



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Структура, фазовый состав и микромеханические свойства брикетированного алюминия

Наталья Пугачева^{1, а}, Николай Бабайлов^{1, б}, Татьяна Быкова^{1, в, *}, Юрий Логинов^{2, 3, д}

¹ Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

² Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620990, Россия

³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>, nat@imach.uran.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0002-6245-2841>, n.a.babaylov@urfu.ru,

^в <https://orcid.org/0000-0002-8888-6410>, tatiana_8801@mail.ru, ^д <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>, j.n.loginov@urfu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК620.18.186

История статьи:

Поступила: 26 июня 2020

Рецензирование: 14 июля 2020

Принята к печати: 07 августа 2020

Доступно онлайн: 15 сентября 2020

Ключевые слова:

Алюминиевый сплав

Брикетирование

Композит

Твердый раствор

Интерметаллиды

Микрорентгеноспектральный анализ

Микротвердость

Инструментальное

микроиндентирование

Финансирование

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН в соответствии с государственным заданием по теме № АААА-А18-118020790140-5.

АННОТАЦИЯ

Введение. Технология валкового брикетирования успешно применяется для утилизации отходов алюминиевых сплавов с целью последующего использования в металлургическом производстве при раскислении и легировании сталей, в алумотермии, для получения цветных сплавов, а также при изготовлении сварочных электродов. К получаемым заготовкам предъявляются требования сохранять свою целостность во время погрузки-разгрузки и транспортировки. Это обеспечивается выбором эффективных режимов прессования, обеспечивающих минимальную пористость. Кроме того, практически интересным является разработка технологии дополнительной обработки брикетов давлением и резанием, например, для формирования сварочных электродов. **Цель работы:** исследование химического и фазового состава брикетированного алюминия, определение характера распределения микротвердости и микромеханических свойств по сечению брикета. **Методы исследования:** измерение микротвердости и пористости, сканирующая электронная микроскопия и микрорентгеноспектральный анализ, инструментальное микроиндентирование. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что брикетированный алюминий представляет собой композит с алюминиевой матрицей, наполнителем являются частицы оксидов Al_2O_3 , MgO , SiO_2 и графита, попавшего в материал из смазки, использованной при прокатке брикета в валковых прессах. В алюминиевой матрице неравномерно распределены дисперсные частицы интерметаллидов $Al_8FeMg_4Si_6$ и $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si$, которые являются упрочняющими фазами. Средняя плотность композита составила 2160 кг/м^3 , общая пористость не более 20 %. При этом центральная часть брикетированной ячейки твердостью 65 HV 0,1 плотная и не содержит пор. Поры присутствуют вблизи поверхности и имеют размеры $0,1 \dots 0,3 \text{ мм}$, что снижает твердость до 30 HV 0,1. Отдельные области композита отличаются более высокими по сравнению с основным материалом значениями микротвердости (до 140 HV 0,1) и нормального модуля упругости, снижением показателей пластичности и ползучести. Неравномерное распределение микромеханических свойств следует учитывать как при разработке технологии брикетирования, так и при дополнительной обработке давлением, а также при выборе способа резания.

Для цитирования: Структура, фазовый состав и микромеханические свойства брикетированного алюминия / Н.Б. Пугачева, Н.А. Бабайлов, Т.М. Быкова, Ю.Н. Логинов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 82–94. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-82-94.

Введение

В последнее время технология валкового брикетирования успешно применяется для утилизации отходов алюминиевых сплавов с целью последующего использования в металлургическом производстве. Брикетированный алюминий используется при раскислении и легировании сталей, а также в алумотермическом производ-

*Адрес для переписки

Быкова Татьяна Михайловна, к.т.н., научный сотрудник
 Институт машиноведения УрО РАН,
 ул. Комсомольская, 34,
 620049, г. Екатеринбург, Россия
 Тел.: 8 (343) 362-30-43, e-mail: tatiana_8801@mail.ru

стве или для получения новых алюминиевых сплавов, при изготовлении сварочных электродов [1–4]. Ранее выполненные исследования показали, что после брикетирования измельченных отходов алюминиевых сплавов в валковых прессах формируются достаточно плотные брикеты разной формы [5–7]. Плотность получаемых брикетов зависит от их толщины: чем толще брикет, тем меньшая величина объемной деформации создается в теле брикета, а следовательно, повышается вероятность сохранения остаточной пористости [7]. Как правило, брикеты, полученные на валковых прессах, имеют разную плотность передней и задней кромки, что определяет возможность выкрашивания переднего торца брикета при хранении, транспортировке или загрузке в печь. Тем не менее валковое брикетирование представляется наиболее рациональным и экологичным способом утилизации отходов алюминиевых сплавов с целью их последующей переработки [8–14].

До сих пор не уделялось внимания исследованию химического и фазового состава получаемых алюминиевых брикетов. Однако это важный аспект как с точки зрения разработки более эффективных режимов их прессования, так и с точки зрения дальнейшего применения. При производстве брикетов используются отходы электротехнических алюминиевых сплавов А0, А5, А6, А7 в виде обрывов проводов. В соответствии с ГОСТ 11069–2001 эти сплавы могут содержать некоторое количество Fe и Si, образующих тройные промежуточные фазы α -(Fe₂SiAl₆) и β -(FeSiAl₅). При производстве брикетов используются также измельченные элементы вышедших из строя конструкций из термически упрочняемых сплавов АД31, 6060, 6061, содержащих до 1,0 масс. % Mg, 0,6 масс. % Si, 0,5 масс. % Fe. Интерметаллиды, неизбежно присутствующие в этих сплавах, могут служить центрами образования твердых фаз при выплавке алюминиевых сплавов и легированных латуней [15]. При оценке структурного состояния брикетированного алюминия вполне оправдан такой же подход, как и при исследовании алюмоматричных композитов [16–19]. Определение характера распределения микромеханических свойств по сечению заготовок позволит выбрать режим обработки давлением, обеспечивающий прочность заготовок, достаточную для сохра-

нения их целостности в процессе погрузки-выгрузки и транспортировки. Практический интерес представляет разработка технологических режимов последующих обработок давлением и резанием, например, для формирования сварочных электродов. В этом случае также важно определить однородность распределения микромеханических свойств по сечению брикетов.

Цель данной работы заключалась в исследовании химического и фазового состава брикетированного алюминия, а также в определении характера распределения микротвердости и микромеханических свойств по сечению брикета.

Методика исследований

Брикетирование измельченных алюминиевых сплавов с максимальным диаметром (длиной) до 6,5 мм выполнено на валковых прессах серии ПБВ с рабочими валками диаметром 600 мм [7]. Использовали сечку алюминиевого сплава АД33 (6061), имеющего следующий химический состав, масс. %: 0,4...0,8 Si; 0,7 Fe; 0,15...0,40 Cu; 0,8...1,2 Mg; 0,2 Mn; Al – остальное. Частота вращения валков составляла 5 мин⁻¹. Внешний вид получаемого брикета показан на рис. 1. Размеры брикета составили: 18 мм – толщина, 33 мм – ширина и 38 мм – длина. Брикетирование проводили без использования подпрессовщика и без связующего. Зазор между валками составил 5 мм.

