических систем. Подбор и верификация такой модели имеют большое методическое значение для решения различных научно-исследовательских задач и практическое значение для ряда инженерных приложений.

Целью настоящей работы является применение уравнения Уилсона для оценки термодинамической активности легирующих компонентов матричных алюминиевых сплавов при получении литых композиционных материалов с использованием расчетных значений регулируемых параметров по расширенной модели Миеды.

Методика исследований

В качестве объекта для термодинамических расчетов в настоящей работе выбрана тройная система Al – Si – X (где X = Si, Cu, Mg, Zn, Mn, Ni, Ti, Fe), являющаяся базовой для алюмоматричных композиционных материалов Al/SiC. С кинетической точки зрения взаимодействие карбида кремния с алюминиевым расплавом включает частичное растворение карбида кремния SiC в жидком алюминии, диффузию ионов кремния и углерода с поверхности раздела вглубь матричного расплава и выделение фазы карбида алюминия с увеличением активности углерода в алюминиевом расплаве [16 – 18]. Вместе с тем растворимость углерода в нелегированном алюминии крайне мала даже при высоких перегревах расплава, поэтому модель жидкого раствора тройной системы Al – Si – C и четверной системы Al – Si – C – X (где X – легирующий элемент) для расчетных задач можно аппроксимировать бинарной системой Al – Si и тройной системой Al – Si – X. Целесообразность и обоснованность такой аппроксимации была многократно подтверждена в расчетных работах Т. Фана с сотрудниками, в частности, в основополагающей работе [19].

Большинство систем в металлургии далеки от идеальных, поэтому для описания термодинамических параметров расплавов понятие концентрации заменяют понятием активности. Активность компонентов является важным фактором при определении термодинамической стабильности экзогенных армирующих частиц в

матричном алюминиевом расплаве. Термодинамическая активность i -го компонента в расплаве может быть выражена следующим образом:

$$a_i = x_i \gamma_i, \quad (1)$$

где x_i – молярная доля i -го компонента в расплаве; γ_i – коэффициент активности i -го компонента.

Для определения коэффициентов активности в настоящей работе использован модифицированный метод расчета, изначально представленный Уилсоном в работе [20]:

$$\ln \gamma_i = -\ln \left(1 - \sum_j x_j A_{j/i} \right) + 1 - \sum_j \left(\frac{x_j (1 - A_{i/j})}{1 - \sum_k x_k A_{k/j}} \right), \quad (2)$$

где A_{ij} и A_{ji} – регулируемые параметры.

Использование уравнения Уилсона позволяет оценивать активность компонентов в тройных системах и в системах более высокого порядка, при этом расчет ведется на основе регулируемых параметров, полученных для двойных систем.

В случае расчета бинарной системы $i - j$ уравнение (2) записывается следующим образом:

$$\ln \gamma_i = 1 - \ln(1 - x_j A_{j/i}) - \frac{x_i}{1 - x_j A_{j/i}} - \frac{x_j (1 - A_{i/j})}{1 - x_i A_{i/j}}. \quad (3)$$

Для тройной системы $i - j - k$ можно записать

$$\ln \gamma_i = 1 - \ln(1 - x_j A_{j/i} - x_k A_{k/i}) - \frac{x_i}{1 - x_j A_{j/i} - x_k A_{k/i}} - \frac{x_j (1 - A_{i/j})}{1 - x_i A_{i/j} - x_k A_{k/j}} - \frac{x_k (1 - A_{i/k})}{1 - x_i A_{i/k} - x_j A_{j/k}}. \quad (4)$$

Таким образом, для нахождения коэффициентов активности компонентов системы Al – X необходимо знать значения регулируемых параметров A_{ij} и A_{ji} (где i – Al; j – легирующий элемент X); кроме того, необходимо задать молярные доли x_i и x_j этих веществ. Для расчета тройной системы Al – Si – X, помимо i и j , добавляется компонент k , соответствующий легирующему элементу X.

Парные регулируемые параметры A_{ij} и A_{ji} могут быть рассчитаны в приближении бинар-

ных бесконечно разбавленных растворов [21] по формулам:

$$\ln \gamma_i^{x_i \rightarrow 0} = -\ln(1 - A_{j/i}) + A_{i/j}; \quad (5)$$

$$\ln \gamma_j^{x_j \rightarrow 0} = -\ln(1 - A_{i/j}) + A_{j/i}. \quad (6)$$

Согласно [22], регулируемый параметр A_{ij} может быть выражен через A_{ji} из уравнения (6) следующим образом:

$$A_{i/j} = \exp(1 - A_{j/i} - \ln \gamma_j^{x_j \rightarrow 0}). \quad (7)$$

Несмотря на то, что значения $\ln \gamma_i^{x_i \rightarrow 0}$ и $\ln \gamma_j^{x_j \rightarrow 0}$ могут быть получены из экспериментальных данных, с учетом ограниченной доступности последних более предпочтительным для рассматриваемых условий представляется их определение расчетным путем. В работах [19, 23 – 25] уравнение Уилсона в сочетании с расширенной моделью Миедемы [26] использовано для разработки новой методики прогнозирования термодинамической активности компонентов в сложном металлическом расплаве, которая позволяет выполнять непосредственные вычисления регулируемых параметров. В этой связи значения регулируемых параметров при температуре 800 °С для рассматриваемых в настоящей работе легирующих элементов заимствованы из работы [25].

Расчет уравнений (3) и (4) автоматизирован в программном пакете Microsoft Excel, при этом задание системы осуществляется путем изменения значения молярной массы легирующего элемента. К примеру, для двойной системы расчет реализуется при помощи двух таблиц. Первая таблица (рис. 1, а) состоит из вводимых параметров: молярная масса компонента, регулируемые параметры A_{ij} и A_{ji} . Данная таблица является интерактивной и исходные данные изменяются автоматически в зависимости от выбранной молярной массы за счет функции «ЕСЛИ». Вторая таблица (рис. 1, б) является основной, поскольку именно в ней происходят все вычисления и выводятся их результаты. Данная таблица рассчитывает количество веществ на 100 г сплава с различным процентным соотношением, а также их общее количество, находит молярные доли матрицы и легирующего элемента и вычисляет значение коэффициента активности по уравнению Уилсона. Пример расчетной таблицы для тройной системы Al – Si – X приведен на рис. 1, б.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены расчетные значения коэффициента активности алюминия при температуре 800 °С в тройной системе Al – Si – X в зависимо-

сти от содержания легирующих элементов. Результаты показывают, что увеличение содержания легирующих элементов (за исключением цинка) сопровождается уменьшением коэффициента активности алюминия. По уменьшению степени влияния на снижение коэффициента активности легирующие элементы можно распределить в следующий ряд: Si > Ti > Ni > Mn > Fe > Cu > Mg. При этом магний в области концентраций до 10 % (по массе) повышает термодинамическую активность алюминия, а при более высоких содержаниях снижает ее.

Модельные прогнозы по опробованной методике могут быть полезны при оценочных расчетах межфазного взаимодействия компонентов литых алюмоматричных композитов, в том числе при прогнозировании химической стабильности экзогенных армирующих компонентов в матричных алюминиевых расплавах при добавлении различных легирующих элементов. В частности, результаты прогнозных расчетов коэффициентов активности могут быть использованы для оценки изменения свободной энергии Гиббса химических реакций между матричным расплавом и армирующими частицами. При этом влияние легирующих элементов на изменение термодинамической активности может быть заложено в качестве одного из критериев на этапе проектирования компонентных составов матричных сплавов. Данный критерий может быть успешно интегрирован в существующую систему синтеза металломатричных композиционных материалов [27], дополняя ранее разработанные термодинамические критерии [28] и позволяя более обоснованно подойти к выбору компонентов легирующего комплекса и концентрационных диапазонов легирования.

Преимущество изложенных расчетных подходов состоит в том, что независимо от наличия экспериментальных данных они могут быть применены к различным металлургическим системам и позволяют прогнозировать термодинамические данные по известным физическим параметрам элементов. Важной особенностью уравнения Уилсона для многокомпонентного раствора является использование параметров, рассчитываемых из данных для бинарных систем, что существенно упрощает решение и сокращает общие объемы требуемых вычислений.

Выводы

Представленные подходы являются универсальными и могут быть использованы для определения термодинамических параметров многокомпонентных систем при разработке новых металлических материалов и технологий их получения, а также при оптимизации производственных процессов с участием жидкой фазы в различных областях, включая металлургические, литейные, сварочные и другие.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	КОЭФФИЦИЕНТ АКТИВНОСТИ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ Al-X											
2	Вводимые параметры			Mg	Cu	Mn	Zn	Ti	Fe	Ni	La	Si
3	Молярная масса La	138,9054	Al/X	0,9555	-2,1763	-5,9026	0,0226	-8,7312	-3,1797	-7,0026	-8,5152	0,9883
4	Регулируемый параметр Al/La	-8,5152	X/Al	-3,7824	-1,3455	-4,4279	0,1608	-8,6617	-2,3570	-5,4411	-14,5021	-5,3041
5	Регулируемый параметр La/Al	-14,5021	M	24,3040	63,5460	54,9380	65,3800	47,8670	55,8450	58,6934	138,9054	28,0855
6	<i>Для автоматического расчета в ячейке B3 нужно выбрать молярную массу необходимого компонента</i>											

a

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	КОЭФФИЦИЕНТ АКТИВНОСТИ ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ Al-Si-X											
2	Вводимые параметры			Mg	Cu	Mn	Zn	Ti	Fe	Ni	La	
3	Молярная масса La	138,9054	Al/X	0,9555	-2,1763	-5,9026	0,0226	-8,7312	-3,1797	-7,0026	-8,5152	
4	Регулируемый параметр Al/La	-8,5152	X/Al	-3,7824	-1,3455	-4,4279	0,1608	-8,6617	-2,3570	-5,4411	-14,5021	
5	Регулируемый параметр Al/Si	0,9883	Si/X	-1,7964	-2,7409	-9,4600	0,8494	-15,7712	-5,6191	-7,6051	-13,6112	
6	Регулируемый параметр La/Al	-14,5021	X/Si	-2,4801	-1,9593	-7,9292	-2,1908	-17,1152	-4,6952	-6,2041	-24,2392	
7	Регулируемый параметр La/Si	-24,2392	M	24,3040	63,5460	54,9380	65,3800	47,8670	55,8450	58,6934	138,9054	
8	Регулируемый параметр Si/Al	-5,3041	<i>Для автоматического расчета в ячейке B3 нужно выбрать молярную массу необходимого компонента, а также в ячейках C11:C12 задать массовый процент для каждого элемента</i>									
9	Регулируемый параметр Si/La	-13,6112										
10		Массовый процент	Количество вещества на 100 г	Общее кол-во	Молярная доля	Составляющие уравнения Уилсона				Ln активности	Коэффициент активности	
11												
12												
13	Al	90	3,3356	3,5496	0,9397	0,654227371	0,665004637	0,001850572	0,009963455	-0,022591293	0,977661979	
14	Si	5	0,1780		0,0502							
15	La	5	0,0360		0,0101							

б

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Al	La	Количество вещества Al на 100г сплава	Количество вещества X на 100г сплава	Общее кол-во	Молярная доля Al	Молярная доля X	Уравнение Уилсона			Натуральный логарифм коэффициента активности	Коэффициент активности
2	99	1	3,669180735	0,007199144	3,676379879	0,998041784	0,001958216	0,971997518	0,970481812	0,001961653	-0,000445947	0,999554152
3	98	2	3,632118303	0,014398288	3,646516592	0,996051495	0,003948505	0,944317820	0,942105042	0,003962506	-0,001749729	0,998251801
4	97	3	3,595055872	0,021597432	3,616653304	0,994028338	0,005971662	0,916944931	0,914804742	0,006003747	-0,003863558	0,996143896
5	96	4	3,557993440	0,028796577	3,586790017	0,991971491	0,008028509	0,889863688	0,888520798	0,008086609	-0,006743720	0,993278968
6	95	5	3,520931008	0,035995721	3,556926729	0,989880106	0,010119894	0,863059676	0,863197491	0,010212381	-0,010350195	0,989703184
7	94	6	3,483868577	0,043194865	3,527063442	0,987753306	0,012246694	0,836519175	0,838783101	0,012382400	-0,014646326	0,985460410
8	93	7	3,446806145	0,050394009	3,497200154	0,985590184	0,014409816	0,810229103	0,815229556	0,014598064	-0,019598516	0,980592286
9	92	8	3,409743713	0,057593153	3,467336867	0,983389802	0,016610198	0,784176972	0,792492115	0,016860827	-0,025175970	0,975138302
10	91	9	3,372681282	0,064792297	3,437473579	0,981151187	0,018848813	0,758350839	0,770529085	0,019172208	-0,031350454	0,969135876
11	90	10	3,335618850	0,071991442	3,407610292	0,978873335	0,021126665	0,732739273	0,749301564	0,021533791	-0,038096082	0,962620446

в

Рис. 1. Общий вид расчетных таблиц для определения термодинамической активности компонентов в двойной (а) и тройной (б) системах и вывод результатов (в)

Fig. 1. General view of calculation tables for determining the thermodynamic activity of components in a binary (a) and ternary (b) system and the output of results (v)

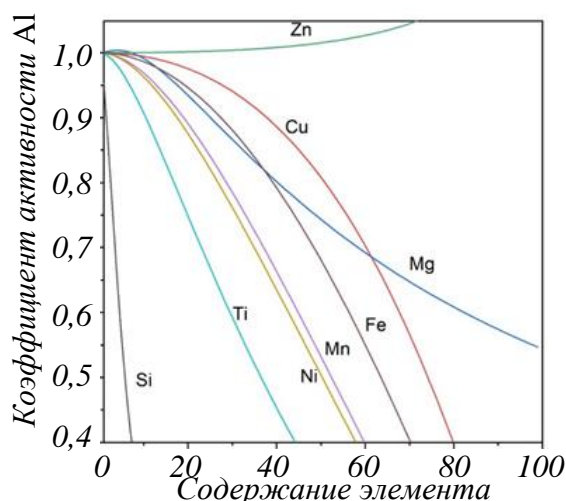


Рис. 2. Влияние легирующих элементов на изменение коэффициента активности алюминия в тройной системе Al – Si – X

Fig. 2. Influence of alloying elements on the change in the aluminum activity coefficient in the ternary Al – Si – X system

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mortensen A., Llorca J. Metal matrix composites // *Annual Review of Materials Research*. 2010. Vol. 40. No. 1. P. 243–270.
- Rohatgi P.K., Ajay Kumar P., Chelliah N.M., Rajan T.P.D. Solidification processing of cast metal matrix composites over the last 50 years and opportunities for the future // *JOM*. 2020. Vol. 72. No. 8. P. 2912–2926.
- Prusov E., Deev V., Rakhuba E. Aluminum matrix in-situ composites reinforced with Mg₂Si and Al₃Ti // *Materials Today: Proceedings*. 2019. P. 386–391.
- Samal P., Vundavilli P.R., Meher A., Mahapatra M.M. Recent progress in aluminum metal matrix composites: a review on processing, mechanical and wear properties // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 59. P. 131–152.
- Панфилов А.В., Прусов Е.С. О получении и свойствах комплексно-армированных композиционных материалов с алюминиевой матрицей // *Литейное производство*. 2008. № 8. С. 1–9.
- Eustathopoulos N., Voytovych R. The role of reactivity in wetting by liquid metals: A review // *Journal of Materials Science*. 2016. Vol. 51. P. 425–437.
- Malaki M., Fadaei Tehrani A., Niroumand B., Gupta M. Wettability in metal matrix composites // *Metals*. 2021. Vol. 11. No. 7. Article 1034.
- Prusov E.S., Deev V.B., Shurkin P.K., Arakelian S.M. The effect of alloying elements on the interaction of boron carbide with aluminum melt // *Non-Ferrous Metals*. 2021. Vol. 50. No. 1. P. 27–33.
- Прусов Е.С., Панфилов А.В., Панфилов А.А. Термодинамический анализ и модель взаимодействия компонентов при синтезе композиционных материалов на основе систем Al–TiO₂–B–SiC и Al–TiO₂–C–SiC // *Литейщик России*. 2009. № 9. С. 30–33.
- Chatain S., Gonella C., Bordier G., Le Ny J. Thermodynamic activity measurements of the liquid Cu-Gd alloy by high temperature mass spectrometry // *Journal of Alloys and Compounds*. 1995. Vol. 228. No. 1. P. 112–118.
- Zhang N., Chen W., Chen X., Ding X., Zhou G. Modeling activity and interaction coefficients of components of multicomponent alloy melts: an example of iron melt // *High Temperature Materials and Processes*. 2013. Vol. 32. No. 3. P. 215–221.
- Li H., Zhang S., Chen Y., Cheng M., Song H., Liu J. Estimation of thermodynamic properties of Cu–La binary alloy with modified miedema's theory // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2016. Vol. 90. No. 1. P. 11–17.
- Ding X., Fan P., Han Q. Models of activity and activity interaction parameter in ternary metallic melt // *Acta Metallurgica Sinica*. 1994. Vol. 30. P. 49–60.
- Fan P., Chou K.C. A self-consistent model for predicting interaction parameters in multicomponent alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1999. Vol. 30. P. 3099–3102.
- Wang F.M., Li X.P., Han Q.Y., Zhang N.X. A model for calculating interaction coefficients between elements in liquid and iron-base alloy // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1997. Vol. 28. P. 109–113.
- Viala J.C., Fortier P., Bouix J. Stable and metastable phase equilibria in the chemical interaction between aluminium and silicon carbide // *Journal of Materials Science*. 1990. Vol. 25. P. 1842–1850.
- Carotenuto G., Gallo A., Nicolais L. Degradation of SiC particles in aluminium-based composites // *Journal of Materials Science*. 1994. Vol. 29. P. 4967–4974.
- Pech-Canul M.I., Katz R.N., Makhlof M.M. Optimum parameters for wetting silicon carbide by aluminum alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000. Vol. 31. P. 565–573.
- Fan T.X., Yang G., Zhang D. Prediction of chemical stability in SiCp/Al composites with alloying element addition using Wilson equation and an extended Miedema model // *Materials Science and Engineering A*. 2005. Vol. 394. P. 327–338.
- Wilson G.M. Vapor-Liquid Equilibrium. XI. A New expression for the excess free energy of mixing // *Journal of the American Chemical Society*. 1964. Vol. 86. No. 2. P. 127–130.

