

- Л.В. Корнева, А.Ю. Сюсюкин. – М.: Теплотехник, 2007. – 280 с.
4. Федин В.М. Объемно-поверхностная за-
калка деталей подвижного состава и верх-
него строения пути. – М.: Интекст, 2002. –
208 с.
5. Масару Уэда, Кацую Ивано,
Такэси Ямамото. Характеристики
термоупрочненных рельсов и новейшие
разработки Nippon Steel // Инженерные ре-
шения. 2012. Январь. С. 9 – 11.
6. Корнева Л.В., Юнин Г.Н., Козы-
рев Н.А., Аткинова О.П., Поле-
вой Е.В. Сравнительный анализ показате-
лей качества рельсов ОАО «Новокузнец-
кий металлургический комбинат» и зару-
бежных производителей // Изв. вуз. Черная
металлургия. 2010. № 12. С. 38 – 42.

© 2014 г. К.В. Волков, Е.В. Полевой,
М.В. Темлянец, О.П. Аткинова,
А.М. Юнусов, А.Ю. Сюсюкин
Поступила 28 августа 2014 г.

УДК 62-419.5:620.172.224:519.876.5

Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, А.А. Голик, И.А. Пономарева, В.Н. Арисова

Волгоградский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНТАКТНОГО УПРОЧНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОСЛОЙКИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ МАГНИЕВО-АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ*

При сварке плавлением магния с алюминии-
ем образуются хрупкие интерметаллиды, резко
снижающие работоспособность конструкций,
поэтому обычно используются сваренные
взрывом магниево-алюминиевые переходники
[1] различных конструкций. Наиболее часто
используют два типа соединений: 1) компози-
ция МА2-1-АД1-АМг6, применяемая для экс-
плуатации при температурах от –196 до
+100 °С, не допускающая при дуговой сварке
перегрева границы АД1-МА2-1; 2) четырех-
слойная композиция МА2-1-ВТ1-0-АД1-
АМг6, рассчитанная на эксплуатацию в диапа-
зоне температур от –196 до +500 °С. Проч-
ность таких соединений в направлении, нор-
мальном границе раздела слоев, определяется
свойствами наиболее слабого из составляю-
щих материалов, которым обычно является
прослойка алюминия, играющим роль буфера
пластичности и диффузионного барьера. С
уменьшением толщины прослойки (ее обычно
характеризуют относительной толщиной $\chi =$
 h/d , где h – толщина прослойки, d – диаметр
испытываемого образца) начинает проявляться

эффект контактного упрочнения. Для расчета
прочности композитов с мягкими прослойками
ранее разработан графоаналитический метод
[1, 2], обеспечивающий приемлемые для прак-
тики результаты. После разработки метода ко-
нечных элементов и создания на его основе
пакетов компьютерных программ, например
SIMULIA/ABAQUS, появилась возможность
более точного моделирования поведения раз-
личных процессов – от гидродинамических
потоков расплавов металлов [3] и температур-
ных полей в нагреваемых сляках под прокатку
[4] до деформации композиционных материа-
лов с резко различающимися по прочностным
характеристикам слоями.

Целью настоящей работы являлась верифи-
кация моделирования с использованием пакета
компьютерных программ SIMULIA/ABAQUS
поведения при растяжении магниево-
алюминиевых композитов с мягкой прослой-
кой при нормальной и повышенных темпера-
турах.

Для верификации результатов моделирова-
ния был изготовлен сваркой взрывом слоистый
композит МА2-1-АД1-АМг6, в котором тол-
щина алюминиевого подслоя изменялась в
диапазоне 0,1 – 1,5 мм, а толщины магниевого

*Исследование выполнено при поддержке гран-
та Российского научного фонда (проект №14-19-
00418).

и алюминиевого сплавов оставались неизменными (соответственно 20 и 10 мм). Оптимизированные параметры сварки взрывом трехслойной композиции обеспечивали прочность сварных соединений на уровне прочности алюминия (с учетом повышения этого показателя из-за роста плотности дислокаций при взрывном нагружении и контактного упрочнения). Отжиг композиционного материала при 100 °С в течение 1 ч частично устранял взрывное упрочнение алюминия.