Плотность брикета определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 18898–89 ИСО 2738–87 путем взвешивания образцов на воздухе

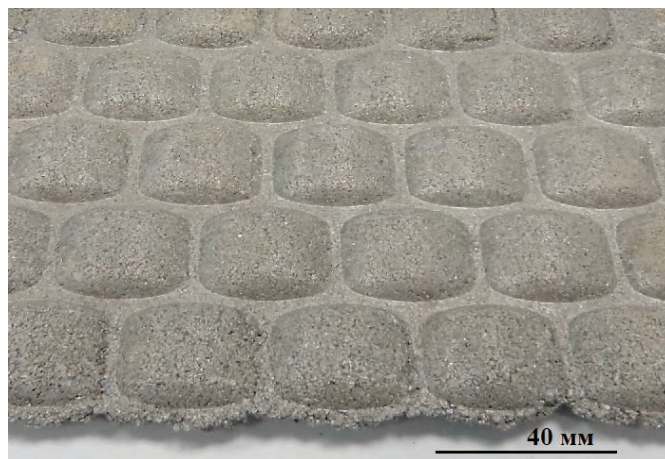


Рис. 1. Внешний вид брикетированного алюминия

Fig. 1. Appearance of briquetted aluminum

и в дистиллированной воде плотностью 998 кг/м³ с использованием аналитических весов OhasPi-
onerPA 214 с точностью до 0,0001 г. Для исклю-
чения проникновения дистиллированной воды
внутри брикета его предварительно погружали
в расплав парафина для получения тонкой изо-
лирующей пленки, параметры которой учитыва-
лись в расчетах (плотность парафина 900 кг/м³).
Погрешность определения плотности составля-
ла не более 0,2 % от измеряемой величины.

Общую пористость рассчитывали по формуле

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_m}\right) 100 \%, \quad (1)$$

где Π – общая пористость; ρ – экспериментально
полученное значение плотности композита; ρ_m –
теоретическая плотность компактного материа-
ла (для сплава 6060 она равна 2700 кг/м³).

Химический состав полученного композита
определяли методом микрорентгеноспектраль-
ного анализа на растровом электронном микро-
скопе TESCAN VEGA II XMU с энергодисперси-
онной приставкой OXFORD путем сканирования
участка поверхности шлифа площадью 4 мм²
при увеличении $\times 100$. Измерения проводили на
20 участках, полученные результаты усредняли
(табл. 1).

Микроструктуру композита исследовали
методом растровой электронной микроскопии
(микроскоп TESCAN VEGA II XMU). Фазовый
состав определяли путем сравнения химиче-
ского состава фаз с данными, приведенными в
работе [20]. Твердость композита по Виккерсу
определяли на твердомере LEICA при нагруз-
ке 100 г в соответствии с требованиями ГОСТ
Р ИСО 6507-1–2007. Микромеханические свой-
ства исследованы на инструментированном
микротвердоме FISHERSCOPE 2000хум по
ГОСТ Р 8.748–2011 (ИСО 14577-1:2002). Экс-
периментально были определены значения
приведенного модуля упругости (E), по кото-

рым рассчитывали нормальный модуль упру-
гости ($E_{\text{упр}}$) по формуле [17]

$$E_{\text{упр}} = E(1 - \mu^2), \quad (2)$$

где μ – коэффициент Пуассона (для алюми-
ниевого сплава $\mu = 0,34$ [19]). Показатели ϕ и C_{IT} рас-
считывали по формулам [17]

$$\phi = \frac{A_{o.\phi}}{A_{\text{рел}}} 100 \%, \quad (3)$$

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} 100 \%, \quad (4)$$

где ϕ – условный показатель запаса пластично-
сти; $A_{o.\phi}$ – работа сил остаточного формоизме-
нения; $A_{\text{рел}}$ – работа сил релаксации (рис. 2);
 C_{IT} – ползучесть, характеризующая способность
материала к формоизменению при постоянно
действующей нагрузке; h_1 – глубина внедрения
индентора, соответствующая начальной точке
горизонтального участка на кривой нагружения;
 h_2 – глубина внедрения индентора, соответствую-
щая конечной точке кривой.

Результаты и их обсуждение

После валкового брикетирования алюми-
ней сечки сформировался композит, состоящий
из матрицы в виде твердого раствора на основе
алюминия. Большинство исходных фрагментов
прочно соединились друг с другом путем адге-
зионного взаимодействия при возникающей в
процессе брикетирования нагрузке. Средняя по
сечению микротвердость композита составила
65 HV 0,1, что соответствует справочным дан-
ным для алюминиевого сплава АД33 [21]. Зна-
чения микротвердости колеблются от 30 до
115 HV 0,1, что обусловлено неравномерно рас-
пределенной пористостью (рис. 3, а). Анализ рас-
пределения химических элементов по сечению

Таблица 1

Table 1

Химический состав исследуемого композита, масс. %.

The chemical composition of the studied composite material, mass. %

Al	C	O	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	P
84,0 ± 3,5	8,2 ± 3,0	4,3 ± 1,2	1,3 ± 0,2	0,4 ± 0,2	0,8 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,1

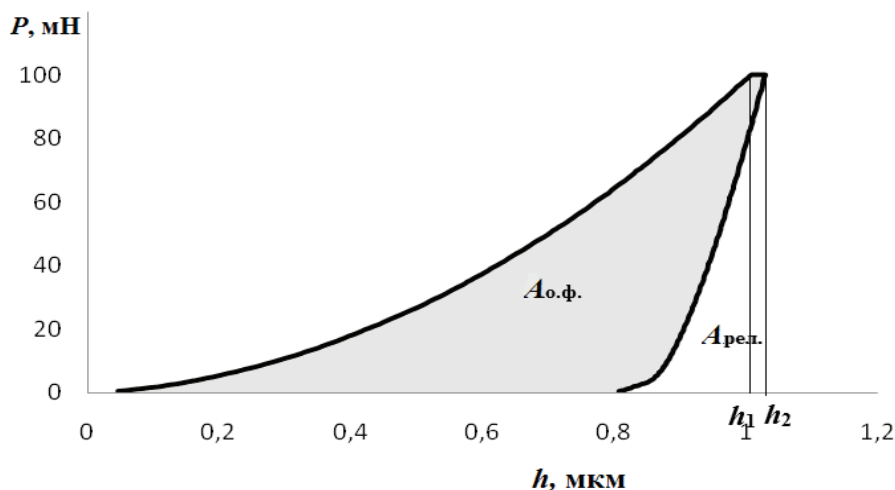
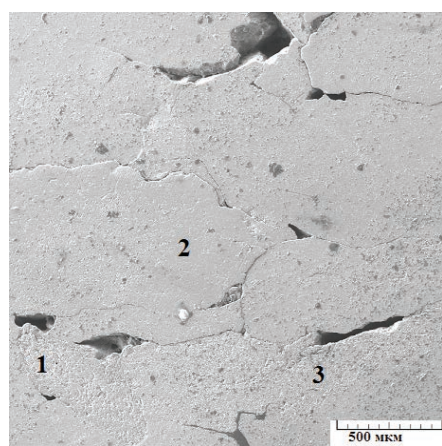