21. Tao D.P. Prediction of the thermodynamic properties of multicomponent liquid alloys by binary infinite dilute activity coefficients // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2001. Vol. 32. P. 1205–1211.
 22. Tao D.P., Yang X.W. Prediction on thermodynamic properties of ternary molten salts from Wilson equation // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1997. Vol. 28. P. 725–727.
 23. Fan T.X., Yang G., Zhang D. Thermodynamic effect of alloying addition on in-situ reinforced TiB₂/Al composites // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005. Vol. 36. P. 225–234.
 24. Fan T.X., Yang G.J., Chen J.Q., Zhang D. Model prediction of thermodynamics activity in multicomponent liquid alloy // *Key Engineering Materials*. 2006. Vol. 313. P. 19–24.
 25. Fang X., Fan T., Zhang D. Work of Adhesion in Al/SiC composites with alloying element addition // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013. Vol. 44. No. 11. P. 5192–5201.
 26. Miedema A.R., de Chatel P.F., de Boer F.R. Cohesion in alloys – Fundamental of a semi-empirical model // *Physica B+C*. 1980. Vol. 100. No. 1. P. 1–28.
 27. Prusov E., Kechin V. General Concept of Cast Metal Matrix Composites Design. In: *World Foundry Congress "Creative Foundry", WFC 2018 – Proceedings*. Krakow, 2018. P. 199–200.
 28. Prusov E., Kechin V., Deev V. Selection of reinforcing phases for aluminum matrix composites using thermodynamic stability criterion. In: *METAL 2020 – 29th International conference on metallurgy and materials*. Conference proceedings. Brno, 2020. P. 1067–1072.
- REFERENCES**
1. Mortensen A., Llorca J. Metal Matrix Composites. *Annual Review of Materials Research*. 2010, vol. 40, no. 1, pp. 243–270.
 2. Rohatgi P.K., Ajay Kumar P., Chelliah N.M., Rajan T.P.D. Solidification Processing of Cast Metal Matrix Composites Over the Last 50 Years and Opportunities for the Future. *JOM*. 2020, vol. 72, no. 8, pp. 2912–2926.
 3. Prusov E., Deev V., Rakhuba E. Aluminum matrix in-situ composites reinforced with Mg₂Si and Al₃Ti. *Materials Today: Proceedings*. 2019, pp. 386–391.
 4. Samal P., Vundavilli P.R., Meher A., Mahapatra M.M. Recent Progress in Aluminum Metal Matrix Composites: A Review on Processing, Mechanical and Wear Properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020, vol. 59, pp. 131–152.
 5. Panfilov A.V., Prusov E.S. On the preparation and properties of complex-reinforced composite materials with an aluminum matrix. *Litejnoe proizvodstvo*. 2008, no. 8, pp. 1–9. (In Russ.).
 6. Eustathopoulos N., Voytovych R. The role of reactivity in wetting by liquid metals: A review. *Journal of Materials Science*. 2016, vol. 51, pp. 425–437.
 7. Malaki M., Fadaei Tehrani A., Niroumand B., Gupta M. Wettability in metal matrix composites. *Metals*. 2021, vol. 11, no. 7, article 1034.
 8. Prusov E.S., Deev V.B., Shurkin P.K., Arakelian S.M. The effect of alloying elements on the interaction of boron carbide with aluminum melt. *Non-Ferrous Metals*. 2021, vol. 50, no. 1, pp. 27–33.
 9. Prusov E.S., Panfilov A.V., Panfilov A.A. Thermodynamic analysis and the model of interaction of components in the synthesis of composite materials based on Al-TiO₂-B-SiC and Al-TiO₂-C-SiC systems. *Liteishchik Rossii*. 2009, no. 9, pp. 30–33. (In Russ.).
 10. Chatain S., Gonella C., Bordier G., Le Ny J. Thermodynamic activity measurements of the liquid Cu-Gd alloy by high temperature mass spectrometry. *Journal of Alloys and Compounds*. 1995, vol. 228, no. 1, pp. 112–118.
 11. Zhang N., Chen W., Chen X., Ding X., Zhou G. Modeling activity and interaction coefficients of components of multicomponent alloy melts: an example of iron melt. *High Temperature Materials and Processes*. 2013, vol. 32, no. 3, pp. 215–221.
 12. Li H., Zhang S., Chen Y., Cheng M., Song H., Liu J. Estimation of thermodynamic properties of Cu-La binary alloy with modified miedema's theory. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2016, vol. 90, no. 1, pp. 11–17.
 13. Ding X., Fan P., Han Q. Models of activity and activity interaction parameter in ternary metallic melt. *Acta Metallurgica Sinica*. 1994, vol. 30, pp. 49–60.
 14. Fan P., Chou K.C. A self-consistent model for predicting interaction parameters in multicomponent alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1999, vol. 30, pp. 3099–3102.
 15. Wang F.M., Li X.P., Han Q.Y., Zhang N.X. A model for calculating interaction coefficients between elements in liquid and iron-base alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1997, vol. 28, pp. 109–113.
 16. Viala J.C., Fortier P., Bouix J. Stable and metastable phase equilibria in the chemical interaction between aluminium and silicon carbide. *Journal of Materials Science*. 1990, vol. 25, pp. 1842–1850.
 17. Carotenuto G., Gallo A., Nicolais L. Degradation of SiC particles in aluminium-based composites. *Journal of Materials Science*. 1994, vol. 29, pp. 4967–4974.

18. Pech-Canul M.I., Katz R.N., Makhlof M.M. Optimum parameters for wetting silicon carbide by aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000, vol. 31, pp. 565–573.
19. Fan T.X., Yang G., Zhang D. Prediction of chemical stability in SiCp/Al composites with alloying element addition using Wilson equation and an extended Miedema model. *Materials Science and Engineering A*. 2005, vol. 394, pp. 327–338.
20. Wilson G. M. Vapor-Liquid Equilibrium. XI. a new expression for the excess free energy of mixing. *Journal of the American Chemical Society*. 1964, vol. 86, no. 2, pp. 127–130.
21. Tao D.P. Prediction of the thermodynamic properties of multicomponent liquid alloys by binary infinite dilute activity coefficients. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2001, vol. 32, pp. 1205–1211.
22. Tao D.P., Yang X.W. Prediction on thermodynamic properties of ternary molten salts from Wilson equation. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1997, vol. 28, pp. 725–727.
23. Fan T.X., Yang G., Zhang D. Thermodynamic effect of alloying addition on in-situ reinforced TiB₂/Al composites. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005, vol. 36, pp. 225–234.
24. Fan T. X., Yang G. J., Chen J. Q., Zhang D. Model prediction of thermodynamics activity in multicomponent liquid alloy. *Key Engineering Materials*. 2006, vol. 313, pp. 19–24.
25. Fang X., Fan T., Zhang D. Work of adhesion in Al/SiC composites with alloying element addition. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013, vol. 44, no. 11, pp. 5192–5201.
26. Miedema A.R., de Chatel P.F., de Boer F.R. Cohesion in alloys – fundamental of a semi-empirical model. *Physica B+C*. 1980, vol. 100, no. 1, pp. 1–28.
27. Prusov E., Kechin V. General Concept of Cast Metal Matrix Composites Design. In: World Foundry Congress "Creative Foundry", WFC 2018 – Proceedings. Krakow, 2018, pp. 199–200.
28. Prusov E., Kechin V., Deev V. Selection of reinforcing phases for aluminum matrix composites using thermodynamic stability criterion. In: METAL 2020 – 29th International Conference on Metallurgy and Materials. Conference Proceedings. Brno, 2020, pp. 1067–1072.

Сведения об авторах

Евгений Сергеевич Прусов, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов», Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

E-mail: eprusov@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4189-877X

Иван Владимирович Шабалдин, студент, техник Управления проектными командами, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

E-mail: shabaldinivan@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1958-6852

Владислав Борисович Деев, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Ультрамелкозернистые металлические материалы», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: deev.vb@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8349-8072

Information about the authors

Evgeny S. Prusov, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof., Associate Professor of the Department of Functional and Constructional Materials Technology, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

E-mail: eprusov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1958-6852

Ivan V. Shabaldin, Student, Technician of the Project Team Direction, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

E-mail: shabaldinivan@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1958-6852

Vladislav B. Deev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory "Ultrafine-grained Metallic Materials", National Research Technological University "MISIS"

E-mail: deev.vb@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8349-8072

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 02.09.2022

После доработки 07.09.2022

Принята к публикации 15.09.2022

Received 02.09.2022

Revised 07.09.2022

Accepted 15.09.2022

Original article

UDK 67.017

MICROSTRUCTURE DEPENDENCE OF AL6061 SURFACE COMPOSITE ON TOOL ROTATION SPEED DURING FRICTION STIR PROCESSING

S. Jayalakshmi¹, R. Arvind Singh¹, A. Vivek Anand¹, K. Srinivas Rao¹, S. Konovalov²

¹MLR Institute of Technology (Hyderabad 500043, India Center for Research and Innovation)

²Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Aluminium (Al) based alloys are used in aerospace and automotive industries due to their high specific stiffness and high specific strength. To enhance their performance, often their mechanical properties are improved by making composites via incorporation of ceramic particles as reinforcement. For requirements, such as high wear resistance, high surface hardness is essential, and therefore making of their ‘surface composites’ suffices. Friction stir process (FSP) is an effective technique to produce surface composites. By varying tool rotation speed, microstructure can be controlled to achieve high hardness. In this work, aluminium alloy Al6061 based surface composites containing silicon carbide and alumina microparticles were made by FSP method. Surface composites were produced at three tool rotation speeds (rpm: 600, 800, 1000). Composites were characterized for their microstructure, i.e. grain size, at four distinct zones, namely, nugget zone (stir zone), heat affected zone, thermo-mechanically affected zone and base metal. Microhardness was measured for the composites at their nugget zone (stir zone) and for the base metal. Hardness of the composites was higher than the base metal, due to recrystallized microstructure i.e. reduction in grain size, and uniform distribution of ceramic particles and their strengthening mechanisms. With increase in tool rotation speed, the grain size in the composites decreased and consequently their hardness increased, such that, at the highest speed (1000 rpm), the grain size at the stir zone was smaller by an order of magnitude and the hardness was three times higher, compared to those of the base metal. Dependence of grain size (and concomitant increase in hardness) on tool rotation speed provides an effective route for microstructure control and hardness enhancement during processing of surface composites, without resorting to post-fabrication secondary processes.

Keywords: friction stir process (FSP), Al6061 alloy, ceramic reinforcements, microstructure, microhardness

For citation: Jayalakshmi S., Arvind Singh R., Vivek Anand A., Srinivas Rao K., Konovalov S. Microstructure dependence of AL6061 surface composite on tool rotation speed during friction stir processing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 45 – 55.

Оригинальная статья

ЗАВИСИМОСТЬ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО КОМПОЗИТА AL6061 ОТ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

**С. Джаялакшми¹, Р. Арвинд Сингх¹, А. Вивек Ананд¹, К. Шринивас Рао¹,
С. Коновалов²**

¹Технологический институт им. Марри Лаксман Редди (Хайдарабад, 500043, Индийский центр исследований и инноваций)

²Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Сплавы на основе алюминия (Al) используются в аэрокосмической и автомобильной промышленности из-за их высокой удельной жесткости и удельной прочности. С целью улучшения их механических свойств изготавливают композиты, включающие керамические частицы в качестве армирующих элементов. Высокая твердость поверхности, необходимая для получения высокой износостойкости, обеспечивается изготовлением «поверхностных композитов». Обработка трением с перемешиванием (ОТП) является эффективным методом производства поверхностных композитов, поскольку, дает возможность контролировать микроструктуру, изменяя скорость вращения инструмента. В настоящей работе поверхностные композиты на основе алюминиевого сплава Al6061, содержащие микрочастицы карбида кремния и оксида алюминия, были получены методом ОТП. Поверхностные композиты изготавливались на трех скоростях вращения инструмента (600, 800, 1000 об./мин). Приводится характеристика микроструктуры композитов, а именно размера зерна в четырех различных зонах – в зоне точечной сварки (зона перемешивания), в зоне термического влияния, в зоне термомеханического воздействия и в основном металле. Микротвердость композитов измеряли в зоне точечной сварки (зоне перемешивания) и в основном металле. Твердость композитов была выше, чем у основного металла из-за рекристаллизованной микроструктуры, то есть уменьшения размера зерна и равномерного распределения керамических частиц и механизмов их упрочнения. С увеличением скорости вращения инструмента размер зерен в композитах уменьшался и, следовательно, увеличивалась их твердость, при этом на максимальной скорости вращения (1000 об./мин) размер зерен в зоне перемешивания был на порядок меньше, а твердость в три раза выше, чем у основного металла. Зависимость размера зерна (и сопутствующего увеличения твердости) от скорости вращения инструмента обеспечивает эффективный способ контроля микроструктуры и повышения твердости во время обработки поверхностных композитов, не прибегая к их дополнительной обработке после изготовления.

Ключевые слова: обработка трением с перемешиванием, сплав Al6061, керамическое армирование, микроструктура, микротвердость

Для цитирования: Джаялакшми С., Арвинд Сингх Р., Вивек Ананд А., Шринивас Рао К., Коновалов С. Зависимость микроструктуры поверхностного композита AL6061 от скорости вращения инструмента при обработке трением с перемешиванием // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 45 – 55.

Introduction

Friction stir processing (FSP) was developed based on the basic principles of friction stir welding (FSW, a solid-state joining process). Using FSP, control of microstructure can be achieved at surface/near-surface regions of processed metallic components [1, 2]. FSP involves movement of a rapidly rotating, non-consumable tool over the surface of a work piece. As the surface of a metallic material is friction stir processed, it undergoes intense plastic deformation, material mixing and experiences thermal heating owing to the friction caused by the mechanical motion of tool. These occurrences cause significant microstructural changes, such as, grain refinement, densification and homogenization of processed zone. FSP is used to produce: (i) fine-grained structure, (ii) surface alloying, (iii) surface composites (*ex situ*), and (iv) intermetallic compounds, and thereby *in situ* composites [1, 2].

FSP is a local thermo-mechanical metal-working process, which changes local properties of metallic materials, without affecting their bulk material properties. A schematic illustration of FSP is shown in Fig. 1 [3]. During FSP, a cylindrical non-consumable tool is made to rotate, and the rotating

tool is plunged into a selected area on a work piece whose surface is to be modified. Typically, a FSP tool is a pin having small diameter in dimension, and has a shoulder whose diameter is larger than that of the pin (Fig. 1).