Из трехслойного материала МА2-1–АД1–АМг6 в состоянии после сварки и отжига механически вырезали стандартные цилиндрические образцы для испытаний на растяжение (длина рабочей части 20 мм), ось которых перпендикулярна поверхностям соединения слоев. Результаты испытаний на растяжение по нормали к линии соединения показали [5], что с уменьшением относительной толщины алюминиевого подслоя $\chi = h/d$ прочность трехслойного материала после сварки и термической обработки постепенно возрастала от 100 – 120 МПа при $\chi = 0,5$ до 200 МПа при $\chi = 0,03$ (рис. 1). Разрушение образцов при $\chi = 0,03$ происходило по сплаву магния МА2-1, и прочность композита уже не определялась прочностью алюминиевой прослойки. При $\chi > 0,2$ продольная остаточная деформация преимущественно локализовалась в алюминии, определяющим пластичность всего соединения. Уменьшение χ

до 0,07 приводило к стеснению пластической деформации в сплаве АД1, постепенному снижению общей пластичности и заметному вовлечению сплавов МА2-1 и АМг6 в пластическую деформацию, в основном, в приконтактной с прослойкой АД1 области.

Верификация моделирования процессов деформирования и разрушения при растяжении цилиндрического образца диам. 6 мм трехслойного магниево-алюминиевого композита МА2-1–АД1–АМг6 методом конечных элементов проверялась с использованием модуля Abaqus/Explicit программного комплекса SIMULIA/Abaqus компании Dassault Systèmes Simulia Corp. (USA), использующего явную схему интегрирования для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов. Расчет проводился с использованием модели Мизеса. Для расчета упрочнения материалов в результате пластического деформирования использовали модель Джонсона–Кука [6], согласно которой предел текучести определяется формулой

$$\sigma_Y = \left(A + B \varepsilon_p^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (1)$$

где A – предел текучести неупрочненного материала; B – коэффициент упрочнения при деформировании; C – коэффициент зависимости упрочнения от скорости деформирования; ε_p – эффективная пластическая деформация; T_m – температура плавления; T_r – комнатная температура; n , m , ε_0 – параметры модели; $\dot{\varepsilon}_0$ и $\dot{\varepsilon}_p$ – первые производные по времени величин ε_0 и ε_p .

Формула (1) по сути представляет собой кривую деформирования материала. Для описания разрушения материала использовалась модель Джонсона–Кука [7], согласно которой разрушение конечного элемента происходит, когда параметр поврежденности D становится равным единице:

$$D = \frac{1}{\varepsilon_f} \sum_i \Delta \varepsilon_p^i; \quad (2)$$

здесь $\Delta \varepsilon_p^i$ – приращение эффективной пластической деформации в конечном элементе на i -м шаге интегрирования по времени; величина ε_f вычисляется по формуле

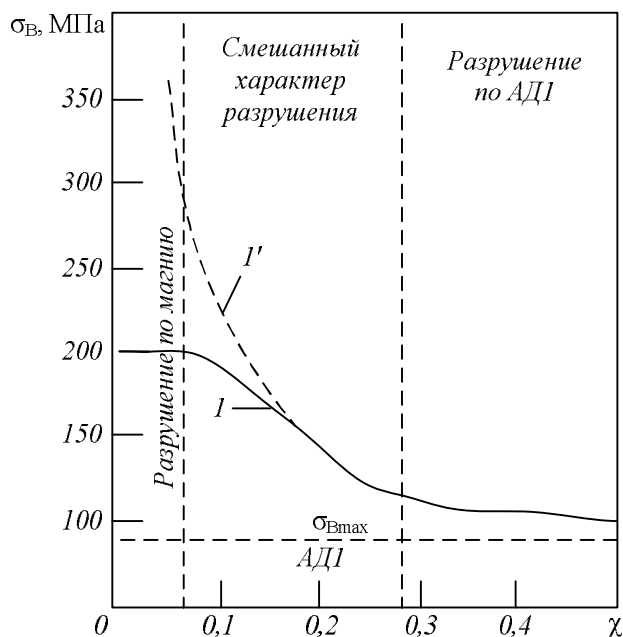


Рис. 1. Зависимость прочности композита после термической обработки при 100 °С в течение 1 ч от относительной толщины алюминиевого слоя:
I и I' – экспериментальная и расчетная кривые

$$\varepsilon_f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{p}{\sigma_{ef}} \right) \right] \left(1 + D_4 \ln \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right) \times \left(1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right), \quad (3)$$

где $D_1, \dots, D_5$ – параметры материала; σ_{ef} – эффективное напряжение; p – давление в рассматриваемом конечном элементе.

