



Научная статья

УДК 546.881.3:54.03

DOI: 10.52957/2782-1900-2026-7-2-55-66

## МЕХАНОХИМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРОДУКТЫ ДРОБЕМЕТНОЙ ОЧИСТКИ СЛИТКОВ ЛИГАТУР V-AL С ЦЕЛЬЮ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ Al

М.Н. Бакланов<sup>1\*</sup>, Д.А. Еселевич<sup>1</sup>, В.Г. Шевченко<sup>1</sup>, С.В. Кобяков<sup>2</sup>,  
Н.А. Попов<sup>1</sup>

Максим Николаевич Бакланов, без уч. ст.; Данил Александрович Еселевич, к.х.н.; Владимир Григорьевич Шевченко, д.х.н.; Станислав Вадимович Кобяков, без уч. ст.; Николай Александрович Попов, к.х.н.

<sup>1</sup> Институт химии твердого тела УрО РАН, 620077, Россия, г. Екатеринбург, Первомайская, 91;

<sup>2</sup> Уральский Федеральный Университет им. Б.Н. Ельцина, 620062, Россия, г. Екатеринбург, Мира, 19.

baklanov\_mn@vsmpo-avisma.ru, diablohulk@gmail.com, shevchenko@ihim.uran.ru, pipupgradepip@mail.ru, n168@mail.ru

### Ключевые слова:

алюминий, аморфизация, пыль дробеметная, дисперсно-упрочненный композит, реакционная способность

**Аннотация.** В работе демонстрируется эффективная возможность использования отходов (пыли дробеметной) производства лигатур системы V-Al для создания дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе алюминия. Проведен анализ химического, фазового и гранулометрического состава пыли от лигатур марок ВнАл-65 и ВнАл-1. С целью повышения реакционной способности пыль дробеметную (ПД) подвергали механоактивации в планетарной мельнице с установлением оптимального времени обработки, что позволило значительно уменьшить средний размер частиц до ~ 8 мкм с увеличением удельной их поверхности в несколько раз и вызвать аморфизацию  $Al_2O_3$ . Методами РФА анализа и электронной микроскопии показано, что в процессе спекания смесей ( $Al+ПД_{ВнАл-65}$ ,  $Al+ПД_{ВнАл-1}$ ) образуется композиционный материал, в котором равномерно распределены в алюминиевой матрице, представляющей из себя твердый раствор V в Al, упрочняющие интерметаллиды ( $Al_3V$ ,  $Al_{23}V_4$  и  $Fe_4Al_{13}$ ).

### Для цитирования:

Бакланов М.Н., Еселевич Д.А., Шевченко В.Г., Кобяков С.В., Попов Н.А. Механохимическое воздействие на продукты дробеметной очистки слитков лигатур V-Al с целью их использования для синтеза композитов на основе Al // От химии к технологии шаг за шагом. 2026. Т. 7, вып. 2. С. 55-66. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/7273/view>

### Введение

На АО «Уралредмет» образуется и накапливается дисперсная пыль после фильтрации в вентиляционной системе дробеметных установок при производстве лигатур для титановых сплавов, которые используются при изготовлении деталей



авиакосмической промышленности, оборонной техники, судостроения и химического машиностроения [1]. Продукты дробеметной очистки лигатур в дальнейшем не находят применения и не утилизируются. Из-за отсутствия комплексных технологий их переработки для дальнейшего вовлечения в производство и возможностей предприятий осваивать более глубокие переделы, промпродукт не находит широкого применения на отечественных металлургических предприятиях [2].

С одной стороны, переработка дисперсных промпродуктов, их переплав – сложные технологические этапы при вовлечении отходов в процесс производства качественных лигатур, сплавов и специальных добавок. Задача усложняется переменным составом и металлургическими свойствами пыли, а также взрыво- и пожароопасностью. Перечисленное касается и процесса переработки дисперсного материала из фильтровальной установки после зачистки слитков лигатур различного состава в дробеметах на АО «Уралредмет».