Рис. 2. Кривая индентирования:

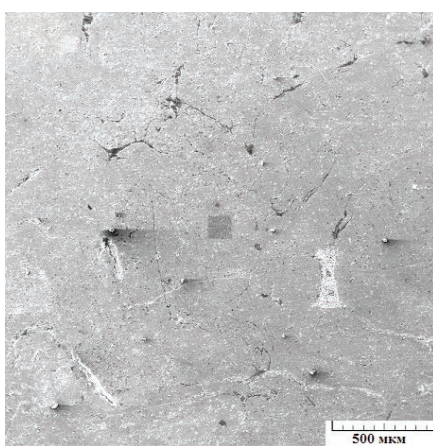
P – нагрузка на индентор; h – глубина внедрения индентора

Fig. 2. Indentation curve:

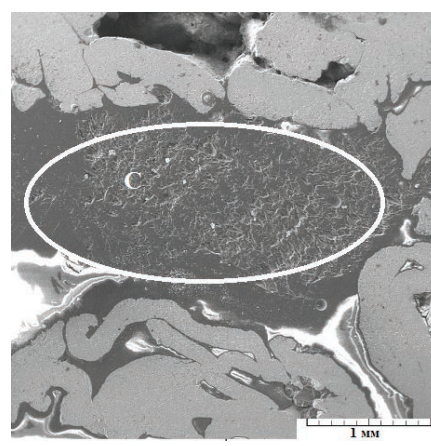
P – indenter load; h – indenter penetration depth



б



в



г

Рис. 3. Номограмма микротвердости (HV 0,1) по сечению брикета на продольном разе с отмеченными участками микроанализа (а) и поры на поверхности шлифа композита (изображения во вторичных электронах);

б – участок А; в – участок В; г – участок С

Fig. 3. Microhardness (HV 0,1) nomogram over the briquette cross-section on a longitudinal cut with marked areas of microanalysis (a) and pores on the surface of the composite section (SEM); б – area A; в – section B; г – section C

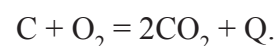
композита показал, что брикетированию подвергали немного отличающиеся по химическому составу алюминиевые сплавы конструкционного назначения группы АД31 – АД35 (рис. 3, б и табл. 2).

На большей части поверхности шлифов, главным образом в центральной части образцов, вырезанных вдоль и поперек брикетов, наблюдали плотное строение композита, обеспеченное адгезионным взаимодействием между исходными частицами сечки (рис. 3, в). Тем не менее наблюдали единичные поры размерами 0,1...0,3 мм и их скопления длиной до 1 мм. Средняя плотность составила $2160 \pm 110 \text{ кг/м}^3$, а общая пористость не более 20 %. Вблизи поверхности брикета поры заполнены темно-серым веществом (участок С на рис. 3, з), содержащим углерод, смесь оксидов Al_2O_3 , MgO , NaO , CaO , K_2O , серу, фосфор и хлор (NaCl). Химический состав такого участка приведен в табл. 3.

Армирующими компонентами являются частицы оксидов Al_2O_3 , MgO и SiO_2 , которые изначально присутствуют на поверхности всех исходных фрагментов алюминиевых сплавов. Частично оксиды сохранились на участках, где величина объемной деформации была недостаточной для осуществления адгезионного вза-

имодействия между исходными фрагментами (рис. 4).

Химический анализ участка С (рис. 3, з) соответствует графитсодержащей смазке, используемой при работе валков. Она зафиксирована только вблизи поверхности в передней наиболее пористой части брикетов. Однако хаотически распределенные частицы графита были обнаружены и на других участках сечения (рис. 5). Это объясняет существенное содержание углерода в композите (табл. 1 и 3). Присутствие частиц графита в брикетированном алюминии положительно повлияет на снижение энергозатрат при его использовании как для выплавки сталей или алюминиевых сплавов, так и в качестве сварочных электродов за счет протекания экзотермической реакции:



Внутри каждой матричной ячейки зафиксированы частицы интерметаллидов двух типов (рис. 6): частицы первого типа содержат марганец и железо (точки анализа 5–7 в табл. 4), второго – магний и кремний (точки анализа 1–4 в табл. 4). Последние расположены в виде прослоек по границам зерен алюминиевого сплава. Светлые частицы ограненной формы близки по химическому составу $\alpha_{\text{m}}(\text{Al}_{15})$ -фазе

Таблица 2

Table 2

Химический состав ячеек композита, отмеченных на рис. 3, б, масс. %
The chemical composition of the composite cells marked in Fig. 3, б, mass. %

Номер ячейки	Mg	Mn	Fe	Si	C	O	Cu	P
1	3,5	0,5	0,4	1,1	9,7	7,0	0,1	0,2
2	0,9	1,1	0,7	0,2	0,0	3,2	0,2	0,0
3	4,3	0,5	0,4	1,1	6,0	4,2	0,2	0,1
Остальное алюминий								

Таблица 3

Table 3

Химический состав участка С на рис. 3, в, масс. %
The chemical composition of section C in Fig. 3, в, mass. %

C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca
52,3	27	1,6	0,5	0,4	2,2	6,0	5,0	3,0	2,0