Значения параметров для выбранных материалов, взятые из работ [8, 9], приведены в табл. 1, 2. В связи с низкой скоростью деформирования ($\dot{\varepsilon}_p < 0,0025 \text{ с}^{-1}$) ее влияние не учитывалось.

Цилиндрическая форма образцов позволяла задавать элементы композита в виде деформируемых осесимметричных тел [10] и рассчитывать напряжения и деформации в радиальном сечении, что значительно сокращало время моделирования. Относительная толщина прослойки АД1 варьировалась от $\chi_{\text{АД1}} = 0,66$ (4 мм) до $\chi_{\text{АД1}} = 0,033$ (0,1 мм), а толщины слоев сплавов АМг6 и МА2-1 составляли 10 мм. Прочность связей между слоями соответствовала прочности наименее прочного элемента пары. Размер сторон квадратных ячеек конечно-элементной сетки в элементах композита из сплавов АМг6 и МА2-1 составлял 0,10 мм. Размер прямоугольных ячеек в мягкой прослойке АД1 в радиальном направлении соответствовал размерам ячеек сплавов АМг6 и МА2-1, а в осевом направлении составлял 1/40 толщины мягкой прослойки. Моделируемая скорость растяжения образца составляла 0,02 мм/с. Различия в поведении композита

определялись при температурах от нормальной до 300 °С.

Полученные при моделировании значения предела прочности композитов МА2-1–АД1–АМг6 при различных относительных толщинах прослойки $\chi_{\text{АД1}}$ хорошо коррелируют с экспериментально определенными величинами для композита, отожженного при 100 °С в течение 1 ч (рис. 1). Проведенное моделирование показало изменение характера деформирования и разрушения основных слоев композита при варьировании относительной толщины мягкой прослойки (рис. 2, 3), причем характер зависимости во многом определяется температурой испытания. При нормальной температуре в области $\chi_{\text{АД1}} > 0,016$ разрушение при моделировании происходило по прослойке АД1, но уменьшение ее относительной толщины сопровождалось ростом пластической деформации в магниевом сплаве МА2-1 с образованием шейки в сплаве Мг6 при $\chi_{\text{АД1}} = 0,016$ (рис. 2, а).

Увеличение температуры приводило к снижению общей прочности композита и сохранению разрушения по алюминиевой прослойке даже при $\chi_{\text{АД1}} = 0,016$ (рис. 3, а). Кривые деформация – напряжения при различных температурах для композиционных образцов с относительными толщинами алюминиевой прослойки $\chi_{\text{АД1}} = 0,016$ и $\chi_{\text{АД1}} = 0,667$ показаны на рис. 4. Повышение температуры снижало расчетную прочность композиционных образцов. Зависимость максимального удлинения образца от температуры испытаний имеет более сложный характер: при использовании мягкой прослойки больших толщин (рис. 4, б) повышение температуры способствует быстрой

Т а б л и ц а 1

Использованные коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука [6]

Материал	A , МПа	B , МПа	m	n	$\dot{\varepsilon}_0$, с^{-1}	T_m , К	T_r , К
Сплав АМг6	218,3	704,6	0,93	0,62	1	773	293
Алюминий	60,0	6,4	0,859	0,62	1	933	293
Сплав МА2-1 (аналог AZ31В-О)	100,0	380	1,04	0,28	1	773	293

Т а б л и ц а 2

Использованные коэффициенты для модели разрушения Джонсона–Кука [7]

Материал	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	$\dot{\varepsilon}_0$, с^{-1}	T_m , К	T_r , К
Сплав АМг6	0,178	0,389	–2,246	0	0	1	873	293
Алюминий	0,071	1,428	–1,142	0,0097	0	1	933	293
Сплав МА2-1 (аналог AZ31В-О)	–0,35	0,6025	–0,4537	0,206	7,2	1	773	293