When a tool is plunged into a metallic sheet, the rotating pin contacts the surface, and friction generated thereof between sheet material and shoulder rapidly heats a small region of metallic sheet. This also enables transverse movement of the tool over the metallic sheet. Depth of penetration of tool into metallic plate is determined by the height of pin, as penetration is restricted by its shoulder [1 – 3]. During FSP, the area of a metallic sheet to be processed and the tool are moved relative to each other, such that the rotating tool traverses with overlapping passes, until the entire selected area is processed. The processed zone cools as the tool passes, giving rise to defect free, dynamically recrystallized and equiaxed fine-grained microstructure [1 – 3]. Such beneficial changes in microstructure enhance surface mechanical properties of the processed materials. Some of the process variables of FSP include: tool plunge depth, tool rotation speed, tool transverse speed, tool tilt angle, pin geometry (i.e. length, diameter, profile of pin and shoulder), num-

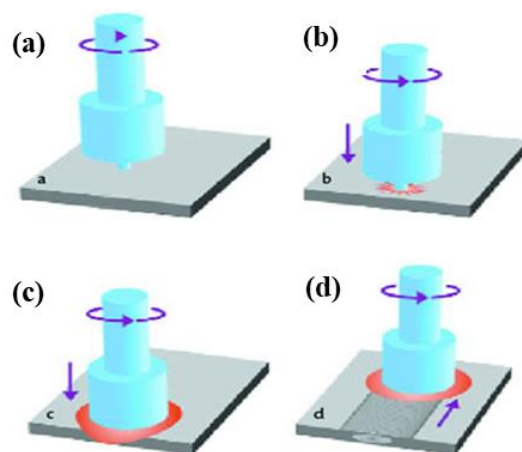


Fig. 1. Schematic illustration of friction stir processing:

a – rotating tool prior to contact with a metallic plate; *b* – rotating tool pin makes contact with the metallic plate, creating heat; *c* – shoulder makes contact, restricting further penetration into the metallic plate; *d* – metallic plate moves relative to rotating tool [3]

Рис. 1. Схематическое изображение обработки трением с перемешиванием:

a – вращающийся инструмент до контакта с металлической пластиной; *b* – вращающийся штифт инструмента контактирует с металлической пластиной, выделяя тепло; *c* – бурт соприкасается, ограничивая дальнейшее проникновение в металлическую пластину; *d* – металлическая пластина движется относительно вращающегося инструмента [3]

ber of passes of tool over surface, thermal and mechanical properties of alloy/matrix, reinforcement type, particle size, reinforcement content etc [1, 2, 4]. FSP is used to modify microstructure and mechanical properties of materials such as aluminium, magnesium, nickel, copper etc.

Aluminium, magnesium and titanium are light-weight materials, i.e. materials with lower densities. These materials have good strength-to-weight ratio. Due in part to this, they are suitable for weight-saving applications [5]. Light-weighting of structures is a major requirement in aerospace, automotive, consumer electronics and sports sectors [6, 7]. However, aluminium and its alloys are relatively soft, mainly due to their face centered cubic (f.c.c) structure, and thus have low hardness, low mechanical strength and low wear resistance [8]. Surface and bulk mechanical properties of Al materials can be improved by modification of their microstructure right during their processing stage [9]. FSP is a suitable method for surface modification of Al materials. Few examples are highlighted here. Castings of A356 Al-alloy usually contain porosity [10], which is undesirable as it reduces strength and ductility, causes lowering of corrosion resistance, and severely limits fatigue life. By friction stir processing cast A356 Al-alloy, its: (i) casting porosity can be eliminated, (ii) microstructure can be homogenized, and can be recrystallized, and made fine grained, (iii) tensile strength can be increased by 18% and (iv) ductility can be increased by 6 times [10]. FSP can also improve formability of Al alloys [10]. As an example, when 2519 aluminium plate was subjected to FSP, its formability (in terms of capability to bend without fracture) altered significantly. While the unmodified plate failed upon its bending by

30°, the friction stir processed plate could be bent even up to 80°, without cracking.

Using FSP method, surface composites of Al materials can be produced [4, 11]. Dispersion of secondary phase particles over Al metal/alloys is achieved by the stirring action of a tool. Different approaches for incorporating reinforcement particles into Al matrices during their friction stir processing include [12]: *a* – hole drilling approach: particles are filled into holes that are drilled in straight/zig-zag pattern on top of a work piece, *b* – groove filling approach: a groove is created on a work piece and filled with reinforcement particles; *c* – sandwich approach: a layer of reinforced particles is sandwiched between matrix material plates. Mechanical work by tool during preparation of surface composites breaks reinforcement particles, and the increase in number of passes provides uniform distribution of particles in matrix material [4, 10 – 12].

2. Experimental Procedure

2.1 Materials and Processing

Aluminium Al6061 plate was used as the test material. Al6061 surface composites were prepared by FSP via groove filling approach. A groove of about 2 mm width was cut on the Al6061 plate and was filled with silicon carbide (SiC, 10 μm) and alumina (Al₂O₃, 4 μm) particles taken in equal weight fraction (3 %). FSP tool was rotated continuously and was allowed to contact the metal surface over the groove filled with ceramic particles. The tool tip (i.e. plunger) was plunged into the metal for a duration of about 8 seconds. FSP was conducted at tool rotation speed (rpm) of 600 (Composite 1), 800 (Composite 2) and 1000

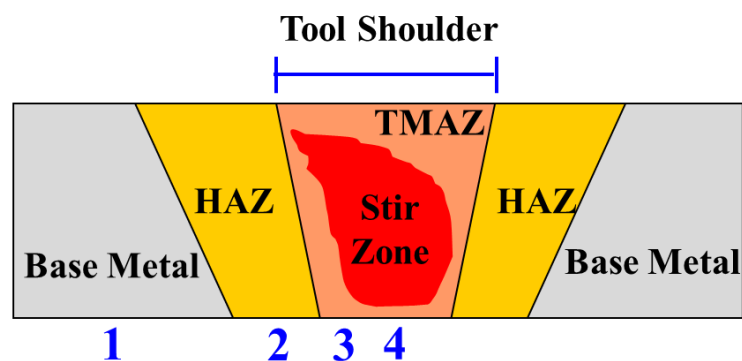


Fig. 2. Four zones observed on a metal surface after friction stir process. Left to right: (1) base metal, (2) heat affected zone (HAZ), (3) thermo-mechanically affected zone (TMAZ) and (4) nugget zone (stir zone, FSP zone)

Рис. 2. Четыре зоны, наблюдаемые на поверхности металла после сварки трением с перемешиванием. Слева направо: (1) основной металл, (2) зона термического влияния, (3) зона термомеханического воздействия и (4) зону точечной сварки (зона перемешивания, зона ОТП)

(Composite 3). Transverse speed of the tool was kept constant at 60 mm/min. Tilt angle of the tool was 2 degrees.

2.2 Microstructure and Microhardness

Surfaces of composites were polished using SiC abrasive sheets (until 3000 grit size), followed by polishing using SiC suspension, and subsequently using diamond suspension. Polished specimens were ultrasonically cleaned in an ethanol bath. Keller's reagent was used to etch the cleaned surfaces. Grain size of the etched specimens was measured using optical microscopy. Vickers microhardness test was performed on the cross-section of the specimens (stir zone and base metal) using 100 g load, for 20 s.

3. Results and Discussion

3.1 Microstructure

FSP composites have four distinct zones (see schematic, Fig. 2), namely: *i* – base metal, *ii* – heat affected zone (HAZ); *iii* – thermo-mechanically affected zone (TMAZ); *iv* – nugget zone (stir zone, FSP zone) [12 – 14]. Microstructural features observed in these four zones of the Al6061 surface composites are discussed in this section.

TMAZ is the region that is in close proximity to the stir zone (Fig. 2). In this zone, the material experiences (a) friction generated due to the mechanical motion of the tool and (b) heat arising due to the generated friction. So the name 'TMAZ'. Grain size in the TMAZ is in the range 50 μm to 70 μm (Fig. 3, d). Grain size is larger in TMAZ than that in the base metal (40 μm) which is due to the higher temperature in the region that causes grain coarsening. However, due to the mechanical work by the tool, grains undergo mechanical deformation and hence, size of some grains is found to be lower (< 70 μm , but \geq 50 μm) than that in the HAZ (70 μm , Fig. 3, c). (d) Nugget Zone (Friction Stir Processed Zone)

Nugget zone is the stir zone. Also known as FSP zone, as this is the region intended to be made into as a surface composite (Fig. 2). When compared to the other regions, stir zone experiences high plastic deformation, mechanical mixing of reinforcement particles with matrix material and generation of high temperature, followed by fast cooling [1, 2, 4, 10, 15]. Area in the zone is highly strain hardened and grains get considerably reduced in their size. In the present case, the grain size is < 25 μm (Fig. 3, e), which is 60 % smaller than that of the grains in the base metal (40 μm , Fig. 3, b).

3.1.2 Composite 2: Tool rotation speed 800 rpm

Optical images of Composite 2 are shown in Fig. 4, a. Base metal contains agglomerated and interconnected Mg_2Si secondary phase along the grain boundaries. The phase gets broken and becomes finer in size increasingly in the regions that are affected by the mechanical/shearing action of tool, as can be seen in the images of HAZ, TMAZ and nugget zone. Stir zone shows uniformly distributed secondary and reinforcement phases.

(a) Base Metal. Average grain size in bulk metal is 70 μm (Fig. 4, b), which is larger than that of the grain size in base metal of Composite 1 (600 rpm).

(b) Heat Affected Zone (HAZ)

Microstructure of the heat affected zone of Composite 2 is shown in Fig. 4, c. Grains have higher aspect ratio (i.e. length/diameter) when compared to those in the HAZ of Composite 1. Grains are found to be elongated along the transverse direction of the tool movement. Higher mechanical work and increased frictional heat generated due to the increase in rotational speed of the tool (compared to that during the formation of Composite 1, 600 rpm) causes the directionality of the grains. Grain size in the zone is in the range 50 μm to 90 μm .

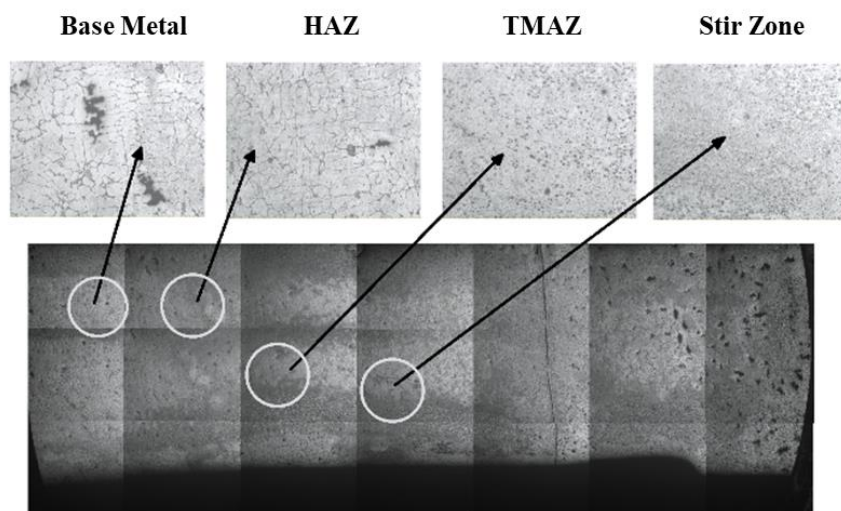


Fig. 3, a. Optical images of Composite 1 (processed at 600 rpm) showing various zones, left to right: base metal, HAZ, TMAZ and nugget zone (stir zone, FSP zone); (a) Base Metal; Average grain size in bulk metal is 40 μm (Fig. 3, b). (b) Heat Affected Zone (HAZ)

Рис. 3, a. Оптические изображения композита 1 (обработанные при 600 об./мин), показывающие различные зоны слева направо: основной металл, зона термического влияния, зона термомеханического воздействия и зону точечной сварки (зона перемешивания, зона ОТП); (a) основной металл; средний размер зерна в массивном металле составляет 40 мкм (рис. 3, b). (b) Зона термического влияния

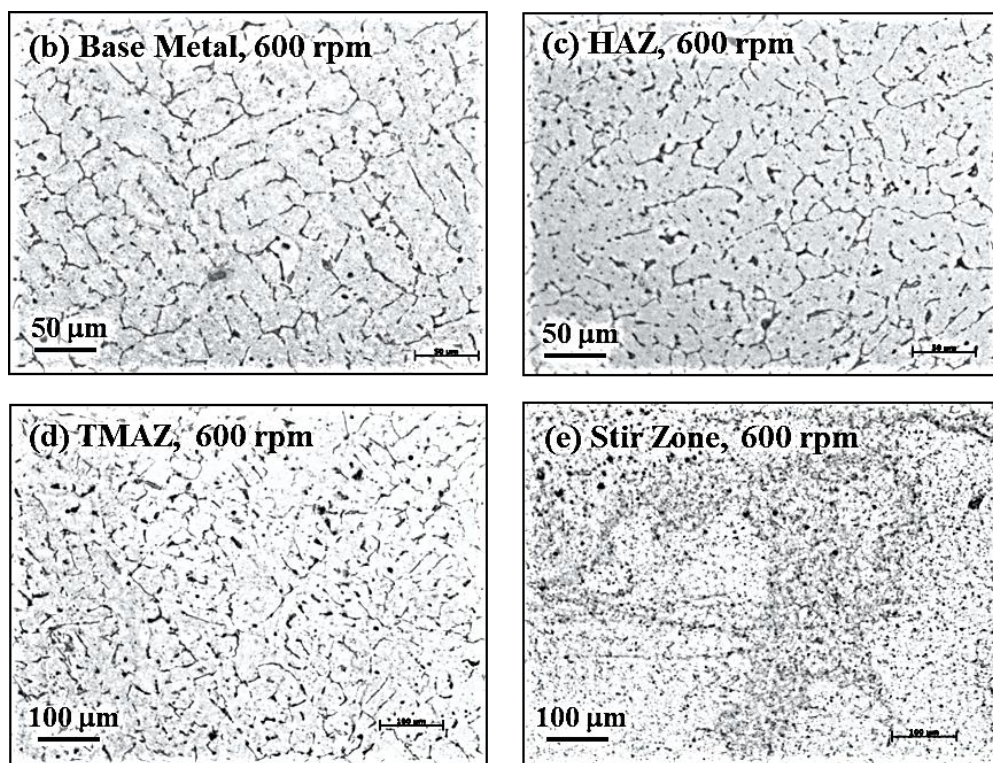


Fig. 3, b – e. Optical images taken at higher magnification of Composite 1 (processed at 600 rpm) showing various zones: (b) base metal, (c) HAZ, (d) TMAZ and (e) nugget zone (stir zone, FSP zone). (c) Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)

Рис. 3, b – e. Оптические изображения, полученные при большем увеличении композита 1 (обработанного при 600 об./мин), показывающие различные зоны:

(b) основной металл, (c) зону термического влияния, (d) зону термомеханического воздействия и (e) зону точечной сварки (зона перемешивания, зона ОТП). (c) Зона термомеханического воздействия

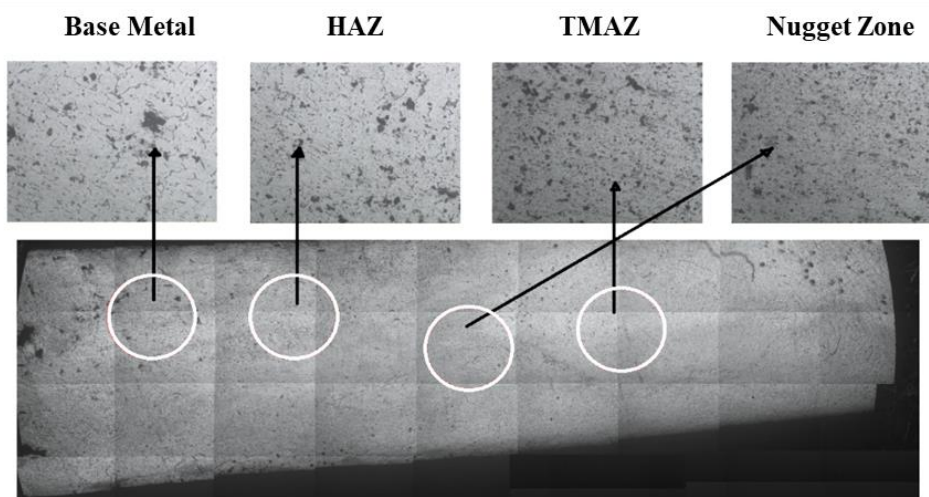


Fig. 4, *a*. Optical images of Composite 2 (processed at 800 rpm) showing various zones:

b – base metal; *c* – HAZ; *d* – TMAZ; *e* – nugget zone (stir zone, FSP zone)

Рис. 4, *a*. Оптические изображения композита 2 (обработанные при 800 об./мин) с различными зонами: *b* – основной металл; *c* – зона термического влияния; *d* – зона термомеханического воздействия; *e* – зона точечной сварки (зона перемешивания, зона ОТП)