С другой стороны, продукты обработки слитков лигатур (V, Mo, Ti с Al) могут найти применение в изготовлении новых композиционных сплавов и материалов из-за достаточно высокого содержания в них интерметаллидов. Например, в работе [3] получен композиционный сплав системы Al-V, где алюминий выступает в роли матрицы, а интерметаллид  $Al_3V$  – армирующий компонент.

Исходное состояние порошковой смеси важно для управления процессами реакционного спекания компонентов системы Al-V. Механоактивация за счет обработки порошков в высокоэнергетических атриторах является методом интенсификации технологических процессов получения материалов [4, 5]. В ходе нее происходит уменьшение размера частиц и увеличение их удельной поверхности, смешивание и накопление структурных дефектов в кристаллической решетке, образование химических соединений, как было показано ранее, например, при синтезе композиционного материала на основе алюминиево-ванадиевого сплава [6]. В работе [7] отмечается, что эффективность механоактивации зависит от типа мельницы, энергонапряженности процесса и времени обработки. Например, чрезмерное измельчение может привести к сварке частиц и образованию трудноразделимых агломератов (эффект механоспаивания) [5]. Поэтому поиск оптимума режимов размолла будет способствовать эффективности последующего синтеза функционального материала.

Современные тенденции в мировой металлургии демонстрируют смещение фокуса в сторону устойчивого развития и циркулярной экономики, где переработка техногенных отходов становится одной из важнейших для сохранения ресурсной базы и снижения экологической нагрузки [8]. В России, на примере ГМК «Норильский никель», уже реализуются успешные проекты по рециклингу отвалных продуктов металлургического производства, подтверждая эффективность вовлечения вторичного сырья в хозяйственный оборот [9].

Исследования, выполненные нами ранее в [10], подтвердили принципиальную возможность использования пыли дробеметной от лигатуры V-Al в качестве исходного сырья для получения алюмоматричного композита. Однако для оптимизации состава и структуры конечных материалов требуется детальное изучение влияния фракционного состава пыли дробеметной (ПД), режимов механоактивации и термической обработки.



Цель настоящей работы – оптимизация способа использования дисперсных отходов (пыли дробеметной), образующихся при производстве лигатур системы V-Al, для получения композитных материалов на основе алюминия с высокими функциональными свойствами. Задачи исследования: анализ химического, фазового и гранулометрического состава пыли дробеметной от лигатур ВнАл-1 и ВнАл-65; изучение влияния механоактивации (измельчение в планетарной мельнице) на морфологию, дисперсность и фазовый состав частиц пыли; оптимизация метода синтеза новых композиционных материалов с использованием пыли дробеметной и установление закономерностей упрочнения алюминиевой матрицы при спекании.

### **Методы исследования и подготовки образцов**

Для исследования использовалась пыль дробеметная от лигатур марок ВнАл-65 с высоким содержания ванадия (65 масс. %) и ВнАл-1 (V - 70 масс. %).

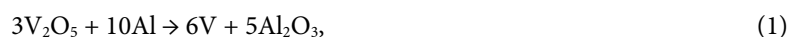
Исследование фазового состава образцов (исходного ПД и синтезированных композитов) выполнено с помощью рентгеновского порошкового дифрактометра STADI-P (STOE, Germany) в  $\text{CuK}\alpha 1$ -излучении с использованием библиотеки рентгеноструктурных данных РФС-2 (Release 2009). Количественный фазовый анализ произведен методом Ритвельда с использованием программы MAUD (Material Analysis Using Diffraction) [11]. Для изучения морфологии поверхности частиц порошковых смесей и спеченных материалов использовался аналитический сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA Compact LMH (s5121) с энергодисперсионным рентгеновским анализатором (EDX).

Определение гранулометрического состава осуществлялось на лазерном анализаторе «Horiba LA 950» (Horiba, Japan) методом рассеяния и детектирования отраженного/преломленного лазерного света. Химический анализ выполнен методом атомной эмиссии на спектроанализаторе с индуктивно связанной плазмой JY-48. Удельная площадь поверхности частиц пыли оценивалась методом низкотемпературной десорбции азота (метод БЭТ) на автоматическом анализаторе TriStar 3000 (Micromeritics, USA).