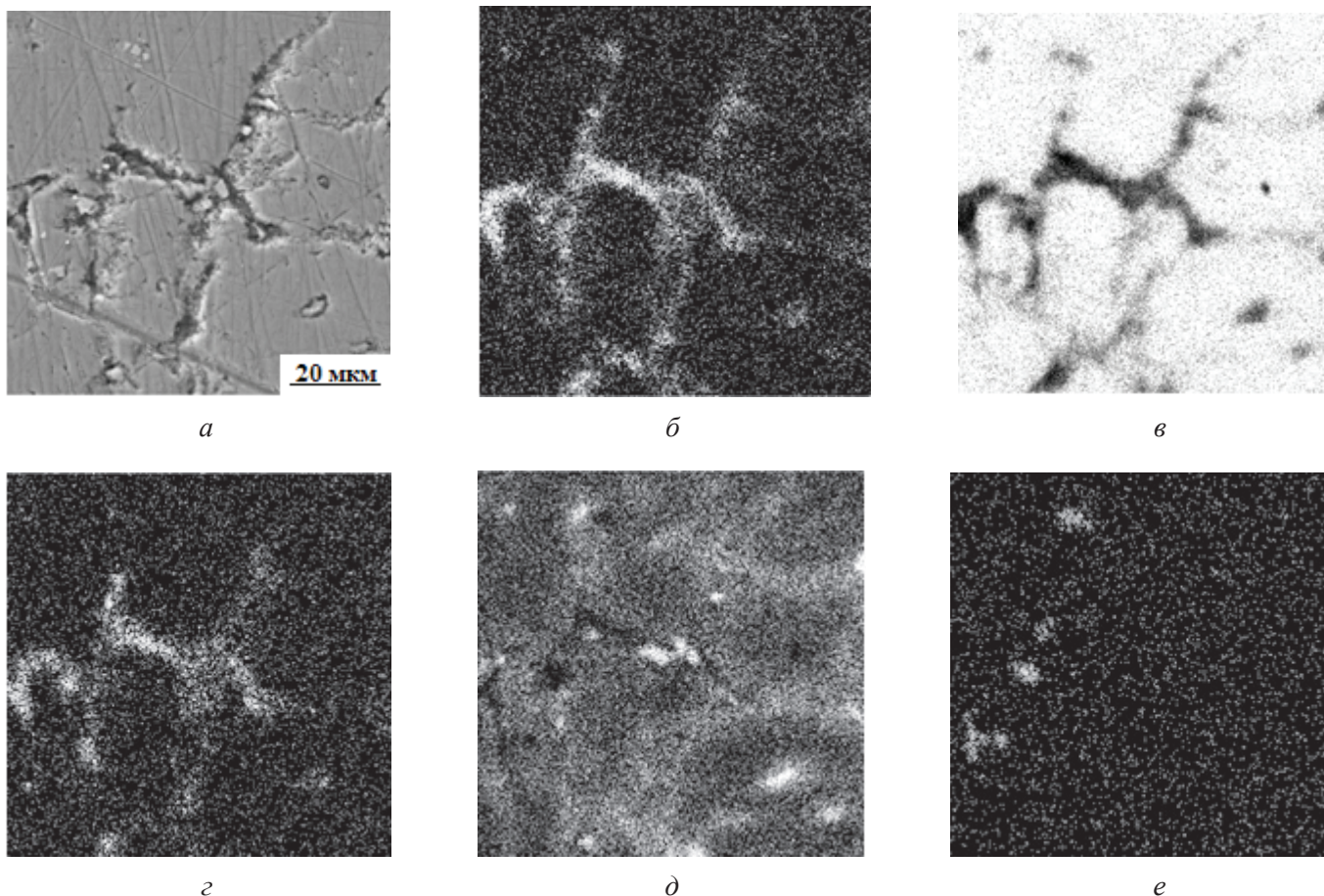


Рис. 4. Распределение элементов в брикете:

изображения *a* – во вторичных электронах; *б–е* – в характеристических рентгеновских излучениях: *б* – кислорода, *в* – Al; *з* – Si; *д* – Mg; *е* – Fe

Fig. 4. The distribution of elements in the briquette:

images *a* – in secondary electrons; *б–е* – in characteristic x-ray emissions: *б* – O; *в* – Al; *з* – Si; *д* – Mg; *е* – Fe

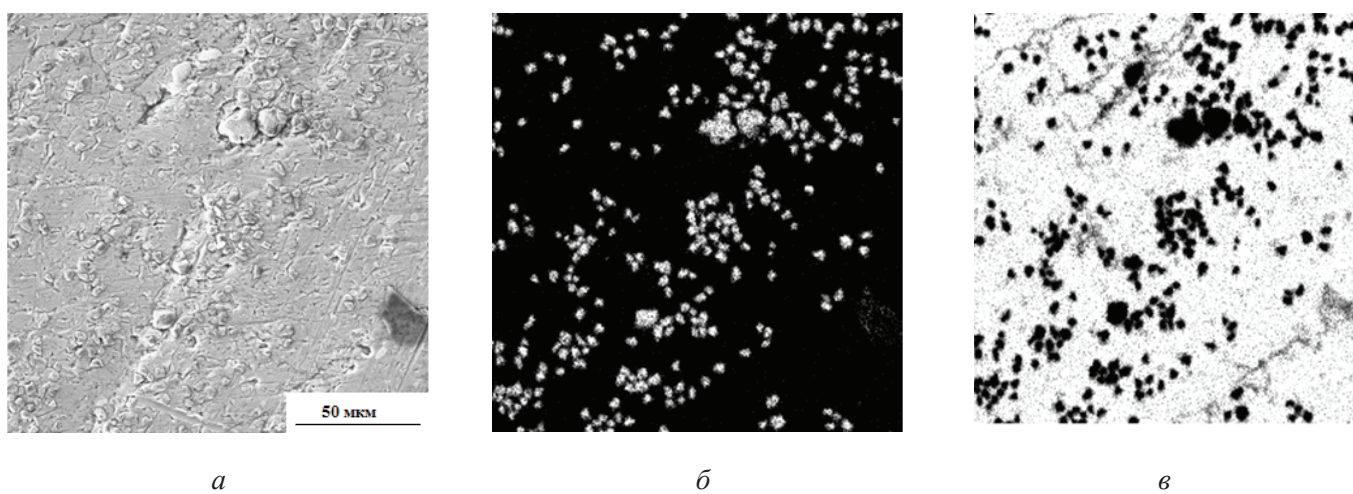


Рис. 5. Частицы графита на отдельных участках поверхности шлифа:

a – изображение во вторичных электронах; *б* – в характеристическом рентгеновском излучении углерода; *в* – алюминия

Fig. 5. Graphite particles on separate sections of the surface of the thin section:

a – image in secondary electrons; *б* – in the characteristic x-ray emission of C; *в* – Al