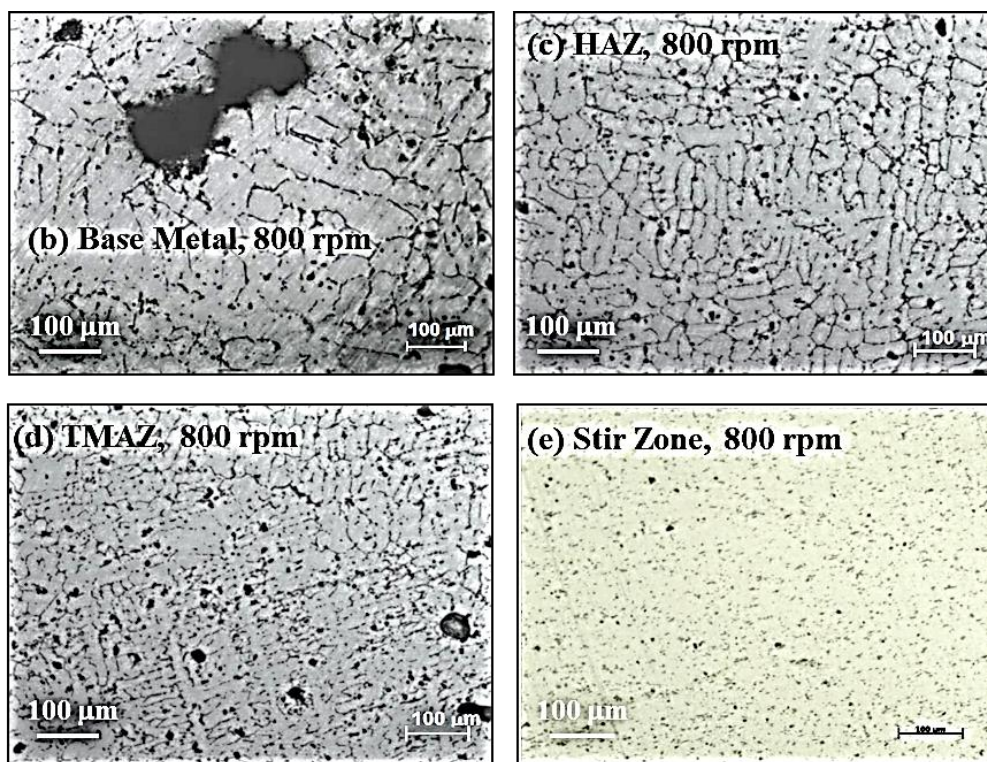


Fig. 4, *b-e*. Optical images taken at higher magnification of Composite 2 (processed at 800 rpm) showing various zones:

b – base metal; *c* – HAZ; *d* – TMAZ; *e* – nugget zone (stir zone, FSP zone)

Рис. 4, *b-e* Оптические изображения, полученные при большем увеличении композита 2 (обработанные при 800 об./мин), показывающие различные зоны: *b* – основной металл; *c* – зона термического влияния; *d* – зона термомеханического воздействия; *e* – зона точечной сварки (зона перемешивания, зона ОТП)

(c) Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)

Grain size in the TMAZ is in the range 40 μm to 70 μm (Fig. 4, *d*). Higher thermal input and severe plastic deformation brought forth by the increase in tool speed (compared to that during the formation of

Composite 1, 600 rpm), followed by faster cooling, produces relatively narrower grains.

(d) Nugget Zone (Friction Stir Processed Zone)

Microstructure of the nugget zone of Composite 2 is shown in Fig. 4, *e*. Grains have undergone re-

finement and their size is $< 20 \mu\text{m}$, which is slightly smaller than that of the grains in the nugget zone of Composite 1 ($< 25 \mu\text{m}$, Fig. 3, *e*).

3.1.3 Composite 3: Tool rotation speed 1000 rpm

Optical images of Composite 3 are shown in Fig. 5, *a*.

(a) Base Metal

Average grain size in bulk metal is $100 \mu\text{m}$ (Fig. 5, *b*), which is larger than that of the grain size in base metal of Composite 2 (600 rpm). Increase in size of grains in base metal with increase in tool speed has been reported earlier [16, 17], which is attributed to high temperature that causes grain coarsening. Second phase particles (Mg_2Si) are seen distributed along the grain boundaries.

(b) Heat Affected Zone (HAZ)

Microstructure of the heat affected zone of Composite 3 is shown in Fig. 5, *c*. Grain size in the zone is in the range 60 to $80 \mu\text{m}$, which is a narrower range when compared to that of the range of the grain size in the HAZ of Composite 2 ($50 \mu\text{m}$ to $90 \mu\text{m}$, Fig. 4, *c*).

(c) Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)

Average grain size in the TMAZ is about $60 \mu\text{m}$. Grains are found to be elongated along the transverse direction of the tool motion.

(d) Nugget Zone (Friction Stir Processed Zone)

Microstructure of the nugget zone of Composite 3 is shown in Fig. 5, *e*. Grains have undergone significant grain refinement (grain size $< 10 \mu\text{m}$). Grain size is lower by one order of magnitude compared to the size of grains in the base metal ($100 \mu\text{m}$, Fig. 5, *b*). Second phase and reinforcement particles have become finer in size due to their shearing caused by mechanical work of tool [11, 18], and they are uniformly distributed due to the stirring motion of tool [4, 14, 18].

Measured grain size at the four distinct zones of Al6061 surface composites are given in Table 1.

3.2 Microhardness

Microhardness values of base metal and stir zone of the surface composites as a function of tool rotation speed (rpm) is shown in Fig. 6. Trends show that with the increase in tool rotation speed (*a*) hardness of base metal decreases and (*b*) hardness in stir zone increases. In the range of the tool speed considered in the present work, at the highest speed (1000 rpm), the hardness in stir zone is (*a*) 3 times higher than that of base metal and (*b*) 1.8 times higher than that in stir zone of the composite processed at the lowest speed (600 rpm).

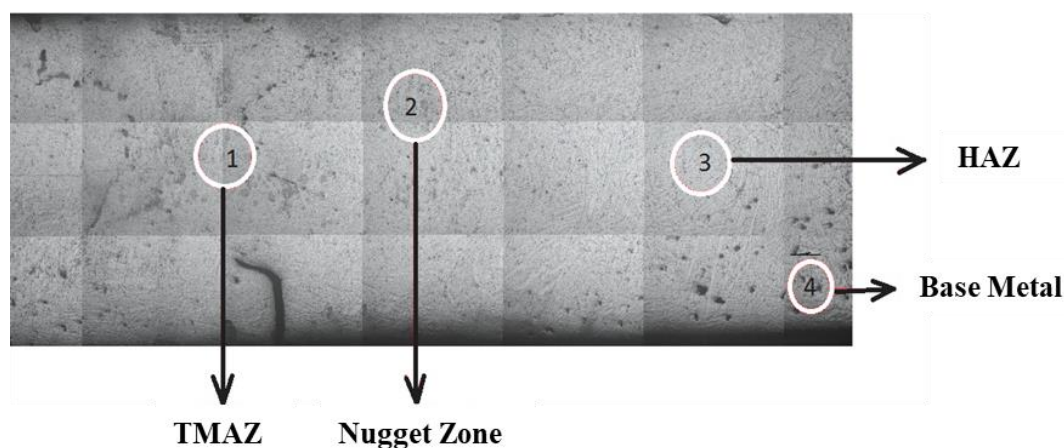


Fig. 5, *a*. Optical images of Composite 3 (processed at 1000 rpm) showing various zones:
b – base metal; *c* – HAZ; *d* – TMAZ; *e* – nugget zone (stir zone, FSP zone)

Рис. 5, *a*. Оптические изображения композита 3 (обработанные при 1000 об./мин), показывающие различные зоны:
b – основной металл; *b* – зона термического влияния; *d* – зона термомеханического воздействия; *e* – зона точечной сварки
 (зона перемешивания, зона ОТП)

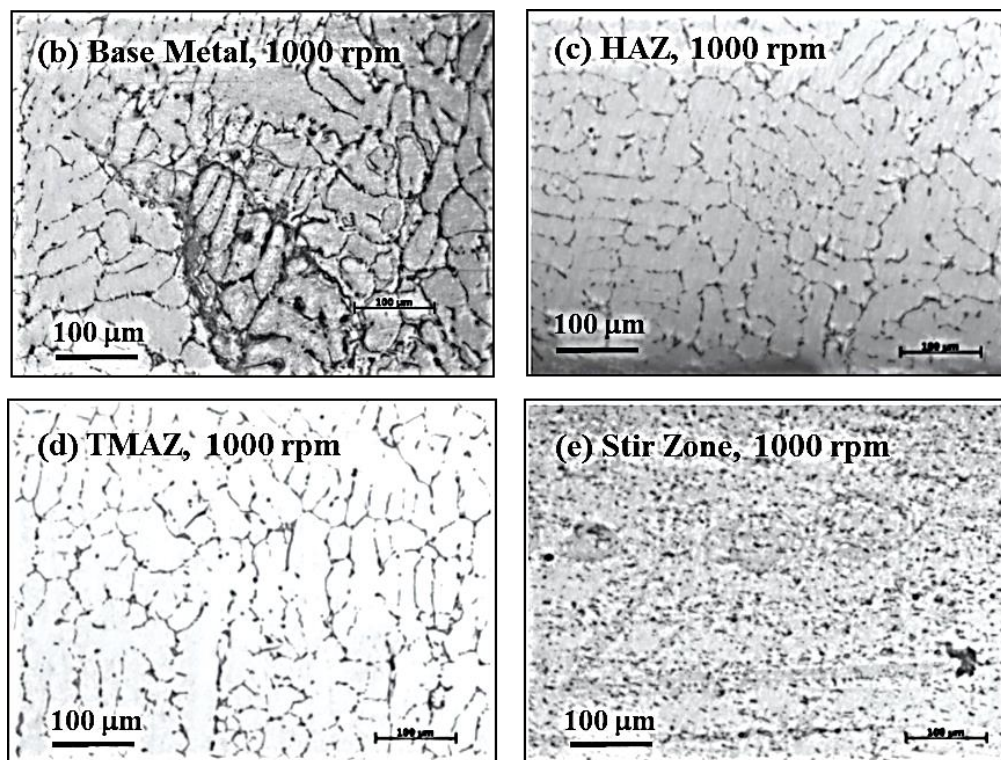


Fig. 5, *b–e*. Optical images taken at higher magnification of Composite 3 (processed at 1000 rpm) showing various zones: *b* – base metal; *c* – HAZ; *d* – TMAZ; *e* – nugget zone (stir zone, FSP zone)

Рис. 5, *b–e*. Оптические изображения, полученные при большем увеличении композита 3 (обработка при 1000 об./мин), на которых видны различные зоны: *b* – основной металл; *c* – зона термического влияния; *d* – зона термомеханического воздействия; *e* – зона точечной сварки (зона перемешивания, зона ОТП)

In Al6061 alloy, Mg_2Si is the secondary phase that increases hardness and strength of the alloy, when compared to pure Al. As the alloy is friction stir processed, high heat is generated at stir zone due to frictional heating and plastic deformation. During the processing of Al6061 surface composites, extraction of heat by the bulk of the alloy at the vicinity of tool contact causes a rise in temperature in the base metal. Consequently, (a) grain size in the base metal increases and (b) partial dissolution of the secondary phase occurs [11]. Together, these two occurrences result in the decrease in hardness value of the base metal. With increase in tool rotation speed, grain size increases further, causing

further decrease in hardness values of the base metal (Fig. 6).

Considering grain size (Table) and hardness values at stir zone (Fig. 6), it is seen that (a) hardness is inversely dependent on grain size and (b) increase in tool rotation speed decreases grain size that eventually increases hardness.

Surface composites show high hardness in stir zone due to (a) presence of inherently hard SiC and Al_2O_3 ceramic particles and (b) grain refinement. Friction stir processing of Al6061 alloy to form surface composites gives rise to:

i – uniform distribution of ceramic particles in stir zone, which act as heterogenous sites for grain nucleation;

Measured grain size in Al6061 surface composites (Composite 1 – 600 rpm, Composite 2 – 800 rpm and Composite 3 – 1000 rpm)

Измеренный размер зерна в поверхностных композитах Al6061 (композит 1 – 600 об./мин, композит 2 – 800 об./мин и композит 3 – 1000 об./мин)

Tool Speed, rpm	Grain Size, μm			
	Base Metal	Heat Affected Zone (HAZ)	Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)	Stir Zone (SZ) or Nugget Zone
600	40	70	50 to 70	< 25
800	70	50–70	50–90	< 20
1000	100	60–80	60	< 10 (Very Fine)

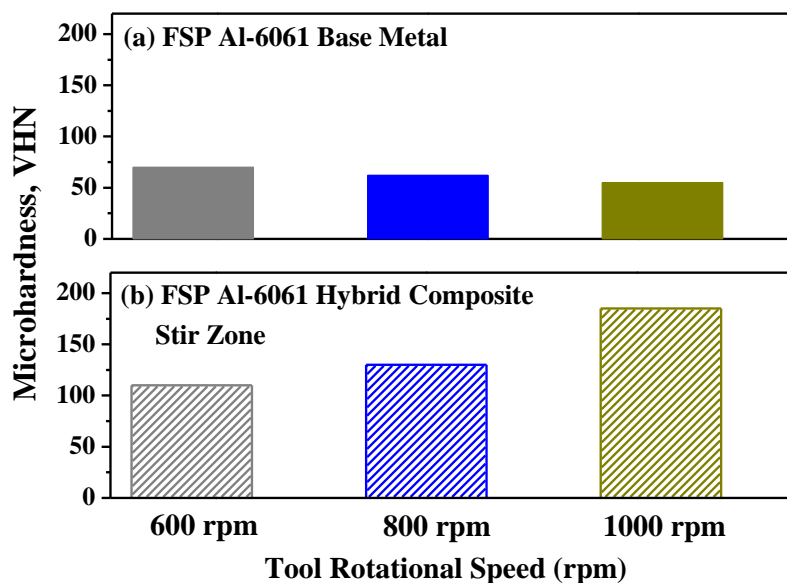


Fig. 6. Microhardness values of (a) base metal and (b) stir zone of the surface composites as a function of tool rotation speed (rpm)

Рис. 6. Значения микротвердости основного металла (a) и зоны перемешивания (b) поверхностных композитов в зависимости от скорости вращения инструмента (об./мин)

ii – higher heat extraction and severe plastic deformation at stir zone. This aids in nucleation of fine grains at the stir zone, resulting in dynamically recrystallized microstructure;

iii – breakdown in size of Mg_2Si secondary phase network;

iv – high heat generation at stir zone that enhances binding of reinforcement with matrix;

v – Orowan strengthening: hard ceramic particles obstruct dislocation motion during deformation (i.e. strain hardening) [19].

By increasing hardness of composites, their wear resistance can be increased, as wear of a material is inversely related to its hardness, as according to Archard's law [20].

Processing of Al–Mg alloys/composites by conventional liquid-state methods (e.g. stir casting), fusion techniques (e.g. thermal spraying), laser surface modification has certain disadvantages, namely (a) porosity and (b) formation of brittle Al_4C_3 phase due to interaction of SiC with molten Al. Both these occurrences are undesirable, as they adversely affect mechanical properties of materials. In FSP, (a) porosity is absent/eliminated and (b) extraction of heat from processing zone by the surrounding region is fast, and thereby the interaction time is less, and as a result undesirable phases (e.g. Al_4C_3) do not form [21].

Conclusions

Al6061 surface composites containing SiC and Al_2O_3 microparticles were fabricated by friction stir processing method, at three tool rotation speeds (rpm: 600, 800, 1000). Composites were

characterized for their grain size and hardness. Conclusions that could be drawn from the work are:

FSP is an effective method to produce surface composites;

rotational speed of tool influences microstructure that consequently alters hardness;

increase in tool rotation speed reduces grain size at stir zone, attributed to (a) dynamically recrystallized microstructure and (b) reinforcement particles acting as grain nucleation sites;

microhardness at stir zone increases with increase in tool speed, due to: (a) grain refinement and (ii) Orowan strengthening.

It is expected that reduced grain size and enhanced surface hardness would provide better wear resistance to the processed materials.