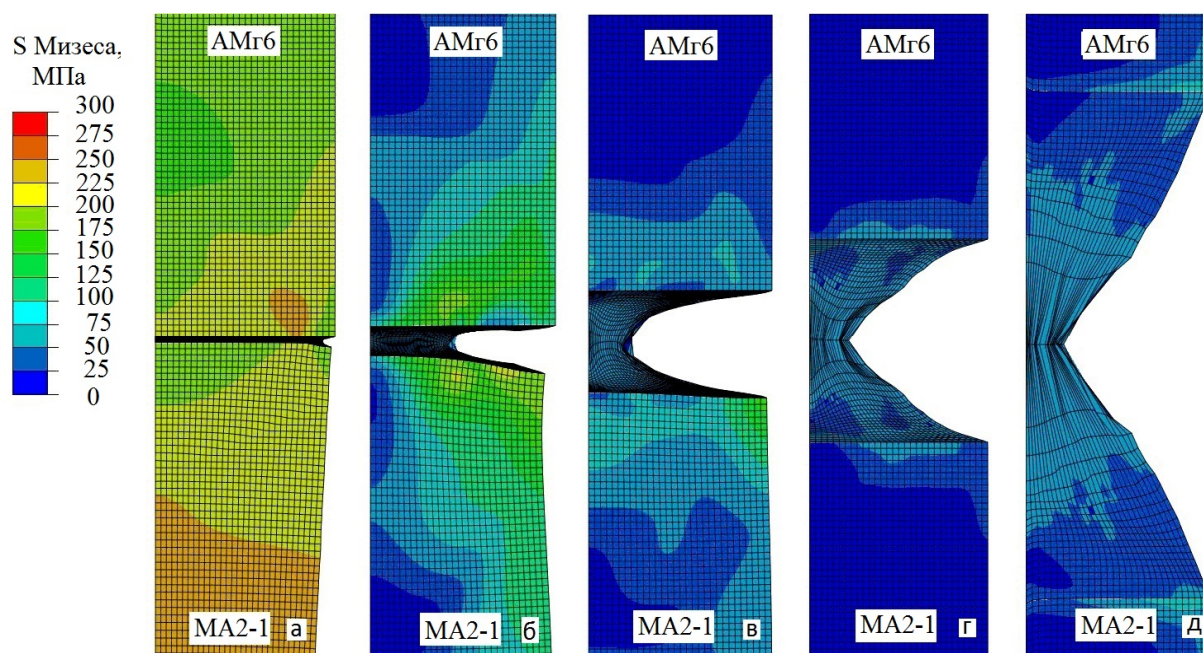


Рис. 2. Изменение характера деформирования в композите МА2-1–АД1–АМг6 ячеек слоев МА2-1 и АД1 при нормальной температуре и варьировании относительной толщины мягкой прослойки χ_{AD1} :
 $a - \chi_{AD1} = 0,016$; $b - \chi_{AD1} = 0,033$; $в - \chi_{AD1} = 0,067$; $г - \chi_{AD1} = 0,166$; $д - \chi_{AD1} = 0,667$

локализации деформации в формирующейся шейке и, соответственно, снижению относительного удлинения. Для прослойки с $\chi_{AD1} = 0,016$ (рис. 4, а) наименьшие значения относительного удлинения получены в интервале моделируемых температур 100 – 200 °С вследствие уменьшения вовлечения магниевого сплава в пластическую деформацию.

Полученные результаты указывают на необходимость тщательного подхода к выбору толщины технологической прослойки АД1 в трехслойном композите МА2-1–АД1–АМг6, вклю-

чая математическое моделирование поведения изделия из композиционного материала при возможных схемах нагружения, для обеспечения необходимого запаса пластичности материала в условиях эксплуатации. Вместе с тем практическое получение слоя АД1 в 100 мкм в композиционном материале МА2-1–АД1–АМг6 затруднено даже в случае использования при сварке взрывом не листового алюминия, а предварительно сваренной взрывом и прокатанной трехслойной прослойки МА2-1–АД1–АМг6 с расчетным соотношением слоев