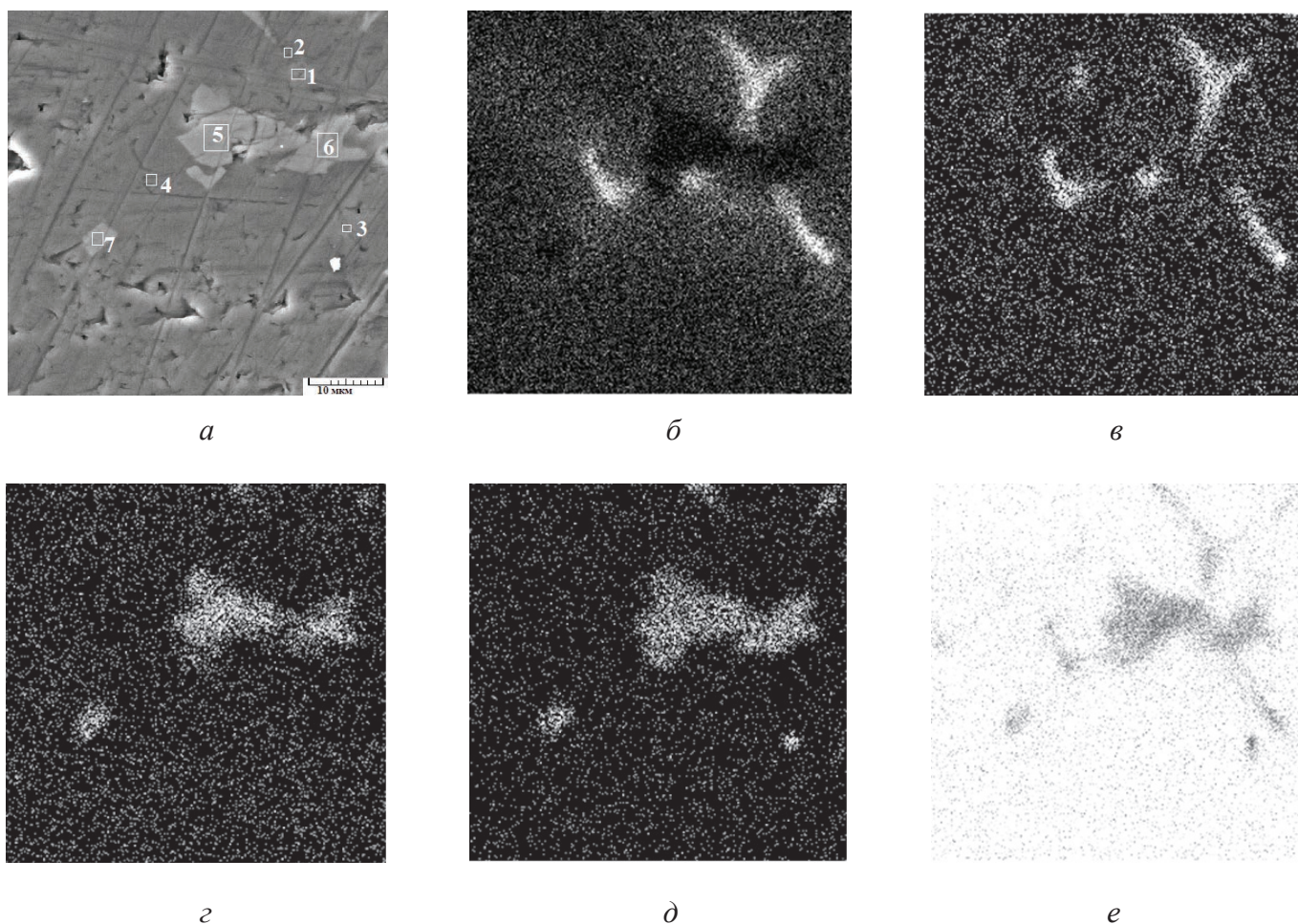

a
б
в
г
д
е

Рис. 6. Распределение химических элементов между фазами в композите:

a – изображение во вторичных электронах; *б* – в характеристическом рентгеновском излучении Mg; *в* – Si; *г* – Mn; *д* – Fe; *е* – Al

Fig. 6. The distribution of chemical elements between the phases in the composite:

a – image in secondary electrons; *б* – in characteristic x-ray radiation of Mg; *в* – Si; *г* – Mn; *д* – Fe; *е* – Al

Таблица 4

Table 4

Химический состав включений, отмеченных на рис. 6, *a*, масс. %
The chemical composition of the inclusions marked in Fig. 6, *a*, mass. %

Точки анализа	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	C	O
1	11,4	6,3	0,3	10,2	0,5	0,0	2,6
2	8,7	6,5	0,0	8,3	0,0	2,7	3,3
3	11,5	6,8	0,2	9,2	1,1	0,0	2,6
4	12,6	7,3	0,2	9,8	1,2	0,0	2,6
5	0,2	0,13	13,9	11,1	0,0	1,8	1,0
6	0,5	0,2	10,2	12,7	0,0	3,8	1,5
7	0,4	0,2	11,8	10,8	0,0	0,0	1,3
Остальное алюминий							

$\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$, характеризующиеся широкой областью гомогенности [20–21]. Прослойки по границам α -зерен близки по химическому составу π -фазе $\text{Al}_8\text{FeMg}_4\text{Si}_6$.

Частицы этих интерметаллидов расположены неравномерно по сечению композита. Основная часть композита (область *A*, рис. 7, *a*) содержит небольшое количество интерметаллидов, поэтому характеризуется большей пластичностью: максимальная глубина внедрения индентора составила 8 мкм, микротвердость 62 HV 0,1, $\varphi = 0,9$, $C_{IT} = 0,52$ (табл. 5). На участках скопле-

ния частиц интерметаллидов, подобных представленному на рис. 6, значения микротвердости повышаются до 112 HV 0,1 (участок *A* 3 в табл. 5).

В ячейках, подобных отмеченной *B*, рис. 7, *a*, среднее содержание магния составило 4,5 масс. %, количество интерметаллидов в них гораздо больше по сравнению с соседними ячейками, отмеченными буквой *A*. В некоторых случаях такие ячейки формируют кольцо, как показано на рис. 7, *б*. Возможно, исходная стружка алюминиевого сплава имела форму кольца или приобрела ее в процессе деформации при брикетировании.