REFERENCES

1. Ma Z.Y. Friction Stir Processing Technology: A Review // Metallurgical and Materials Transactions A. 2008. Vol. 39. No. 3. P. 642–658.
2. Zykova A.P., Tarasov S.Y., Chumaevski A.V., Kolubaev E.A. A Review of Friction Stir Processing of Structural Metallic Materials // Process, Properties, and Methods, Metals. 2020. Vol. 10. No. 772. P. 1–40.
3. Available at URL: <http://www.industrialheating.com/articles/84092-friction-stir-processing-creates-aluminum-alloy-superplasticity> (accessed: 09.02.2022).
4. Butola R., Pandit D., Pratap C., Chandra P. Two decades of friction stir processing—a review of advancements in composite fabrication //

- Journal of Adhesion Science and Technology. 2022. Vol. 36. No. 8. P. 795–832.
5. Ceschini L., Gupta M., Morri A., Jarfors A., Jayalakshmi S., Arvind Singh R., Rotundo F., Toschi S. *Aluminium and Magnesium Metal Matrix Nanocomposites*, Springer Nature Singapore, Singapore, 2016.
 6. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys // *Materials & Design*. 2014. No. 56. P. 862–871.
 7. Cole G.S., Sherman A.M. Light weight materials for automotive applications // *Materials Characterization*. 1995. No. 35. P. 3–9.
 8. Polmear I.J. *Light alloys: Metallurgy of the Light Metals*, Wiley New York, 1995.
 9. Dong H. *Surface Engineering of Light Alloys*, CRC Press, Woodhead Publishing Limited, 2010.
 10. Mahoney M.W., Lynch S.P. *Friction-Stir Processing Technical Report*, Rockwell Scientific Company LLC, Thousand Oaks, California, US. 2006.
 11. Kumar M., Prasanth R., Selvakumar B., Ranjith V. A review on friction stir processing of Al6061 surface composites // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2128. Article 020031. P. 1–10.
 12. Sagar P., Handa A. A comprehensive review of recent progress in fabrication of magnesium base composites by friction stir processing technique – A review // *AIMS Materials Science*. 2020. Vol. 7. No. 5. P. 684–704.
 13. Kurt A., Uygur I., Cete E. Surface modification of aluminum by friction stir processing // *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211. No. 3. P. 313–317.
 14. Bodunrina M.O., Alanemea K.K., Chown L.H. Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics // *Journal of Materials Research & Technology*. 2015. Vol. 4. No. 4. P. 434–445.
 15. Smith C.B., Mishra R.S. *Friction Stir Processing for Enhanced Low Temperature Formability*, Butterworth-Heinemann, Boston, USA. 2014.
 16. Zhao H., Pan Q., Qin Q., Wu Y., Su X. Effect of the processing parameters of friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of 6063 aluminum alloy // *Materials Science and Engineering A*. 2019. No. 751. P. 70–79.
 17. Abrahams R., Mikhail J., Fasihi P. Effect of friction stir process parameters on the mechanical properties of 5005-H34 and 7075-T651 aluminium alloys // *Materials Science and Engineering A*. 2019. No. 751. P. 363–373.
 18. Aruri D., Kumar A., Kotiveerachary B. Effect of III-Pass on Microstructure, Micro Hardness and Static Immersion Corrosion Resistance of AA6061–T6/SiCp Surface Composite Fabricated by Friction Stir Processing // *International Journal of Applied Research In Mechanical Engineering (IJARME)*. 2012. Vol. 1. No. 3. P. 152–156.
 19. Dieter G.E. *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, SI Metric Edition, USA. 1988.
 20. Bowden F.P., Tabor D. *The Friction and Lubrication of Solids*. Clarendon Press, Oxford, UK. 1950. P. 90–121.
 21. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // *Materials Science and Engineering R*. 2005. No. 50. P. 1–78.
- СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**
1. Ma Z.Y. Friction Stir Processing Technology: A Review. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2008, vol. 39, no. 3, pp. 642–658.
 2. Zykova A.P., Tarasov S.Y., Chumaevski A.V., Kolubaev E.A. A Review of Friction Stir Processing of Structural Metallic Materials. *Process, Properties, and Methods, Metals*. 2020, vol. 10, no. 772, pp. 1–40.
 3. Available at URL: <http://www.industrialheating.com/articles/84092-friction-stir-processing-creates-aluminum-alloy-superplasticity> (accessed: 09.02.2022).
 4. Butola R., Pandit D., Pratap C., Chandra P. Two decades of friction stir processing—a review of advancements in composite fabrication. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2022, vol. 36, no. 8, pp. 795–832.
 5. Ceschini L., Gupta M., Morri A., Jarfors A., Jayalakshmi S., Arvind Singh R., Rotundo F., Toschi S. *Aluminium and Magnesium Metal Matrix Nanocomposites*, Springer Nature Singapore, Singapore, 2016.
 6. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials & Design*. 2014, no. 56, pp. 862–871.
 7. Cole G.S., Sherman A.M. Light weight materials for automotive applications. *Materials Characterization*. 1995, no. 35, pp. 3–9.
 8. Polmear I.J. *Light alloys: Metallurgy of the Light Metals*, Wiley New York, 1995.
 9. Dong H. *Surface Engineering of Light Alloys*, CRC Press, Woodhead Publishing Limited, 2010.
 10. Mahoney M.W., Lynch S.P. *Friction-Stir Processing Technical Report*, Rockwell Scientific Company LLC, Thousand Oaks, California, US, 2006.
 11. Kumar M., Prasanth R., Selvakumar B., Ranjith V. A review on friction stir processing of Al6061 surface composites. *AIP Conference*

- Proceedings*. 2019, vol. 2128, article 020031, pp. 1–10.
12. Sagar P., Handa A. A comprehensive review of recent progress in fabrication of magnesium base composites by friction stir processing technique – A review. *AIMS Materials Science*. 2020, vol. 7, no. 5, pp. 684–704.
 13. Kurt A., Uygur I., Cete E. Surface modification of aluminum by friction stir processing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, no. 3, pp. 313–317.
 14. Bodunrina M.O., Alanemea K.K., Chown L.H. Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics. *Journal of Materials Research & Technology*. 2015, vol. 4, no. 4, pp. 434–445.
 15. Smith C.B., Mishra R.S. *Friction Stir Processing for Enhanced Low Temperature Formability*, Butterworth-Heinemann, Boston, USA, 2014.
 16. Zhao H., Pan Q., Qin Q., Wu Y., Su X. Effect of the processing parameters of friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of 6063 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2019, no. 751, pp. 70–79.
 17. Abrahams R., Mikhail J., Fasihi P. Effect of friction stir process parameters on the mechanical properties of 5005-H34 and 7075-T651 aluminium alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2019, no. 751, pp. 363–373.
 18. Aruri D., Kumar A., Kotiveerachary B. Effect of III-Pass on Microstructure, Micro Hardness and Static Immersion Corrosion Resistance of AA6061-T6/SiCp Surface Composite Fabricated by Friction Stir Processing. *International Journal of Applied Research In Mechanical Engineering (IJARME)*. 2012, vol. 1, no. 3, pp. 152–156.
 19. Dieter G.E. *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, SI Metric Edition, USA, 1988.
 20. Bowden F.P., Tabor D. *The Friction and Lubrication of Solids*. Clarendon Press, Oxford, UK. 1950, pp. 90–121.
 21. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R*. 2005, no. 50, pp. 1–78.

Information about the authors

S. Jayalakshmi, PhD, MLR Institute of Technology
R. Arvind Singh, PhD, MLR Institute of Technology
A. Vivek Anand, PhD, MLR Institute of Technology
K. Srinivas Rao, PhD, MLR Institute of Technology
S. Kononov, PhD, Siberian State Industrial University

Сведения об авторах

С. Джаялакшми, профессор, Технологический институт им. Марри Лаксман Редди
Р. Арвинд Сингх, профессор, Технологический институт им. Марри Лаксман Редди
А. Вивек Ананд, профессор, Технологический институт им. Марри Лаксман Редди
К. Шринивас Рао, профессор, Технологический институт им. Марри Лаксман Редди
С. Коновалов, профессор, Сибирский государственный индустриальный университет

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Received 31.08.2022

Revised 09.09.2022

Accepted 14.09.2022

Поступила в редакцию 31.08.2022

После доработки 09.09.2022

Принята к публикации 14.09.2022

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Оригинальная статья

УДК 338.012

ИННОВАЦИОННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИНСТРУМЕНТАРИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Н. В. Перекрест¹, А. А. Перекрест²

¹ООО «БизнесФорвард» (Россия, 654005, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 11)

²ООО «Шахта «Юбилейная» (Россия, 654000, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Гидрошахта разъезд, 1)

Аннотация. Приведена характеристика инновационной составляющей инструментария устойчивого развития горнодобывающего предприятия. Рассмотрены специфические отраслевые особенности, определены возможные отраслевые риски, особенности и типы инноваций в горной промышленности. В силу специфики работы предложено дополнить оценку устойчивого развития предприятия интегральным показателем инновационной устойчивости, сформированы основные показатели, влияющие на инновационную устойчивость.

Ключевые слова: инновации, инновационная устойчивость, инструментарий устойчивого развития, горнодобывающая промышленность

Для цитирования: Перекрест Н.В., Перекрест А.А. Инновационная составляющая инструментария устойчивого развития горнодобывающего предприятия // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 56 – 62.

Original article

INNOVATIVE COMPONENT OF THE TOOLS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF A MINING ENTERPRISE

N. V. Perekrest¹, A. A. Perekrest²

¹LLC "Businessforward" (11, Ordzhonikidze str., Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, 654005, Russian Federation)

²LLC "Valta "Jubilee" (1 Gidroshakhta razazd, Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, 654000, Russian Federation)

Abstract. The characteristic of the innovative component of the tools for the sustainable development of a mining enterprise is given. The specific industry features are considered, possible industry risks, features and types of innovations in the mining industry are determined. Due to the specifics of the work, it is proposed to supplement the assessment of the sustainable development of the enterprise with an integral indicator of innovation sustainability, the main indicators affecting innovation sustainability are formed.

Keywords: innovation, innovative sustainability, tools for sustainable development, mining industry

For citation: Perekrest N.V., Perekrest A.A. Innovative component of the tools for sustainable development of a mining enterprise. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 56 – 62. (In Russ.).

Введение

В условиях жестких санкций, направленных на экономику России, огромное значение имеет способность любого предприятия не только сохранять, но и повышать уровень своего устойчивого развития. Немаловажным это становится, в первую очередь, для тех секторов экономики (горнодобывающий сектор), на которые приходится наибольшая доля валового внутреннего продукта (ВВП) страны. В связи с этим на микро-уровне становится логичным выбор наиболее эффективных направлений развития и достижения более высоких темпов экономической устойчивости в целях рыночной целесообразности. Все это определяет актуальность выявления не только финансовых, социальных и прочих проблем, но и инновационных проблем экономического развития горнодобывающего предприятия, совершенствования инструментария устойчивого развития организации (инновационного индикатора, а также более тщательного изучения теоретических и прикладных вопросов).

Основные подходы и методы организации и управления инновационным развитием экономики подробно отражены в работе [1]. В работе [2] освещаются актуальные вопросы региональной инновационной политики в современных условиях. В работе [3] обозначены основные индикаторы оценки уровня инновационного развития предприятий горнодобывающего сектора, приводящиеся в рамках Российской статистической отчетности, которые не могут давать достаточно объективную оценку из-за завышения показателей самими предприятиями. Становится очевидным, что необходимо совершенствовать инструменты инновационного развития предприятия.

В работе [4] рассматривают инновационные инструменты, основываясь на которых предприятие реализует свой инновационный потенциал. Технологический инновационный инструмента-

рий (социальный, маркетинговый) эффективен при должной реализации.

В работах [5], [6] для расчета интегрального показателя уровня инновационного развития предлагают использование разных показателей, некоторые из них используют метод кластерного анализа.

Неоднозначность взглядов ученых в инновационной составляющей деятельности предприятия обуславливает необходимость глубокого исследования, формулировки его цели и задач.

Цель настоящей работы – раскрыть инновационный аспект инструментария устойчивого развития предприятия горнодобывающей промышленности.

Задачи исследования следующие:

- раскрыть отраслевые особенности горнодобывающей промышленности для определения главных компонентов инновационных систем;
- показать риски горнодобывающей промышленности для определения уровня значимости инновационной деятельности предприятия;
- провести типизацию инноваций в горнодобывающей отрасли для отбора необходимых групп и показателей в них;
- предложить индикатор инновационной устойчивости горнодобывающего предприятия в целях совершенствования инструментария устойчивого развития горнодобывающего предприятия.

Отраслевые особенности горнодобывающей промышленности

Горнодобывающая отрасль вносит значительный вклад в устойчивое развитие как регионов, так и страны в целом, имея самые высокие показатели доходности среди четверки основных секторов российской экономики (горнодобывающий, нефтегазовый, металлургический, банковский).

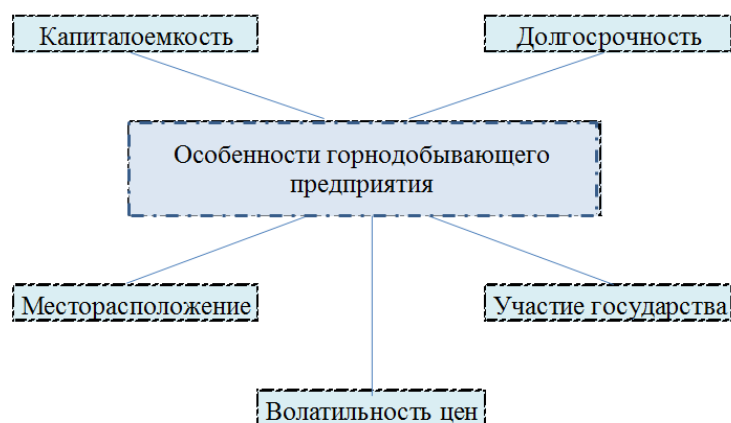


Рис. 1. Отраслевые особенности горнодобывающей промышленности
Fig. 1. Sectoral features of the mining industry

Для верной оценки результатов деятельности предприятия рассматриваемой отрасли, а также для качественных будущих принимаемых управленческих решений, необходимо рассматривать устойчивое развитие горнодобывающего предприятия с учетом специфических отраслевых особенностей (рис. 1).

Долгосрочность проявляется в длительности процесса разработки месторождения. Концентрация производства определяется местом расположения геологических запасов. Прямое и косвенное участие государства заключается в государственном финансировании (субсидии), государственном контроле.

Если отдача от масштаба горнодобывающей промышленности велика, то в периоды повышения цен на ресурсы объем производства должен сокращаться (волатильности цен). При падении этих цен соответствующий объем роста не наблюдается. В результате конкурентоспособность предприятий снижается.

Кузбасс – крупнейший центр угледобычи в России, который в настоящее время под натиском внешних неблагоприятных факторов предпринимает попытки «инновационного реформирования» угольного бизнеса [7].

На территории Кузбасса ежегодно добывается более 60 % от всего объема добычи угля в России. Кузнецкий угольный бассейн является самым крупным месторождением в России (рис. 2).

Риски горнодобывающая промышленность

Так как горнодобывающая промышленность (угольная) является одной из ведущих, перспективных и важных отраслей мировой экономики, то необходимо определить возможные отраслевые риски, способные отрицательно повлиять на степень устойчивости предприятия в его развитии:

- высокая зависимость от экспортных поставок (согласно данным Сибирского таможенного управления Кемеровская область отгрузила на экспорт в 2020 г. в количестве более 94 млн. т угля; лидерами по экспорту угля стали Республика Корея, Япония, Турция, Китай, Германия, Нидерланды и Марокко);

- высокая концентрация производства на территории области (на 01.01.2022 г. в Кузбассе зарегистрировано 152 угледобывающих и перерабатывающих предприятий – 39 шахт, 57 разрезов, 56 обогатительных фабрик и установок);

- высокий уровень физического износа оборудования, его морального устаревания (в том

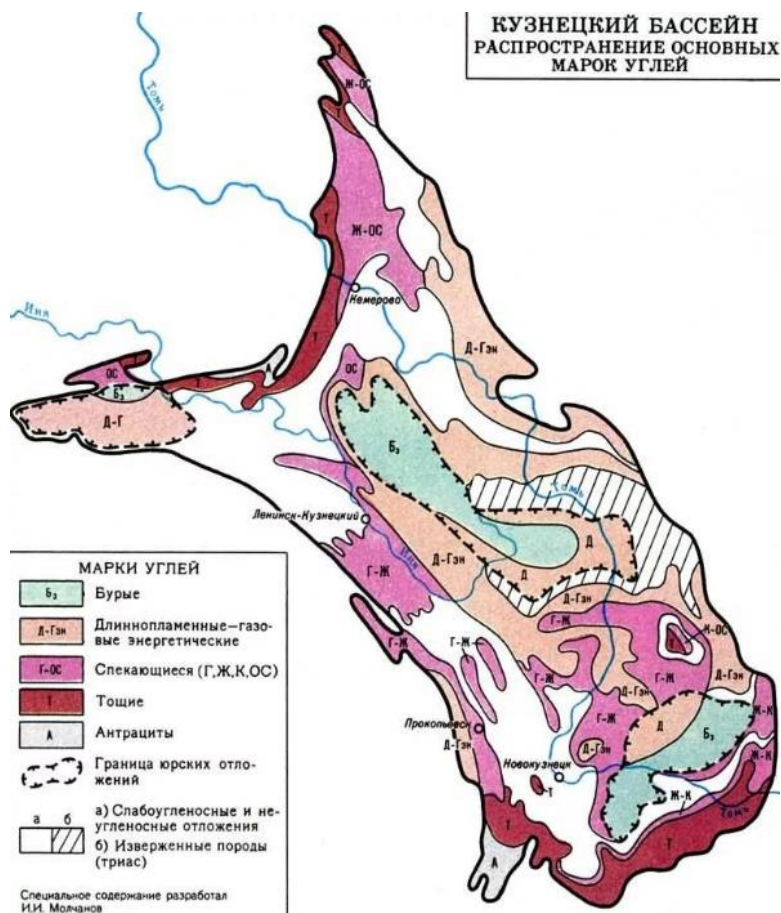


Рис. 2. Схема Кузнецкого бассейна
Fig. 2. The scheme of the Kuznetsk basin

числе горной техники и оборудования);

- высококвалифицированный кадровый дефицит, в том числе для реализации новых проектов;

- низкая инвестиционная активность;

- неэкологичность угля относительно других видов топлива.