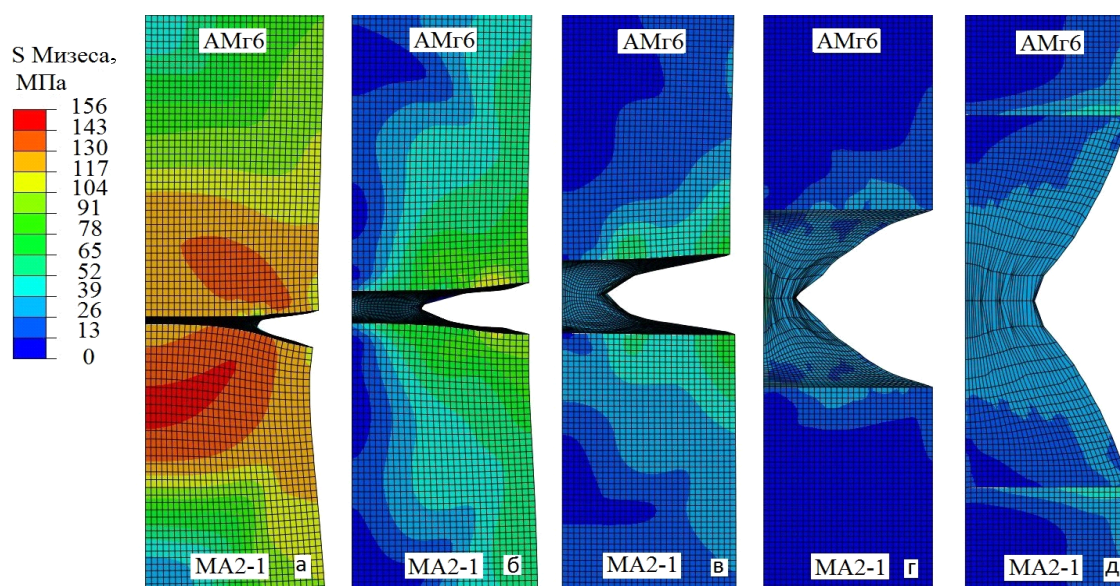


Рис. 3. Изменение характера деформирования в композите МА2-1–АД1–АМг6 ячеек слоев МА2-1 и АД1 при температуре 300°С и варьировании относительной толщины мягкой прослойки χ_{AD1} :
 $a - \chi_{AD1} = 0,016$; $b - \chi_{AD1} = 0,033$; $в - \chi_{AD1} = 0,067$; $г - \chi_{AD1} = 0,166$; $д - \chi_{AD1} = 0,667$

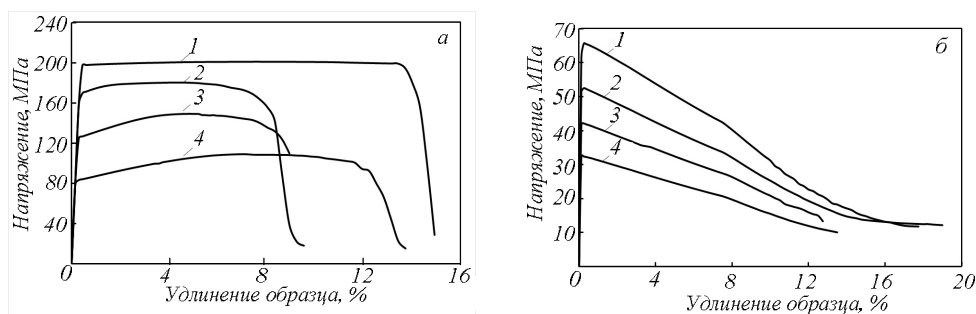


Рис. 4. Кривые деформация – напряжения при различных температурах для композиционных образцов МА2-1–АД1–АМг6 с относительными толщинами алюминиевой прослойки $\chi_{\text{АД1}} = 0,016$ (а) и $\chi_{\text{АД1}} = 0,667$ (б):

1 – нормальная температура; 2 – 100 °C; 3 – 200 °C; 4 – 300 °C

по аналогии с ранее созданной технологией получения четырехслойного композита титан – ниобий – медь – сталь [11]. Причиной этого является ухудшение при прокатке условий совместной деформации слоев, вызывающей в конечном счете разрушение по границе АД1–МА2-1 или по магниевому сплаву МА2-1 вследствие снижения его деформационной способности по мере увеличения обжатия.

Выводы. Сравнением с экспериментальными данными верифицированы результаты моделирования с использованием модуля Abaqus/Explicit программного комплекса SIMULIA/Abaqus поведения в процессе осевого растяжения нормально к линии соединения трехслойной композиции МА2-1–АД1–АМг6 с различными толщинами мягкой прослойки. Методами конечно-элементного моделирования подтверждено, что уменьшение относительной толщины алюминиевой прослойки приводит к росту прочности композита с локализацией пластической деформации в алюми-

ниевом сплаве АД1. Только при относительной толщине $\chi_{\text{АД1}} \leq 0,033$ начинается заметное деформирование алюминиевого сплава АМг6, увеличивающееся по мере роста температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгунов В.Г. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов. – М.: Металлургия, 2004. – 230 с.
2. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Проничев Д.В. Композиционные переходники. – Волгоград: РПК «Политехник», 2007. – 328 с.
3. Фейлер С.В., Протопопов Е.В., Комшук В.П., Ганзер Л.А. Разработка математической модели и численные расчеты гидродинамических потоков стали в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 12. С. 15 – 21.