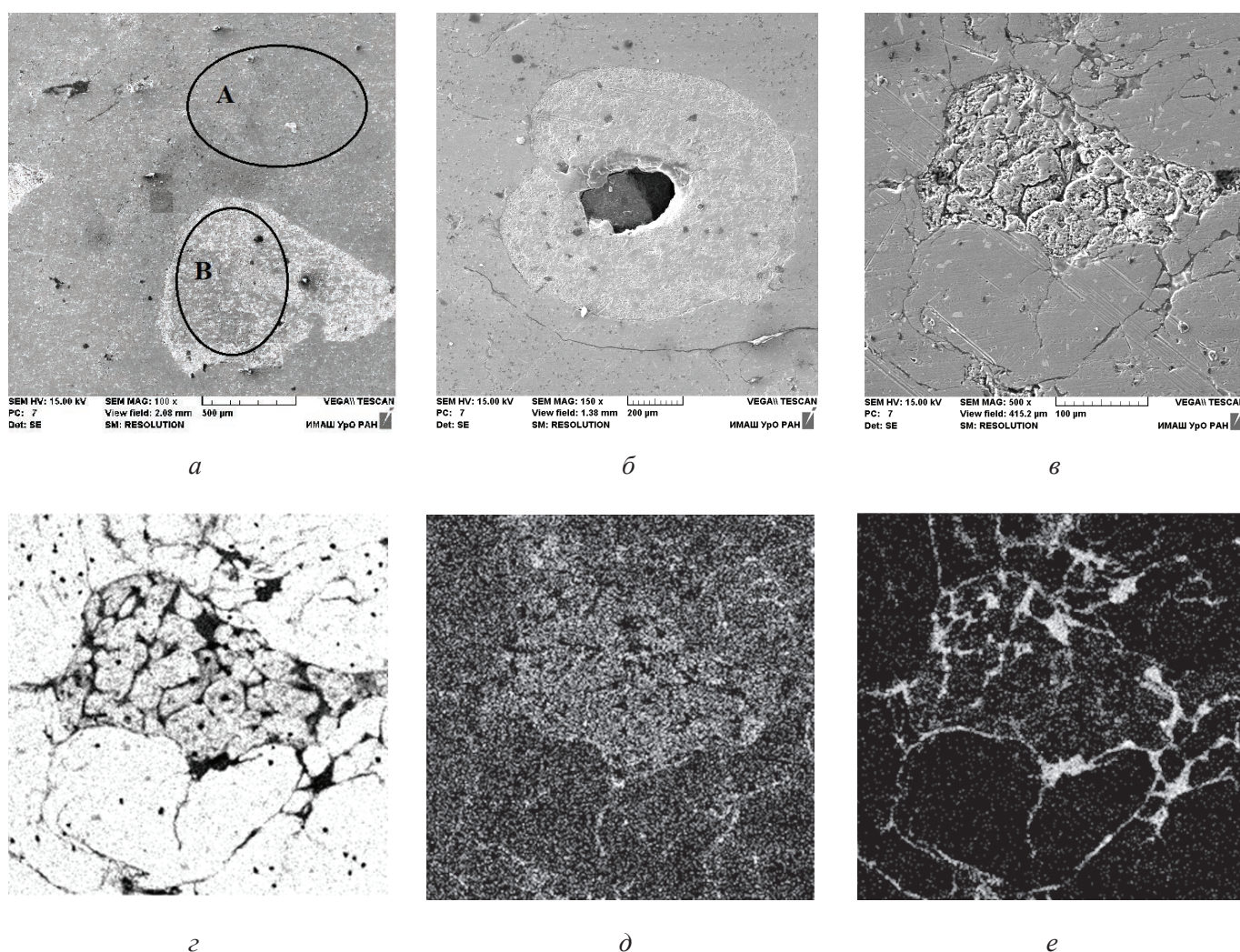


Рис. 7. Неоднородное распределение частиц интерметаллидов по сечению композита на поверхности шлифа (изображения во вторичных электронах):

a – ячейка с содержанием магния 4,5 масс. %; *б* – участок с порой, заполненной остатками смазки; *в* – растрескавшаяся ячейка; *г* – изображение в характеристическом рентгеновском излучении Al; *д* – Mg; *е* – кислорода

Fig. 7. Inhomogeneous distribution of intermetallic particles over the cross section of the composite on the surface of the thin section (images in secondary electrons):

a – a cell with a magnesium content of 4.5 wt. %; *б* – a section with a pore filled with grease residues; *в* – a cracked cell; *г* – image in characteristic x-ray radiation Al; *д* – Mg; *е* – oxygen

Таблица 5

Table 5

Результаты измерения микромеханических свойств композита
The results of measuring the micromechanical properties of the composite

Участок, рис. 7, а	HV 0,1					$h_{\max}$, мкм	E , ГПа	$E_{\text{упр}}$, ГПа	φ	C_{IT}
	1	2	3	4	Среднее					
<i>A</i>	100	62	112	83	89	8,1*	43,5*	38,4*	0,9*	0,52*
<i>B</i>	119	120	119	140	125	5,5**	68,8**	60,8**	0,8**	0,24**

* Расчеты проведены для участка *A* 2.

** Расчеты проведены для участка *B* 4.

Пора в центре, рис. 7, б, заполнена остатками смазки.

Единичные ячейки из сплава с содержанием магния около 4.5 масс. % представляют собой сотовую конструкцию, трещины заполнены оксидом алюминия Al_2O_3 и MgO (рис. 7, в–е). Скорее всего, их растрескивание произошло при брикетировании, хотя возможно повреждение на стадии измельчения.

Области композита, подобные отмеченному на рис. 7, а участку *B*, содержат магния в 3–4 раза больше по сравнению с основным материалом, вследствие чего количество частиц интерметаллида $Al_8FeMg_4Si_6$ существенно выше, и достигает значения 140 HV 0,1 (участок *B* 4, табл. 5). Соответственно меняются и значения нормального модуля упругости, показатели пластичности φ и ползучести C_{IT} этих участков ниже по сравнению с основным материалом (табл. 5).

Наличие частиц интерметаллидов в брикетированном алюминии следует учитывать как при его использовании, так и при выборе рационального режима прессования в валках. Ранее было показано, что частицы интерметаллидов, присутствующие во вторичном алюминии, не растворяются при выплавке легированных латуней [15]. В процессе кристаллизации они являются зародышевыми центрами для кристаллизации силицидов $(Fe,Mn)_5Si_3$. Это приводит не только к общему увеличению количества твердых частиц силицидов в легированных латунях, но и к укрупнению их размеров до нескольких миллиметров, что имеет наиболее негативные последствия. Такие крупные частицы являются причиной растрескивания заготовок в процессе технологических обработок, а также приво-

дят к износу инструмента при механической обработке. Такой же эффект интерметаллиды в брикетированном алюминии могут давать при выплавке алюминиевых или магниевых сплавов.

Выводы

Брикетирование алюминиевых сплавов методом прокатки в валках позволяет получать достаточно прочный композит за счет адгезионного взаимодействия между исходными фрагментами. Матрицей композита является алюминиевый сплав, а наполнителем – частицы оксидов Al_2O_3 , MgO и Si_2O , изначально присутствовавшие на поверхности исходных фрагментов. В алюминиевой матрице обнаружены частицы интерметаллидов $Al_8FeMg_3Si_6$ и $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$.

Средняя плотность композита составила 2160 ± 110 кг/м³, общая пористость не более 20 %. Поры сосредоточены главным образом на поверхности брикета ближе к передней кромке, которая в первую очередь подвергается деформации в валках. В центральной области брикета формируется плотный материал с единичными микропорами по границам исходных фрагментов.

Установлено, что приповерхностные поры заполнены остатками углеродсодержащей смазки. Отдельные частицы графита впредсоевались в алюминиевую основу и хаотично распределены по объему брикета, повышая среднее содержание углерода в материале до 8,2 масс. %, что положительно повлияет на дальнейшую переработку брикетов за счет протекания экзотермической реакции горения углерода.

Средняя твердость брикетированного алюминия составила 65 HV 0,1, что соответствует твердости исходного компактного алюминиевого сплава. Пористость снижает твердость до 30 HV 0,1. Показано, что брикетированный композит неоднороден по химическому составу: содержание магния меняется от 0,9 до 4,5 масс. %, марганца от 0,5 до 1,2 масс. %, кремния от 0,2 до 1,1 масс. %, железа от 0,2 до 0,7 масс. %. Соответственно меняется и значение микротвердости (от 62 до 140 HV 0,1), модуля нормальной упругости (от 43,5 до 60,8 ГПа), показатели пластичности φ уменьшаются незначительно – от 0,9 до 0,8, а $C_{\text{Л}}$ в 2 раза – от 0,52 до 0,24. Это следует учитывать при разработке технологических режимов брикетирования, последующей обработке давлением и резанием.