Перечисленные риски обуславливают значимость инновационного направления развития, инновационная деятельность становится необходимой для повышения рентабельности, производительности и конкурентоспособности. Инновация становится движущим фактором развития горной отрасли, которую необходимо рассматривать как один из индикаторов устойчивого развития добывающего предприятия.

Отличительные особенности инноваций в горнодобывающую промышленность определяют цели их внедрения (рис. 3).

Главными компонентами инновационных систем выступают технологические, научные и научно-технические, социально-организационные, управленческие, а также когнитивные новшества, воплощенные в научных знаниях, изобретениях, ноу-хау и различных материальных носителях [8].

Возникая на всех стадиях воспроизводственного цикла, инновации различаются по типологии, происхождению, назначению, степени новизны, предметно-содержательной структуре, по уровню распространения и воздействию на экономические процессы.

Типизация инноваций в горнодобывающей отрасли

Рассмотрим инновации как современный, необходимый индикатор (наряду с социальным, экономическим, экологическим и технологическим показателями) устойчивого развития горнодобывающего предприятия.

Группа экономических инноваций подразделяется на технологические, маркетинговые, организационные, финансовые, логистические и экологические подгруппы [9].

Под воздействием технологических инноваций происходит создание нового продукта или технологии. Они способствуют повышению эффективности экономики и создают предпосылок для устойчивого развития предприятия.

Технологические инновации горной промышленности процессные, направлены на освоение технологически новых или значительно усовершенствованных производственных методов.



Рис. 3. Особенности и цели внедрения инноваций
Fig. 3. Features and objectives of innovation

Организационные инновации на горнодобывающих предприятиях проводят по следующим направлениям:

- разработка и реализация новой или значительно измененной корпоративной стратегии;
- внедрение современных методов управления организацией, обеспечивающих приведение уровня цифровизации к современному;
- разработка новых или значительно измененных методов и приемов организации труда и отдыха в организации;
- создание специализированных подразделений по проведению научных исследований и разработок, практической реализации научно-технических достижений (технологические и инжиниринговые центры, малые инновационные предприятия).

Среди маркетинговых инноваций горнодобывающего предприятия уместно выделить новые рынки, которые представляют новые группы потребителей продуктов.

Финансовые инновации предприятия отрасли направлены на создание универсальных схем управления денежными средствами и потоками, новых форм отчетности, форм и способов учета денежной массы.

В силу своей специфики работы горнодобывающие предприятия не могут полностью исключить антропогенное воздействие на окружающую среду, их деятельность будет приводить к нарушению земной поверхности, а значит к полному уничтожению экосистемы в зоне добычи полезных ископаемых и частичному уничтожению на прилегающих территориях.

Задача горных комбинатов заключается в выстраивании своей работы таким образом, чтобы при максимальной эффективности минимизировать ущерб, наносимый окружающей среде. Для этого необходимо, чтобы предприятие было готово инновационно развиваться (материальную и финансовую ресурсоемкость) [10].

Экологические инновации направлены на разработку долгосрочных природоохранных проектов, ориентированных на внедрение на предприятии наилучших доступных технологий, снижение негативного воздействия на окружающую среду и восстановление экосистем, разработку системы экологического менеджмента.

Индикатор инновационной устойчивости горнодобывающего предприятия

При оценке уровня устойчивого развития горнодобывающего предприятия необходимо включить в расчет интегральный показатель инновационной устойчивости:

$$Y_{ур} = \sqrt[5]{Y_{эк} Y_{соц} Y_{эко} Y_{тех} Y_{ин}}$$

где $Y_{эк}$, $Y_{соц}$, $Y_{эко}$, $Y_{тех}$ и $Y_{ин}$ – интегральный показатель экономической, социальной, экологической, технологической и инновационной устойчивостей.

В таблице представлены наиболее существенные показатели, характеризующие инновационную устойчивость горнодобывающего предприятия.

Подсчет итоговых показателей нужно проводить путем приписывания баллов каждому из них в зависимости от важности в экономической деятельности предприятия.

В конечном итоге рассчитывается интегральный показатель уровня инновационной устойчивости.

Выводы

Расчет предложенного интегрального показателя инновационной устойчивости позволит не только оценить уровень инновационного развития горнодобывающего предприятия, но и уточнить показатель общей устойчивости его развития.

Кроме того, с помощью этих показателей можно не только сравнивать динамику изменения уровня устойчивого инновационного развития одного горнодобывающего предприятия, но и сравнивать между собой показатели предприятий горной отрасли.

Инновации имеют большое значение в экономике горнодобывающего предприятия на микро- и макроуровнях. Процессы внедрения и использования инноваций должны постоянно контролироваться и подвергаться с использованием соответствующих индикаторов. Это обеспечит рост эффективности экономической деятельности горнодобывающего предприятия и укрепит его устойчивое развитие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анискин Ю.П. Управление инновациями в системе управления инновационным развитием предприятия. Москва: Омега-Л, 2019. 411 с.
2. Букреев А.М., Сироткина Н.В., Кулакова А.Е. Региональная инновационная политика. Проблемы разработки и реализации // Экономика и предпринимательство. 2020. № 2 (115). С. 570–572.
3. Жаров В.С., Цукерман В.А. Оценка уровня инновационной деятельности горных предприятий // ГИАБ. 2011. № 10. С. 293–301.
4. Хнырева Ю.В. Типы инструментария инновационного потенциала предприятия и необходимость их совокупного использования // Studium. 2015. № 1 (34). С. 60–67.

Показатели инновационной устойчивости горнодобывающего предприятия
Indicators of innovative sustainability of a mining enterprise

Показатель	Способ расчета
Доля внутренних затрат на НИОКР и приобретение технологий в общих затратах	Отношение суммы затрат на НИОКР и на приобретение технологий к сумме затрат на производство
Обеспеченность предприятия интеллектуальной собственностью	Отношение стоимости нематериальных активов к стоимости вне оборотных активов
Доля затрат на повышение квалификации и обучение кадров в общем объеме затрат на НИОКР	Отношение затрат на повышение квалификации кадров к затратам на НИОКР
Доля государственного финансирования НИОКР	Отношение суммы государственного финансирования НИОКР к сумме затрат предприятия на НИОКР
Уровень заработной платы научно-технических специалистов	Отношение средней заработной платы научно-технических специалистов к средней заработной плате по предприятию
Уровень модернизации оборудования	Отношение среднегодовой стоимости модернизированного оборудования к среднегодовой стоимости оборудования
Коэффициент освоения новой техники	Отношение стоимости основных производственных фондов на начало периода к среднегодовой стоимости ОПФ
Доля затрат на информационную деятельность	Отношение затрат на информационную деятельность к сумме затрат на НИОКР

- Глинский В.В., Серга Л.К., Зайков К.А. Оценка инновационного потенциала территории: пространственно-динамический подход // Идеи и идеалы. 2016. № 2 (28). С. 62–74.
- Яшин С.Н., Солдатова Ю.С. Оценка устойчивости инновационного развития предприятий // Финансы и кредит. 2012. № 32 (512). С. 9–17.
- Фридман Ю.А., Логинова Е.Ю., Речко Г.Н. Управление инновационным развитием угольной отрасли в контексте экономической защищенности Кузбасса. В кн.: Проблемы инновационного управления экономикой регионов Сибири. Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2015. С. 70–81.
- Малахова Б.Д. Степень новизны как основополагающий классификационный признак инноваций // Economy. 2011. № 1 (114). С. 115–118.
- Герман Е. А. Теоретическая инноватика: учебное пособие. Санкт-Петербург: изд. Санкт-Петербургского политех. ун-та, 2018. 148 с.
- Бездудная А.Г., Трейман М.Г., Копанская А.А. Экологические инновации в горнодобывающей отрасли // Проблемы современной экономики. 2020. № 2 (74). С. 246–250.
- Вайно А.Э. Прогнозный подход к экономической оценке инновационного ресурса горнодобывающих предприятий России // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2013. № 7. С. 93–106.
- Цубрович Я.А., Егорова М.С. Инновации как фактор устойчивого экономического развития страны // Молодой ученый. 2015. № 11.4 (91.4). С. 216–219.

REFERENCES

- Aniskin Yu.P. *Innovation management in the management system of innovative development of the enterprise*. Moscow: Omega-L, 2019, 411 p. (In Russ.).
- Bukreev A.M., Sirotkina N.V., Kulakova A.E. Regional innovation policy. Problems of development and implementation. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2020, no. 2 (115), pp. 570–572. (In Russ.).
- Zharov V.S., Tsukerman V.A. Assessment of the level of innovative activity of mining enterprises. *GIAB*. 2011, no. 10, pp. 293–301. (In Russ.).
- Khnyreva Yu.V. Types of tools of innovative potential of the enterprise and the need for their combined use. *Studium*. 2015, no. 1 (34), pp. 60–67. (In Russ.).
- Glinkii V.V., Serga L.K., Zaikov K.A. Assessment of the innovative potential of the territory: a spatial-dynamic approach. *Idey i idealy*. 2016, no. 2 (28), pp. 62–74. (In Russ.).
- Yashin S.N., Soldatova Yu.S. Assessment of the sustainability of innovative development of enterprises. *Finansy i kredit*. 2012, no. 32 (512), pp. 9–17. (In Russ.).
- Fridman Yu.A., Loginova E.Yu., Rechko G.N. Management of innovative development of the coal industry in the context of economic security of Kuzbass. In: *Problems of innovative management of the economy of the Siberian regions*. Novosibirsk: Izd-vo IEOPP SO RAN, 2015, pp. 70–81. (In Russ.).
- Malakhova B.D. The degree of novelty as a fundamental classification feature of innovation. *Economy*. 2011, no. 1 (114), pp. 115–118. (In Russ.).
- German E.A. *Theoretical innovation: a textbook*. St. Petersburg: izd. Sankt-

Peterburgskogo politekh. un-ta, 2018, 148 p. (In Russ.).

10. Bezdudnaya A.G., Treiman M.G., Kopanskaya A.A. Ecological innovations in the mining industry. *Problemy sovremennoi ekonomiki*. 2020, no. 2 (74), pp. 246–250. (In Russ.).
11. Vaino A.E. Predictive approach to the economic assessment of the innovative resource of mining enterprises of Russia. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2013, no. 7, pp. 93–106. (In Russ.).
12. Tsubrovich Ya.A., Egorova M.S. Innovations as a factor of sustainable economic development of the country. *Molodoi uchenyi*. 2015, no. 11.4 (91.4), pp. 216–219. (In Russ.).

Сведения об авторах

Наталья Васильевна Перекрест, ведущий бухгалтер по бухгалтерскому и налоговому учету, ООО «БизнесФорвард»

Email: nataliavasilievna1986@yandex.ru

Андрей Андреевич Перекрест, горнорабочий подземный, ООО «Шахта «Юбилейная»

Information about the authors

Natalia V. Perekrest, leading accountant for accounting and tax accounting, LLC "Businessforward"

Email: nataliavasilievna1986@yandex.ru

Andrey A. Perekrest, underground miner, LLC "Mine "Jubilee"

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 15.08.2022

После доработки 30.08.2022

Принята к публикации 04.09.2022

Received 15.08.2022

Revised 30.08.2022

Accepted 04.09.2022

Оригинальная статья

УДК 332.012.2

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Т. В. Бобко, Т. В. Петрова

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Проведен анализ проблем территориальной организации системы высшего образования Кемеровской области. Подчеркивается актуальность исследования указанного вопроса в условиях современных тенденций развития системы высшего образования Российской Федерации с учетом технологической трансформации и цифровизации экономики страны. Объект исследования – региональная система высшего образования Кемеровской области; предмет – территориальные аспекты пространственного распределения уровней обучения и направлений подготовки между ведущими вузами Кемеровской области; эмпирическая основа – документы, представленные на официальных сайтах высших учебных заведений, отражающие специфику уровней обучения и направлений подготовки, реализуемых в вузах Кузбасса. Методы исследования: теоретический обзор и обобщение научных данных, анализ документальных источников. При обработке результатов использовали методы графического изображения. Использовали системный и структурно-функциональный подходы к изучению специфики подготовки молодых специалистов в вузах Кемеровской области с учетом региональных особенностей. Проанализировано фактическое состояние системы высшего образования в регионе. Изучено пространственное распределение уровней обучения и направлений подготовки между ведущими университетами Кемеровской области. Выявлены недостатки пространственного распределения уровней обучения и направлений подготовки в территориальной организации системы высшего образования Кузбасса. Установлена причинно-следственная связь между образовательной миграцией выпускников школ и организацией системы высшего образования. Сделаны выводы о необходимости сбалансированного подхода к пространственному распределению уровней образования и направлений подготовки в вузах Кузбасса с учетом особенностей внутрирегионального социально-экономического развития. Результаты исследования могут являться информационно-аналитической основой для принятия управленческих решений в области совершенствования территориальной организации региональной системы высшего образования, актуализации стратегий развития университетов, решения задач управления вузами.

Ключевые слова: система высшего образования, региональное развитие, территориальная организация

Для цитирования: Бобко Т.В., Петрова Т.В. Пространственная организация региональной системы высшего образования Кемеровской области // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 63 – 73.

Оригинальная статья

SPATIAL ORGANIZATION OF THE REGIONAL HIGHER EDUCATION SYSTEM OF THE KEMEROVO REGION

T. V. Bobko, T. V. Petrova

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The analysis of the problems of the territorial organization of the higher education system of the Kemerovo region is carried out. The relevance of the study of this issue is emphasized in the context of modern trends in the development of the higher education system of the Russian Federation, taking into account the

technological transformation and digitalization of the country's economy. The object of the study is the regional system of higher education of the Kemerovo region; the subject is the territorial aspects of the spatial distribution of levels of education and areas of training between the leading universities of the Kemerovo region; The empirical basis is the documents presented on the official websites of higher educational institutions, reflecting the specifics of the levels of education and training areas implemented in the universities of Kuzbass. Research methods: theoretical review and generalization of scientific data, analysis of documentary sources. When processing the results, graphic image methods were used. We used systematic and structural-functional approaches to the study of the specifics of training young specialists in universities of the Kemerovo region, taking into account regional peculiarities. The actual state of the higher education system in the region is analyzed. The spatial distribution of educational levels and training directions between the leading universities of the Kemerovo region has been studied. The shortcomings of the spatial distribution of levels of education and training directions in the territorial organization of the higher education system of Kuzbass are revealed. A causal relationship has been established between the educational migration of school graduates and the organization of the higher education system. Conclusions are drawn about the need for a balanced approach to the spatial distribution of education levels and training areas in Kuzbass universities, taking into account the peculiarities of intraregional socio-economic development. The results of the study can be an information and analytical basis for making managerial decisions in the field of improving the territorial organization of the regional higher education system, updating university development strategies, solving university management problems.

Keywords: higher education system, regional development, territorial organization

For citation: Bobko T.V., Petrova T.V. Spatial organization of the Regional Higher Education System of the Kemerovo Region. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 63 – 73. (In Russ.).

Введение

Система российского высшего образования функционирует в сложных экономических условиях, вызванных рядом объективных факторов, одним из которых являются действующие на протяжении нескольких лет санкции со стороны США и стран Западной Европы в отношении Российской Федерации. Предпринимаемые Президентом и Правительством России меры направлены на преодоление последствий влияния этих и других негативных аспектов на развитие страны. Правительственные решения ориентированы на поддержание темпов экономического роста России, достижение запланированных показателей валового внутреннего продукта (ВВП), реализацию национальных проектов («Образование», «Наука и университеты», «Цифровая экономика»), обеспечение быстрого перехода знаний в технологии.

В этих условиях возросла роль университетов в обеспечении устойчивого социально-экономического развития регионов, обострилась проблема подготовки квалифицированных кадров и формирования их профессиональных компетенций, усилилась необходимость закрепления человеческого капитала.

Система высшего образования Кемеровской области является составной частью системы высшего образования Российской Федерации и представляет собой совокупность преемственных образовательных программ различного уровня и направленности, государственных об-

разовательных стандартов, реализуемых в вузах региона.

Кемеровская область является важнейшим индустриальным регионом страны. В нем получили развитие следующие отрасли промышленности: угольная; металлургическая (черная и цветная); химическая; машиностроительная; металлообрабатывающая; электроэнергетика. В Кемеровской обл. высокая востребованность в качестве подготовленных инженерных кадрах.

В настоящее время система высшего образования Кемеровской области имеет особенности пространственного развития, характерные для промышленных регионов. Наиболее заметно это проявляется в структурных сдвигах на рынке труда и усилении разрыва между требованиями работодателей и сформированными компетенциями выпускников вузов.

Выполненное в настоящей работе исследование позволило сформулировать вывод (применительно к региональным вузам) о необходимости учета особенностей внутрирегионального (пространственного) социально-экономического развития при реализации уровней образования и направлений подготовки в вузах Кузбасса.