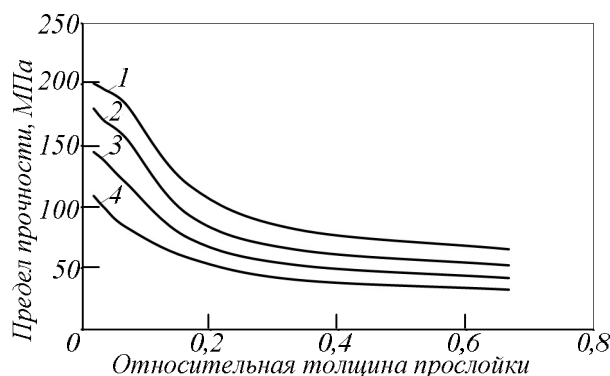


Рис. 5. Зависимость определенного при моделировании временного сопротивления разрыву от относительной толщины алюминиевой прослойки в композите АМг6–АД1–МА2-1:

1 – нормальная температура; 2 – 100 °C; 3 – 200 °C; 4 – 300 °C

4. Перетятко В.Н., Темлянцев Н.В., Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Нагрев стальных слябов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150100 – Metallurgy. – М.: Теплотехник, 2008. – 178 с.
5. Гуревич Л. М., Трыков Ю.П., Арисова В.Н., Пономарева И.А., Голик А.А. Моделирование контактного упрочнения в магниево-алюминиевых композитах // Известия ВолгГТУ. Серия Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Вып. 9. № 9 (136). 2014. С. 72 – 76.
6. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of 7th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983. P. 541 – 547.
7. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // Engineering Fracture Mechanics. 1985. Vol. 21. P. 31 – 48.
8. Кузькин В.А., Михалюк Д.С. Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона–Кука при высокоскоростном деформировании алюминия // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 1. С. 32 – 43.
9. Giraud E., Rossi F., Germain G., Outeiro J.C. Constitutive Modelling of AZ31B-O Magnesium Alloy for Cryogenic Machining // 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), (CIRP CMMO), Italy (2013). DOI : 10.1016/j.procir. 2013.06.144.
10. Abaqus 6.12. Analysis User's Manual. Vol. 1. Part 1. Introduction, spatial modeling and execution. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2012. – 831 p.
11. Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Голик А.А. Моделирование контактного упрочнения титано-стального композита с мягкой прослойкой // Известия ВолгГТУ. Серия Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Вып. 9. № 9 (136). 2014. С. 68 – 72.

© 2014 г. Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков,
А.А. Голик, И.А. Пономарева, В.Н. Арисова
Поступила 28 августа 2014 г.

УДК 669.162.12:622

В.М. Павловец

Сибирский государственный индустриальный университет

ПРИНЦИПЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЗА СЧЕТ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОКАТЫШЕЙ

Технологическая схема производства железорудных окатышей включает в себя окомкование шихты с получением влажных окатышей на низкотемпературной стадии процесса и упрочняющую термическую обработку окомкованного сырья на высокотемпературной стадии технологии, после которой окисленные окатыши пригодны для длительной транспортировки к потребителям и для последующей плавки или металлзации. Упрочняющая термическая обработка окатышей в режимах сушки, подогрева и обжига с использованием 100 % технологического топлива (20 – 25 м³/т) и 80 % электро-

энергии (5 – 10 кВт·ч/т) осуществляется на обжиговых конвейерных машинах, где и происходит основное структурообразование (формируется пористость, межчастичная минеральная связка). Процессы формирования формы и размеров пор, характера (открытая, закрытая) пористости при обжиге являются трудноконтролируемыми, поскольку на них накладываются многочисленные сопутствующие физико-химические процессы. Окомкование влажной железорудной шихты на низкотемпературной стадии технологии в окомкователе свободно от внешнего теплового и струк-