Список литературы

1. Ресурсосберегающая технология раскисления стали порошковой лентой из отсеков алюминиевой стружки / В.В. Парченко, Н.П. Мазаренко, А.Я. Бабанин, А.Н. Хомченко // *Электрометаллургия*. – 2007. – № 5. – С. 11–14.
2. Gronostajski J., Marsiniak H., Matuszak A. New methods of aluminium-alloy chips recycling // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – Vol. 106, iss. 1–3. – P. 34–39. – DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00634-8.
3. Сравнительный анализ технологий изготовления сварочной проволоки из эвтектического силумина с применением совмещенных методов обработки / Н.Н. Загиров, С.Б. Сидельников, Р.Е. Соколов, Ю.Н. Логинов // *Цветные металлы*. – 2017. – № 4. – С. 86–92. – DOI: 10.17580/tsm.2017.04.13.
4. Loginov Yu.N., Bourkine S.P., Babailov N.A. Cinematics and volume deformations during roll-press briquetting // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 118, N 1–3. – P. 151–157. – DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00880-9.
5. Мегахед М., Сабер Д., Агува М.А. Моделирование процесса механического изнашивания композитного Al-Si/Al₂O₃ материала с металлической матрицей // *Физика металлов и металловедение*. – 2019. – Т. 120, № 10. – С. 1072–1082. – DOI: 10.1134/S0015323019100085.
6. Effect of process parameters on the compressive strength of iron coke hot briquette / H.-T. Wang, M.-S. Chu, W. Zhao, Z.-G. Liu // *Dongbei Daxue Xuebao. Journal of Northeastern University*. – 2016. – Vol. 37, iss. 6. – P. 810–814. – DOI: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.06.011.
7. Применение валкового брикетирования для утилизации алюминиевого провода / Н.А. Бабайлов, Ю.Н. Логинов, Л.И. Полянский, Д.Н. Первухина // *Металлург*. – 2018. – № 8. – С. 5–8.
8. Shigehisa T., Nakagawa T., Yamamoto S. Briquetting of UBC by double roll press. Pt. 1: The application and limitations of the Johanson model // *Powder Technology*. – 2014. – Vol. 264. – P. 608–613. – DOI: 10.1016/j.powtec.2014.04.098.
9. Diez M.A., Alvarez R., Cimadevilla J.L.G. Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production // *Fuel*. – 2013. – Vol. 114. – P. 216–223. – DOI: 10.1016/j.fuel.2012.04.018.
10. Evaluation of the suitability of alternative binder to replace OPC for iron ore slime briquetting / S.K. Nath, Y. Rajshekar, T.C. Alex, T. Venugopalan, S. Kumar // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2017. – Vol. 70, iss. 8. – P. 2165–2174. – DOI: 10.1007/s12666-017-1038-5.
11. A novel technique for making cold briquettes for charging in blast furnace / M.K. Mohanty, S. Mishra, B. Mishra, S. Sarkar, S.K. Samal // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 115, iss. 1. – P. 012020. – DOI: 10.1088/1757-899X/115/1/012020.
12. El-Hussiny N.A., Shalabi M.E.H. A self-reduced intermediate product from iron and steel plants waste materials using a briquetting process // *Powder Technology*. – 2011. – Vol. 205, iss. 1–3. – P. 217–223. – DOI: 10.1016/j.powtec.2010.09.017.
13. Wan B., Chen W., Lu T. Review of solid state recycling of aluminum chips // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2017. – Vol. 125. – P. 37–47. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.06.004.
14. Shamsudin S., Lajis M., Zhong Z.W. Evolutionary in solid state recycling techniques of aluminium // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 40. – P. 256–261. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.01.117.
15. Пугачева Н.Б. Структура промышленных $\alpha+\beta$ -латуней // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2007. – № 2 (620). – С. 23–29.
16. Zhang G.-H., Chou K.-C. Deoxidation of molten steel by aluminum // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2015. – Vol. 22, iss. 10. – P. 905–908. – DOI: 10.1016/S1006-706X(15)30088-1.
17. Structure and thermophysical properties of aluminum-matrix composites / N.B. Pugacheva, N.S. Michurov, E.I. Senaeva, T.M. Bykova // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2016. – Vol. 117, iss. 11. – P. 1144–1151. – DOI: 10.7868/S0015323016110115.

18. A computational model of V95/SiC (7075/SiC) aluminum matrix composite applied to stress-strain state simulation under tensile, compressive and shear loading conditions / S.V. Smirnov, A.V. Kononov, M.V. Myasnikova, Yu.V. Khalevitsky, A.S. Smirnov, A.S. Igumnov // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2017. – Iss. 6. – P. 16–27. – DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.016-027.

19. Диаграмма предельной пластичности металломатричного композита B95 / SiC с содержанием ча-

стиц SiC 10 об. % при околосolidусной температуре / Д.И. Вичужанин, С.В. Смирнов, А.В. Нестеренко, А.С. Игумнов // *Письма о материалах*. – 2018. – Т. 8, № 1 (29). – С. 88–93. – DOI: 10.22226/2410-3535-2018-1-88-93.

20. Белов Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов. – М.: Изд. дом МИСиС, 2009. – 234 с. – ISBN 978-5-87623-213-7.

21. Беляев А.И. Металлургия легких металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



The Structure, Phase Composition and Micromechanical Properties of Briquetted Aluminum

Nataliya Pugacheva^{1, a}, Nikolay Babailov^{1, b}, Tatiana Bykova^{1, c, *}, Yury Loginov^{2, 3, d}

¹ Institute of Engineering Science, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya str., Yekaterinburg, 620049, Russian Federation

² M.N. Miheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 18 S. Kovalevskaya str., Yekaterinburg, 620990, Russian Federation

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira str., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>,  nat@imach.uran.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-6245-2841>,  n.a.babailov@urfu.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-8888-6410>,  tatiana_8801@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>,  j.n.loginov@urfu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 June 2020

Revised: 14 July 2020

Accepted: 07 August 2020

Available online: 15 September 2020

Keywords:

Aluminum alloy

Briquetting

Composite

Solid solution

Intermetallic compounds

X-ray microanalysis

Microhardness

Instrumental microindentation

Funding

The work was performed on the equipment of the Plastometriya TsKP IMASH UB RAS in accordance with the state task on the topic No. AAAA-A18-118020790140-5.

ABSTRACT

Introduction. The technology of roll briquetting is successfully used for the disposal of waste aluminum alloys for the purpose of subsequent use in metallurgical production during deoxidation and alloying of steels, in aluminothermy, for the production of non-ferrous alloys, as well as in the manufacture of welding electrodes. The received blanks are required to maintain its integrity during loading and unloading and transportation. This is ensured by the selection of effective pressing modes that ensure the minimum porosity. In addition, it is practically interesting to develop a technology for additional processing of briquettes by pressure and cutting, for example, for the formation of welding electrodes. **The purpose of the work** is to study the chemical and phase compositions of briquetted aluminum, to determine the nature of the distribution of microhardness and micromechanical properties over the briquette cross section. **Research methods:** measurement of microhardness and porosity, scanning electron microscopy and micro-X-ray spectral analysis, instrumental microindentation. **Results and Discussion.** It is found that briquetted aluminum is a composite material with an aluminum matrix, the filler is particles of oxides Al_2O_3 , MgO , SiO_2 and graphite, which got into the material from the lubricant used when rolling the briquette in roller presses. Dispersed particles of intermetallic compounds $Al_8FeMg_4Si_6$ and $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si$, which are hardening phases, are unevenly distributed in the aluminum matrix. The average density of the composite is 2160 kg/m^3 , the total porosity is no more than 20%. The central part of the briquetted cell with a hardness of 65 HV 0.1 is dense and does not contain pores. The pores are presented near the surface and have dimensions of 0.1–0.3 mm, which reduces the hardness to 30 HV 0.1. Some areas of the composite are distinguished by higher values of microhardness (up to 140 HV 0.1) and normal modulus of elasticity, as compared to the base material, and a decrease in plasticity and creep indicators. Uneven distribution of micromechanical properties should be taken into account both when developing briquetting technology and additional pressure treatment, as well as when choosing a cutting method.