Основные результаты

В работах [1 – 8] подтверждается возрастающая роль человеческого капитала как фактора экономического роста региона и усиливающееся значение высших учебных заведений в развитии человеческого потенциала.

Эволюция системы высшего образования в региональном образовательном пространстве и стратегические цели ее развития определяются приоритетами социально-экономического развития Российской Федерации, задачами, поставленными в Федеральном законе № 273 «Об образовании в Российской Федерации», Указе Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 г. № 599 «О мерах по реализации государственной политики в области образования и науки», национальными проектами «Образование», «Наука и университеты», «Цифровая экономика», особенностями развития экономики Кемеровской области.

В настоящее время в системе высшего образования Кемеровской области подготовку специалистов осуществляют девять образовательных организаций:

– шесть государственных образовательных организаций высшего образования федерального подчинения: ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» (КемГУ), ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ),

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ), ГОУ ВО «Кемеровский государственный медицинский университет» (КемГМУ), ГОУ ВО «Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия» (КузГСА), ГОУ ВО «Кемеровский государственный университет культуры» (КемГУК);

– один государственный вуз, находящийся в подчинении Федеральной службы исполнения наказаний: ФКОУ ВО «Кузбасский институт ФСИН России»;

– два филиала государственных учебных заведений высшего образования.

Структура системы высшего образования Кемеровской области по количеству бюджетных мест на 2022 г. и направлениям подготовки представлена в табл. 1. Система государственного высшего образования Кузбасса представлена семи вузами (не рассматриваются филиалы и Кузбасская православная духовная семинария), в которых осуществляется подготовка специалистов по 44 укрупненным направлениям подготовки.

Т а б л и ц а 1

Структура системы высшего образования Кемеровской области по количеству бюджетных мест на 2022 год и направлениям подготовки

Table 1. The structure of the higher education system of the Kemerovo region by the number of budget places for 2022 and areas of training

Наименование вуза	Количество направлений подготовки	Общее количество бюджетных мест	Количество бюджетных мест на бакалавриат	Количество бюджетных мест на специалитет	Количество бюджетных мест в магистратуру
Кемеровский государственный университет	57	2263	1308	150	805
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева	28	1274	736	239	299
Сибирский государственный индустриальный университет	38	1590	1159	215	216
Кемеровский государственный медицинский университет	5	655	–	655	–
Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия	11	758	455	169	134
Кемеровский государственный институт культуры	19	347	292	–	55
Кузбасский институт ФСИН России	1	225	100	125	–
Итого		7112	4050	1553	1509

Пр и м е ч а н и е. Приведены данные без учета КЦП по уровням обучения СПО и аспирантура.

Известно, что формирование спектра образовательных программ и направлений подготовки в Кузбассе обусловлено как историческим характером хозяйственного освоения территории Кемеровской области, связанного с месторождениями каменного угля и железной руды (строительством шахт, угольных разрезов, крупных заводов), так и текущими и перспективными потребностями экономики региона, в частности потребностями рынка труда, обусловленными структурными изменениями, происходящими в промышленности.

Самыми крупными городами Кузбасса являются Кемерово и Новокузнецк, в которых расположены все региональные вузы (за исключением филиалов). Эти города и их агломерации относятся к основным индустриальным центрам области. Промышленность города Кемерово включает предприятия угольной, химической, легкой и пищевой отраслей. Ключевая бизнес-среда Новокузнецка представлена базовыми отраслями (металлургия, угольная промышленность, машиностроение и энергетика).

Учитывая специфику промышленного производства Кузбасса, ведущими вузами, ориентированными на подготовку квалифицированных кадров для отраслей и основных видов деятельности региона, считаются КемГУ и КузГТУ (г. Кемерово), СибГИУ (г. Новокузнецк).

Кемеровский государственный университет – это крупнейший вуз Кемеровской области, входит в число 33 опорных вузов России. В этом учебном заведении осуществляется подготовка по многим образовательным программам среднего профессионального образования (СПО), бакалавриата и магистратуры. В 2021 г. численность обучающихся в КемГУ составила 14 605 человек (по специальностям СПО – 1809 человек, по направлениям подготовки бакалавриата – 8916 человек, специалитета – 1650 человек, магистратуры – 2230 человек).

Кузбасский технический университет является крупным образовательным, научно-исследовательским и инновационным центром. В нем проводятся обучение и научные исследования по следующим направлениям: геомеханика; углехимия; нанотехнологии; геология; разведка и технологии экологически безопасной разработки месторождений и добычи полезных ископаемых; геодезия; землеустройство; экология; технологии глубокой переработки угля; охрана труда и промышленная безопасность (прежде всего в горном деле, химии и пр.); инжиниринг; моделирование технологических и физических процессов; экономика и управление в базовых отраслях Кузбасса. На образовательной площадке КузГТУ открыт Военный учебный центр, ко-

торый с 2020 г. ведет подготовку обучающихся по военным специальностям. В вузе обучается 6478 человек (по специальностям СПО – 441 человек, по направлениям подготовки бакалавриата – 4202 человек, специалитета – 1706 человек, магистратуры – 723 человек).

Сибирский государственный индустриальный университет традиционно готовит инженеров и рабочих для сложившегося в регионе горно-металлургического производства, характеризуется высоким научным потенциалом в областях металлургии и горной промышленности, развития транспорта, возможностью вести подготовку и переподготовку кадров в области менеджмента, экономики, информационных технологий для рассматриваемых сфер экономической деятельности. По данным отчета по самообследованию университета на 13 сентября 2022 г. в СибГИУ обучается 8038 человек (по специальностям СПО 1350 человек, по направлениям подготовки бакалавриата – 4666 человек, специалитета – 1517 человек, магистратуры – 505 человек).

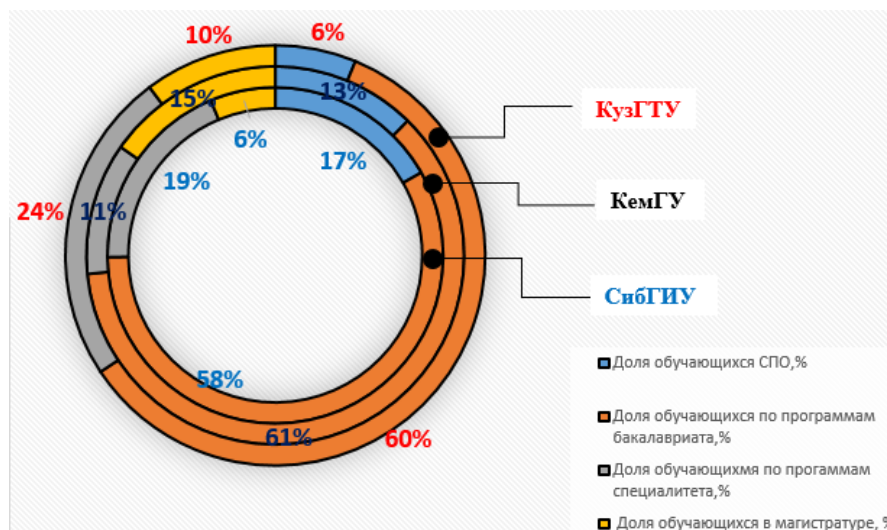
Распределение долей охвата обучающихся по программам СПО, бакалавриата, специалитета и магистратуры между ведущими вузами Кузбасса в системе регионального высшего образования представлено на рисунке.

Можно сделать вывод о том, что среди вузов Кемеровской области доля обучающихся по направлениям подготовки бакалавриата у всех вузов почти одинаковая (примерно 58 – 61 %). Однако по другим уровням подготовки имеются различия. Так, наибольшую долю обучающихся по специальностям СПО имеет СибГИУ (17 %). Наибольшее количество специалистов готовят в КузГТУ (24 %), обучающихся в магистратуре в КемГУ (15 %).

В рыночной экономике одним из критериев исследования целевой системы является географическое местоположение. Для региональных систем высшего образования рассматриваемый признак является фундаментальным, так как потребность в будущих специалистах складывается из потребности рынка труда для отраслей и экономических видов деятельности на территориях субъекта Федерации.

Анализ пространственного (географического) распределения уровней образования и направлений подготовки между ведущими вузами Кузбасса проведем с учетом следующих параметров:

- направления подготовки (специальности), которые предлагаются данными образовательными учреждениями;
- уровни обучения, предлагаемые вузами (бакалавриат, специалитет, магистратура);
- стоимость обучения – цена (price).



Доли обучающихся по программам СПО, бакалавриат, специалитет и магистратуры в ведущих вузах Кузбасса
The proportion of students enrolled in the programs of vocational, bachelor's, specialty and master's degree in the leading universities of Kuzbass

Географическое (пространственное) распределение укрупненных групп направлений подготовки по уровню образования бакалавриат в вузах городов Кемеровской области на 2022 г. представлено в табл. 2 (цветом выделены вузы, территориально расположенные в городах Кемерово (светло серый) и Новокузнецк (темно-серый)).

Подавляющее количество направлений подготовки для выпускников школ Кемеровской области сосредоточено в вузах города Кемерово. По данным Кемеровостата численность населения городов Кемерово и Новокузнецк на 2022 г. примерно одинаковая (около 550,0 тыс. человек). Однако, возможности для получения высшего образования у проживающих в этих городах абитуриентов разные. Вузы города Кемерово осуществляют обучение бакалавров по 54 направлениям подготовки и на 2022 г. получили в качестве госзаказа около 5000 бюджетных мест (контрольные цифры приема). В двух ведущих вуза (КемГУ и КузГТУ) областной столицы сосредоточено 72,9 % обучающихся по всем формам и уровням подготовки. Вузы города Новокузнецк осуществляют обучение всего по 15 направлениям подготовки бакалавриата и на 2022 г. университет (СибГИУ) получил в качестве госзаказа 1590 бюджетных мест (контрольные цифры приема без учета уровня СПО). Если численность жителей города Новокузнецк по сравнению с Кемерово меньше всего на 1,4 %, то количество направлений подготовки в вузах Новокузнецка более чем в три раза меньше, а количество бюджетных мест, выделенных на подготовку студентов по программам бакалавриата в городе Новокузнецк составляет 22 % от количества бюджетных мест, выделенных вузам в Ке-

меровской области. Такая ситуация говорит о несбалансированном пространственном распределении уровней обучения и направлений подготовки между вузами, расположенными в промышленных центрах региона, слабой чувствительности системы высшего образования к изменяющейся структуре промышленной специализации городов и технологической трансформации экономики, а также потребностям населения отдельных территорий.

В университетах Кемеровской области (КемГУ, КузГТУ и СибГИУ) осуществляют подготовку инженерных кадров для региона. Они имеют много схожих направлений подготовки, поэтому фактически перетягивают остающихся в области абитуриентов друг у друга. Тогда, как в соседних с Кузбассом областях, у абитуриентов есть возможность получить знания по более широкому спектру современных, а, соответственно, более востребованных при трудоустройстве, специальностям. Например, в Томском государственном университете (ТГУ), осуществляется подготовка почти по 90 направлениям подготовки, в том числе применительно к цифровой экономике и искусственному интеллекту, ландшафтной архитектуре, робототехнике и т.д. На направления подготовки «Экономика» и «Менеджмент» для поступающих в ТГУ в 2022 г. абитуриентов выделено по 50 бюджетных мест на каждое направление. В Новосибирском государственном университете студентов факультета информационных технологий привлекает обучение и научно-исследовательская работа студентов под руководством ведущих ученых СО РАН, а также многолетнее сотрудничество с Хартфордширским университетом (Англия). Экономическому факультету Новосибирского

Пространственное распределение направлений подготовки по уровню образования «бакалавриат» в вузах городов Кузбасса на 2022 год

Table 2. Spatial distribution of training areas according to the level of education bachelor's degree in universities of the cities of Kuzbass for 2022

Наименование вуза							
	КемГУ	КузГТУ	СибГИУ	КемГМУ	КузСХА	КемГИК	Кузбасский институт ФСИИР России
Математика и механика	+		+				
Компьютерные и информационные науки	+						
Физика и астрономия	+						
Химия	+						
Науки о земле	+		+				
Архитектура			+				
Техника и технологии строительства		+	+				
Информатика и вычислительная техника	+	+	+				
Электроника, радиотехника и системы связи	+	+	+				
Электро- и теплоэнергетика		+	+				
Машиностроение	+	+	+				
Физико-технические науки и технологии	+						
Химические технологии		+	+				
Техносферная безопасность и природообустройство	+	+	+		+		
Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия		+					
Технологии материалов			+				
Техника и технологии наземного транспорта		+	+				
Управление в технических системах	+	+	+				
Технологии легкой промышленности	+						
Сельское, лесное и рыбное хозяйство	+				+		
Ветеринария и зоотехния					+		
Психологические науки	+						
Экономика и управление	+		+		+		
Социология и социальная работа	+						
Юриспруденция	+						+
Политические науки и регионоведение	+						
Средства массовой информации и информационно-библиотечное дело	+						
Сервис и туризм	+	+				+	
Образование и педагогические науки	+		+				
Языкознание и литературоведение	+						
История и археология	+					+	
Физическая культура и спорт	+						
Теория и история искусств						+	
Культурология						+	
Народная и художественная культура						+	
Социально-культурная деятельность						+	
Музеология и охрана объектов культурного и природного наследия						+	
Режиссура театрализованных представлений и праздников						+	
Хореографическое искусство						+	
Хореографическое исполнительство						+	
Музыкальное искусство эстрады						+	
Музыкально-инструментальное искусство						+	
Искусство народного пения						+	
Дирижирование						+	

Наименование вуза							
	КемГУ	КузГТУ	СибГИУ	КемГМУ	КузСХА	КемГИК	Кузбасский институт ФСИИ России
Музыкальное и музыкально-прикладное искусство						+	
Библиотечно-информационная деятельность						+	
Дизайн						+	
Декоративно-прикладное искусство и народные промыслы						+	
Промышленная экология и биотехнологии	+						
Биологические науки	+						

государственного университета на 2022 год выделено 125 бюджетных мест. В вузах Москвы и Санкт-Петербурга для студентов возможности еще шире.

Пространственное распределение возможностей обучения студентов по программам специалитета в Кемеровской области представлено в табл. 3.

Аналогичная бакалавриату ситуации с подготовкой студентов по программам специалитета. В вузах, расположенных на территории города Кемерово, осуществляется подготовка по 13 укрупненным направлениям подготовки, в вузах, расположенных на территории города Новокузнецк – по 4 направлениям. Количество бюджетных мест на программы специалитета в вузах города Кемерово – 1031, в вузах города Новокузнецк – 160 (всего 15,5 % от выделенного госзаказа).

Большое значение для региона имеет создание на базе КемГУ опорного университета. Кемеровский государственный университет развивается как многопрофильный региональный университет, но не имеет широкого спектра направлений подготовки (специальностей) для создания в Кузбассе инновационной экономики.

Пространственное распределение программ магистратуры в университетах Кемеровской области представлено в табл. 4.

В настоящее время недостаточно типологизирована роль каждого из трех вузов (КемГУ, КузГТУ и СибГИУ) в регионе. На региональном уровне не сформирована стратегия их межвузовского (сетевое) взаимодействия, с помощью которой можно было бы определить более равномерное развитие Новокузнецкой и Кемеровской агломераций в части получения населением высшего образования.

Таблица 3

Пространственное распределение специальностей по уровню образования специалитет в вузах городов Кемеровской области на 2022 год

Table 3. Spatial distribution of specialties by level of education specialty in universities of the cities of the Kemerovo region for 2022

Наименование вуза							
	КемГУ	КузГТУ	СибГИУ	КемГМУ	КузСХА	Куз институт ФСИИ России	
Направления подготовки и специальности							
Химия	+						
Техника и технологии строительства			+				
Информационная безопасность	+						
Техносферная безопасность и природообустройство	+						
Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия		+	+				
Техника и технологии наземного транспорта		+	+		+		
Медицинская кибернетика	+			+			
Медико-профилактическое дело				+			
Фармация				+			
Ветеринария и зоотехния	+						
Психологические науки	+						
Языкознание и литературоведение	+						
Правоохранительная деятельность						+	

Пространственное распределение программ магистратуры в университетах Кемеровской области на 2022 год

Table 4. Spatial distribution of Master's degree programs at universities of the Kemerovo Region for 2022

Направления подготовки	Наименование вуза				
	КемГУ	КузГТУ	СибГИУ	КемГИК	КузСХА
Математика и механика	+				
Компьютерные и информационные науки	+				
Физика и астрономия	+				
Химия	+				
Науки о земле	+				
Биологические науки	+				
Архитектура			+		
Информатика и вычислительная техника	+	+	+		
Электро- и теплоэнергетика		+	+		
Машиностроение	+	+	+		
Физико-технические науки и технологии	+				
Химические технологии	+		+		
Промышленная экология и биотехнологии	+				
Техносферная безопасность и природообустройство			+		
Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия		+			
Технологии материалов			+		
Управление в технических системах	+		+		
Сельское, лесное и рыбное хозяйство					+
Ветеринария и зоотехния					+
Психологические науки	+				
Экономика и управление	+	+			
Социология и социальная работа	+				
Юриспруденция	+				
Политические науки и регионоведение	+				
Сервис и туризм	+				
Образование и педагогические науки	+				
Языкознание и литературоведение	+				
История и археология	+				
Народная художественная культура				+	
Музеология и охрана объектов культурного и природного наследия				+	
Библиотечно-информационная деятельность				+	
Музыкально-инструментальное искусство				+	
Искусство народного пения				+	
Дирижирование				+	
Дизайн				+	
Декоративно-прикладное искусство и народные промыслы				+	

Формы и сроки обучения, предлагаемые вузами Кемеровской области примерно одинаковые. Отличительной особенностью является небольшое количество программ специалитета для вузов города Новокузнецк. Для многих студентов было бы предпочтительнее поступить на специалитет и, отучившись пять лет, получить полное высшее образование. Специалитет дает более углубленное образование по определенному профилю (по сравнению с бакалавриатом), поэтому качество подготовки специалистов выше, и с такой подготовкой им легче найти работу как в нашем регионе, так и за его пределами.

Двухуровневое образование до сих пор не пользуется большой популярностью среди населения Кузбасса, и только небольшой процент, окончивших бакалавриат продолжает обучение в магистратуре.

Оценку пространственного распределения вузов Кемеровской области по стоимости обучения целесообразно проводить для направлений подготовки, по которым отсутствуют бюджетные места. Средняя коммерческая стоимость очного обучения в вузах Кузбасса на 2022 учебный год представлена в табл. 5.

Стоимость обучения в вузах Кузбасса на 2022 учебный год
Table 5. The cost of studying at universities in Kuzbass for the 2022 academic year

Наименование показателя	Стоимость обучения минимальная, руб.	Стоимость обучения средняя, руб.
КемГУ	35000	97441
КузГТУ	40940	116626
СибГИУ	40000	126000
КемГМУ	130000	154000
КузСХА	40000	98793
КемГИК	26000	74368

Для сравнения приведем стоимость обучения в известных вузах, расположенных в соседних с Кемеровской областью регионах:

- СГУПС (г. Новосибирск) от 122 500 руб.;
- ТГУ (г. Томск) от 175 000;
- УрФУ (г. Екатеринбург) от 136 808 руб.;
- МГУ (г. Москва) от 435 970 руб.

Очевидно, что более высокотехнологичное образование требует больших финансовых затрат. Однако, современные тенденции развития общества, связанные, прежде всего, с цифровой трансформацией российской экономики, сконцентрируют спрос на образование, позволяющее иметь высокую квалификацию для работы в наукоемких и высокотехнологичных отраслях, к чему стремится современное поколение выпускников общеобразовательных школ.

В работе [9] показано влияние экономических показателей развития региона на количество обучающихся по образовательным уровням подготовки в Кемеровской области, установлена необходимость снижения оттока «высокобалльных» новокузнецких школьников из города для обучения в других городах и выявлены основные причины образовательной миграции. Поводами для поступления выпускниками школ в вузы, расположенные в других регионах РФ, являются узкий выбор направлений подготовки, их низкая диверсификация (некоторые направления представлены одновременно в трех вузах); небольшой спектр направлений подготовки для наукоемких и высокотехнологичных отраслей. Общественное развитие приближается к шестому технологическому укладу и базовыми направлениями становятся нанотехнологии, биотехнологии, информационно-коммуникационные технологии и технологии новых материалов, которые слабо представлены в вузах Кемеровской области; недостаточное количество выделенных бюджетных мест (на пользующиеся спросом у абитуриентов специальности). Например, для новокузнецких вузов не выделяются бюджетные места на экономико-управленческие направления подготовки – востребованные абитуриентами и важные для развития города и присутствующих в нем предприятий.

Выводы

Существующая в настоящее время пространственная структура высшего образования в Кемеровской области не отвечает вызовам современного времени. В результате проведенного исследования выявлено, что на пространственное развитие региональной системы высшего образования влияет организация региональной промышленности. Университеты Кузбасса сталкиваются с проблемами, характерными для организации систем высшего образования, осуществляющих подготовку кадров для промышленных регионов. К основным сложностям относятся дублирование образовательных программ; недостаточное количество направлений подготовки для наукоемких и высокотехнологичных отраслей промышленности.

Результирующим следствием выявленных недостатков является отсутствие сбалансированного развития (пространственного распределения) направлений подготовки в образовательных организациях в условиях обостряющейся демографической ситуации [11], отток из региона талантливой молодежи и снижение рейтинговых позиций региональной системы образования в целом.

Трансформация региональной системы высшего образования должна осуществляться в соответствии с современными приоритетами развития региональных систем высшего образования и состоять в реализации современных, вариативных и востребованных направлений подготовки, соответствующих интересам абитуриентов и их родителей, региональным особенностям и потребностям социально-экономического и технологического развития страны; в обеспечении баланса в территориальном внутрирегиональном развитии, в том числе в сокращении дублирования и балансировании структуры направлений подготовки между вузами в соответствии с потребностями территориальной бизнес-среды.

Такая трансформация региональной системы высшего образования крайне важна для перехода в ближайшем будущем к новому типу регионального университета: университет – терруар,

который будет развиваться по нескольким магистральным направлениям, исходя из специфических характеристик местности и особенностей условий внешней среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штерцер Т.А. Роль человеческого капитала в экономическом развитии регионов РФ // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Социально-экономические науки. 2006. Т. 6. № 2. С. 37–51.
2. Хорошилова Ю.А. Роль человеческого капитала в развитии экономики региона. В кн.: Актуальные проблемы и перспективы развития государственной статистики в современных условиях. Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. 2018. С. 60–62.
3. Замятина М.Ф. Роль человеческого капитала в реализации концепции устойчивого развития регионов. В кн.: Актуальные проблемы труда и развития человеческого потенциала. Вузовско-академический сборник научных трудов. Санкт-Петербург, 2018. С. 60–64.
4. Терская Г.А. Роль человеческого капитала в развитии инновационной системы регионов. В кн.: Феномен рыночного хозяйства: от истоков до наших дней. Бизнес, инновации, информационные технологии, моделирование. Материалы VII Международной научно-практической конференции по экономике, посвященной памяти известного ученого и крупного организатора экономической науки на Юге России доктора экономических наук, профессора А.Ф. Сидорова, 2019. С. 374–383.
5. Щербакова Е.С., Вольхин С.Н. Человеческий капитал как фактор инновационного развития региона на примере Калужской области // Вестник Тульского филиала Финуниверситета. 2019. № 1-1. С. 179–185.
6. Фурсик С.Н. Качество человеческого потенциала как фактор инновационного развития экономики региона // Проблемы развития территории. 2014. № 1 (69). С. 67–81.
7. Диброва Ж.Н. Роль высших учебных заведений в развитии человеческого капитала региона // Казанский экономический вестник. 2014. № 4 (12). С. 108–118.
8. Иванова Н.Е., Митченко В.А. Роль человеческого капитала в социально-экономическом развитии регионов // Вестник Института дружбы народов Кавказа (Теория экономики и управления народным хозяйством). Экономические науки. 2022. № 2 (62). С. 81–87.
9. Бобко Т.В., Пригужалова Ю.А., Петрова Т.В. Оценка влияния экономических показателей развития региона на количество обучающихся по образовательным уровням подготовки в Кемеровской области // Искусственные общества. 2021. Т. 16. № 1.
10. Чубова Д.О., Бобко Т.В. О воздействии макроэкономических факторов на выбор уровня образования выпускниками школ. В кн.: Актуальные проблемы экономики и управления в XXI веке. Сб. науч. статей VII Международной научно-практической конференции. Ч. I. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021. С. 241–247.
11. Драйцева Л.П., Бобко Т.В. Оценка демографической ситуации в Кемеровской области. В кн.: Актуальные проблемы экономики и управления в XXI веке. Сб. науч. статей VII Международной научно-практической конференции. Ч. I. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021. С. 163–171.

REFERENCES

1. Shtertser T.A. The role of human capital in the economic development of the regions of the Russian Federation. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sotsial'no-ekonomicheskie nauki*. 2006, vol. 6, no. 2, pp. 37–51. (In Russ.).
2. Khoroshilova Yu.A. The role of human capital in the development of the region's economy. In: *Actual problems and prospects of development of state statistics in modern conditions. Collection of materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2018, pp. 60–62. (In Russ.).
3. Zamyatina M.F. The role of human capital in the implementation of the concept of sustainable development of regions. In: *Actual problems of labor and human potential development. University-academic collection of scientific papers*. Saint Petersburg, 2018, pp. 60–64. (In Russ.).
4. Terskaya G.A. The role of human capital in the development of the innovation system of the regions. In: *The phenomenon of market economy: from the origins to the present day. Business, innovation, information technology, modeling. Materials of the VII International Scientific and Practical Conference on Economics dedicated to the memory of the famous scientist and major organizer of economic science in the South of Russia, Doctor of Economics, Professor A.F. Sidorov*, 2019, pp. 374–383. (In Russ.).
5. Shcherbakova E.S., Vol'khin S.N. Human capital as a factor of innovative development of

- the region on the example of the Kaluga region. *Vestnik Tul'skogo filiala Finuniversiteta*. 2019, no. 1-1, pp. 179–185. (In Russ.).
6. Fursik S.N. The quality of human potential as a factor of innovative development of the economy of the region. *Problemy razvitiya territorii*. 2014, no. 1 (69), pp. 67–81. (In Russ.).
 7. Dibrova Zh.N. The role of higher educational institutions in the development of human capital in the region. *Kazanskii ekonomicheskii vestnik*. 2014, no. 4 (12), pp. 108–118. (In Russ.).
 8. Ivanova N.E., Mitchenko V.A. The role of human capital in the socio-economic development of regions. *Vestnik Instituta druzhby narodov Kavkaza (Teoriya ekonomiki i upravleniya narodnym khozyaistvom)*. *Ekonomicheskie nauki*. 2022, no. 2 (62), pp. 81–87. (In Russ.).
 9. Bobko T.V., Prituzhalova Yu.A., Petrova T.V. Assessment of the impact of economic indicators of regional development on the number of students at educational levels of training in the Kemerovo region. *Iskusstvennye obshchestva*. 2021, vol. 16, no. 1. (In Russ.).
 10. Chubova D.O., Bobko T.V. On the impact of macroeconomic factors on the choice of education level by school graduates. In: *Actual problems of economics and management in the XXI century. Sat. sci. Articles of the VII International Scientific and Practical Conference*. Ch. I. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2021, pp. 241–247. (In Russ.).
 11. Draitseva L.P., Bobko T.V. Assessment of the demographic situation in the Kemerovo region. In: *Actual problems of economics and management in the XXI century. Sat. sci. Articles of the VII International Scientific and Practical Conference*. Ch. I. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2021, pp. 163–171. (In Russ.).

Сведения об авторах

Татьяна Владимировна Бобко, старший преподаватель кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: BTV.27.Nov@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4973-0189

Татьяна Викторовна Петрова, д.э.н., профессор кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: ptrvt@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5399-9060

Information about the authors

Tatiana V. Bobko, Senior Lecturer of the Department of Management and Industry Economics, Siberian State Industrial University

E-mail: BTV.27.Nov@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4973-0189

Tatiana V. Petrova, Doctor of Economics, Professor of the Department of Management and Branch Economics, Siberian State Industrial University

E-mail: ptrvt@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5399-9060

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 23.08.2022

После доработки 05.09.2022

Принята к публикации 08.09.2022

Received 23.08.2022

Revised 05.09.2022

Accepted 08.09.2022

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В журнале «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» публикуются оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим направлениям:

- физика конденсированного состояния;
- информационные технологии;
- металлургия и материаловедение;
- региональная и отраслевая экономика.

К рукописи следует приложить рекомендацию соответствующей кафедры высшего учебного заведения, экспертное заключение, разрешение ректора или проректора высшего учебного заведения (для неучебного предприятия – руководителя или его заместителя) на опубликование результатов работ, выполненных в данном вузе (предприятии).

В редакцию следует направлять материалы статьи в электронном виде и два экземпляра текста статьи на бумажном носителе. Для ускорения процесса рецензирования статей электронный вариант статьи и скан-копии сопроводительных документов рекомендуется направлять по электронной почте по адресу e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru.

Таблицы, библиографический список и подрисуночный текст следует представлять на отдельных страницах. В рукописи необходимо сделать ссылки на таблицы, рисунки и литературные источники, приведенные в статье.

Иллюстрации нужно представлять отдельно от текста на носителе информации. Пояснительные надписи в иллюстрациях должны быть выполнены шрифтом Times New Roman Italic (греческие буквы – шрифтом Symbol Regular) размером 9. Тоновые изображения, размер которых не должен превышать 75x75 мм (фотографии и другие изображения, содержащие оттенки черного цвета), следует направлять в виде растровых графических файлов (форматов *.bmp, *.jpg, *.gif, *.tif) в цветовой шкале «оттенки серого» с разрешением не менее 300 dpi (точек на дюйм). Штриховые рисунки (графики, блок-схемы и т.д.) следует представлять в «черно-белой» шкале с разрешением не менее 600 dpi. На графиках не нужно наносить линии сетки, а экспериментальные или расчетные точки (маркеры) без крайней необходимости не «заливать» черным. Штриховые рисунки, созданные при помощи пространственных программ MS Excel, MS Visio и др., следует представлять в формате исходного приложения (*.xls, *.vsd и др.).

Шрифтовое оформление физических величин: латинские буквы в светлом курсивном начертании, русские и греческие – в светлом прямом. Числа и единицы измерения – в светлом прямом начертании. Особое внимание следует обратить на правильное изображение индексов и показателей степеней. Формулы набираются с помощью редакторов формул Equatn или Math Type, масштаб формул должен быть 100 %. Масштаб устанавливается в диалоговом окне «Формат объекта». В редакторе

формул для латинских и греческих букв использовать стиль «Математический» («Math»), для русских – стиль «Текст» («Text»). Размер задается стилем «Обычный» («Full»), для степеней и индексов – «Крупный индекс / Мелкий индекс» («Subscript / Sub-Subscript»). Недопустимо использовать стиль «Другой» («Other»).

Необходимо избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, графиках и тексте статьи. Объем статьи не должен превышать 18 – 20 страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала.

Рукопись должна быть тщательно выверена, подписана автором (при наличии нескольких авторов, число которых не должно превышать пяти, – всеми авторами); в конце рукописи указывают полное название высшего учебного заведения (предприятия) и кафедры, дату отправки рукописи, а также полные сведения о каждом авторе (Ф.И.О., место работы, должность, ученая степень, звание, служебный и домашний адреса с почтовыми индексами, телефон и e-mail). Необходимо указать, с кем вести переписку.

Цитируемую в статье литературу следует давать общим списком в порядке упоминания в статье с обозначением ссылки в тексте порядковой цифрой. Перечень литературных источников рекомендуется не менее 10.

Библиографический список оформляют в соответствии с ГОСТ 7.0.100 – 2018: а) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, номер тома, место издания, издательство и год издания, общее количество страниц; б) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название журнала, название статьи, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборников – фамилии и инициалы авторов, название сборника, название статьи, место издания, издательство, год издания, кому принадлежит, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, в библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

К статье должны быть приложены аннотация объемом до 250 слов, ключевые слова.

В конце статьи необходимо привести на английском языке: название статьи, Ф.И.О. авторов, место их работы, аннотацию и ключевые слова.

Краткие сообщения должны иметь самостоятельное научное значение и характеризоваться новизной и оригинальностью. Они предназначены для публикации в основном аспирантских работ. Объем кратких сообщений не должен превышать двух страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, включая таблицы и библиографический список. Под заголовком в скобках следу-

ет указать, что это краткое сообщение. Допускается включение в краткое сообщение одного несложного рисунка, в этом случае текст должен быть уменьшен. Приводить в одном сообщении одновременно таблицу и рисунок не рекомендуется.

Количество авторов в кратком сообщении должно быть не более трех. Требования к оформлению рукописей и необходимой документации те же, что к оформлению статей.

Корректуры статей авторам, как правило, не посылают.

В случае возвращения статьи автору для исправления (или при сокращении) датой представления считается день получения окончательного текста.

Статьи, поступающие в редакцию, проходят гласную рецензию.

Статьи журнала индексируются в РИНЦ и представлены на сайте СибГИУ (www.sibsiu.ru) в разделе Наука и инновации (Периодические научные издания (Журнал «Вестник СибГИУ»)).

Над номером работали

Коновалов С.В., главный редактор

Запольская Е.М., ответственный секретарь

Бащенко Л.П., ведущий редактор

Темлянцева Е.Н., верстка

Олендаренко Е.В., менеджер по работе с клиентами

Безродная Е.А., администратор сайта