For citation: Pugacheva N.B., Babailov N.A., Bykova T.M., Loginov Y.N. The structure, phase composition and micromechanical properties of briquetted aluminum. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 82–94. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-82-94. (In Russian).

References

1. Parchenko V.V., Matsarenko N.P., Babanin A.Ya., Khomchenko A.N. Resursosberegayushchaya tekhnologiya raskisleniya stali poroshkovoi lentoi iz otsevvov alyuminievoi struzhki [Resource-saving technology for the deoxidation of steel by powder tape from screenings of aluminum chips]. *Elektrometallurgiya = Electrometallurgy*, 2007, no. 5, pp. 11–14.
2. Gronostajski J., Marsiniak H., Matuszak A. New methods of aluminum-alloy chips recycling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, vol. 106, iss. 1–3, pp. 34–39. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00634-8.

* Corresponding author

Bykova Tatiana M., Ph.D. (Engineering), Scientific associate
 Institute of Engineering Science, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
 34 Komsomolskaya st.,
 620049, Yekaterinburg, Russian Federation
Tel.: 8 (343) 362-30-43, **e-mail:** tatiana_8801@mail.ru

3. Zagirov N.N., Sidelnikov S.B., Sokolov R.E., Loginov Yu.N. Sravnitel'nyi analiz tekhnologii izgotovleniya svarочноi provoloki iz evtekticheskogo silumina s primeneniem sovmeshchennykh metodov obrabotki [Comparative analysis of technologies for the manufacture of welding wire from eutectic silumin using combined processing methods]. *Tsvetnye Metally = Non-Ferrous Metals*, 2017, no. 4, pp. 86–92. DOI: 10.17580/tsm.2017.04.13.
4. Loginov Yu.N., Bourkine S.P., Babailov N.A. Cinematics and volume deformations during roll-press briquetting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, vol. 118, no. 1–3, pp. 151–157. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00880-9.
5. Megahed M., Saber D., Aguva M.A. Modelirovanie protsessa mekhanicheskogo iznashivaniya kompozitnogo Al-Si/Al₂O₃ materiala s metallicheskoj matritsei [Modeling of the mechanical wear process of a composite Al-Si/Al₂O₃ material with a metal matrix]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120, no. 10, pp. 1072–1082. DOI 10.1134/S0015323019100085. (In Russian).
6. Wang H.-T., Chu M.-S., Zhao W., Liu Z.-G. Effect of process parameters on the compressive strength of iron coke hot briquette. *Dongbei Daxue Xuebao. Journal of Northeastern University*, 2016, vol. 37, iss. 6, pp. 810–814. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.2016.06.011.
7. Babailov N.A., Loginov Yu.N., Polyansky L.I., Pervukhina D.N. Primenenie valkovogo briketirovaniya dlya utilizatsii alyuminievogo provoda [Use of roll briquetting for aluminum wire utilization]. *Metallurg = Metallurgist*, 2018, no. 8, pp. 5–8. (In Russian).
8. Shigehisa T., Nakagawa T., Yamamoto S. Briquetting of UBC by double roll press. Pt. 1: The application and limitations of the Johanson model. *Powder Technology*, 2014, vol. 264, pp. 608–613. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.04.0.098.
9. Diez M.A., Alvarez R., Cimadevilla J.L.G. Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production. *Fuel*, 2013, vol. 114, pp. 216–223. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.04.018.
10. Nath S.K., Rajshekar Y., Alex T.C., Venugopalan T., Kumar S. Evaluation of the suitability of alternative binder to replace OPC for iron ore slime briquetting. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, vol. 70, iss. 8, pp. 2165–2174. DOI: 10.1007/s12666-017-1038-5.
11. Mohanty M.K., Mishra S., Mishra B., Sarkar S., Samal S.K. A novel technique for making cold briquettes for charging in blast furnace. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 115, iss. 1, p. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/115/1/012020.
12. El-Hussiny N.A., Shalabi M.E.H. A self-reduced intermediate product from iron and steel plants waste materials using a briquetting process. *Powder Technology*, 2011, vol. 205, iss. 1–3, pp. 217–223. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.09.017.
13. Wan B., Chen W., Lu T. Review of solid state recycling of aluminum chips. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, vol. 125, pp. 37–47. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.06.004.
14. Shamsudin S., Lajis M., Zhong Z.W. Evolutionary in solid state recycling techniques of aluminum. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 40, pp. 256–261. DOI: 10.1016/j.procir.2016.01.117.
15. Pugacheva N.B. Struktura promyshlennykh $\alpha + \beta$ -latunei [Structure of industrial $\alpha + \beta$ – brasses]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2007, no. 2 (620), pp. 23–29. (In Russian).
16. Zhang G.-H., Chou K.-C. Deoxidation of molten steel by aluminum. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2015, vol. 22, iss. 10, pp. 905–908. DOI: 10.1016/S1006-706X(15)30088-1.
17. Pugacheva N.B., Michurov N.S., Senaeva E.I., Bykova T.M. Structure and thermophysical properties of aluminum-matrix composites. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, iss. 11, pp. 1144–1151. DOI: 10.7868/S0015323016110115.
18. Smirnov S.V., Konovalov A.V., Myasnikova M.V., Khalevitsky Yu.V., Smirnov A.S., Igumnov A.S. A computational model of V95/SiC (7075/SiC) aluminum matrix composite applied to stress-strain state simulation under tensile, compressive and shear loading conditions. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 6, pp. 16–27. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.016-027.
19. Vichuzhanin D.I., Smirnov S.V., Nesterenko A.V., Igumnov A.S. Diagramma predel'noi plastichnosti metallo-matrichnogo kompozita V95 / SiC s soderzhaniiem chastits SiC 10 ob. % pri okolosolidusnoi temperature [A fracture locus for a 10 volume-percent B95 / SiC metal matrix composite at the near-solidus temperature]. *Pis'ma o materialakh = Letters on Materials*, 2018, vol. 8, no. 1 (29), pp. 88–93. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-1-88-93.
20. Belov N.A. *Fazovyi sostav alyuminievykh splavov* [Phase composition of aluminum alloys]. Moscow, MISiS Publ., 2009. 234 p. ISBN 978-5-87623-213-7.
21. Belyaev A.I. *Metallurgiya legkikh metallov* [Metallurgy of light metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 368 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).