Для уменьшения размера дисперсных частиц ПД и увеличения их реакционной способности осуществлялось измельчение в планетарно-центробежной мельнице ГЕФЕСТ-2. В качестве материала футеровки барабанов, а также мелющих шаров диаметром 5 мм, использовался оксид циркония. Последующее таблетирование осуществлялось на ручном гидравлическом прессе ПГД-400 с усилием 7 тн (давление 180 бар) в пресс-форме диаметром 10 мм. После чего образцы спекались в лабораторной печи под вакуумом  $3 \cdot 10^{-4}$  Па при избыточном давлении  $\text{Ar } 151$  кПа при температуре  $750$  °С с выдержкой 30 мин Твердость отожженных образцов изучалась по Виккерсу на микротвердометре ПМТ-3М с приложенной нагрузкой 0.1 кг.

### **Материалы и их характеристики**

Производство лигатур системы V-Al основано на экзотермической реакции алюмотермического восстановления оксидов металлов восстановителем по следующим реакциям [12, 13]:



В результате, из шихтового материала в футерованном тигле получается плотный слиток, в верхнем слое которого располагается шлак ( $Al_2O_3$ ).

По данным [14] лигатура представляет собой интерметаллид  $V_3Al$  с гексагональной структурой, который присутствует на равновесной диаграмме состояния системы V-Al [13]. Для удаления с поверхности слитка шлаковых включений и оксидных пленок используется автоматизированная зачистка в дробеметной установке. В качестве абразивного материала выступает дробь стальная колотая крупностью 0.5-0.7 мм. На стадии дробеструйной зачистки в пылеулавливающем фильтре накапливается большое количество дисперсного материала - ПД.

Как отмечалось во введении, ПД не участвует в дальнейшем (вторичном) производственном цикле, не перерабатывается. Ввиду дороговизны рециклинга хранится на складах предприятия и считается отходом. По заводским анализам элементного состава в пыли дробеметной выявлено содержание компонентов на основе ванадия, алюминия и железа. Количество образующихся отходов достигает 500-1000 кг ежемесячно.

На рис. 1 продемонстрирована морфология пыли дробеметной от лигатур ВнАл-65 (а) и ВнАл-1 (б).

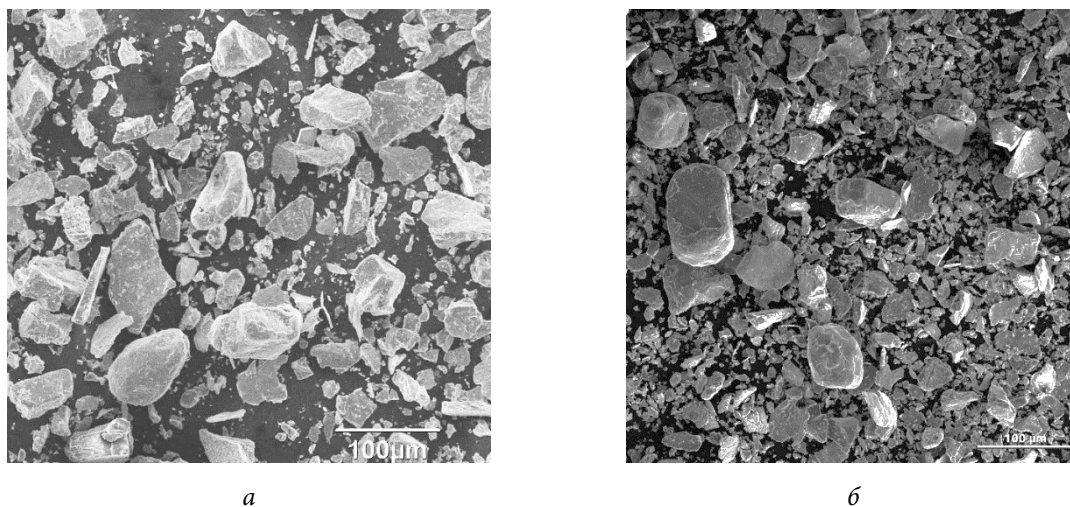
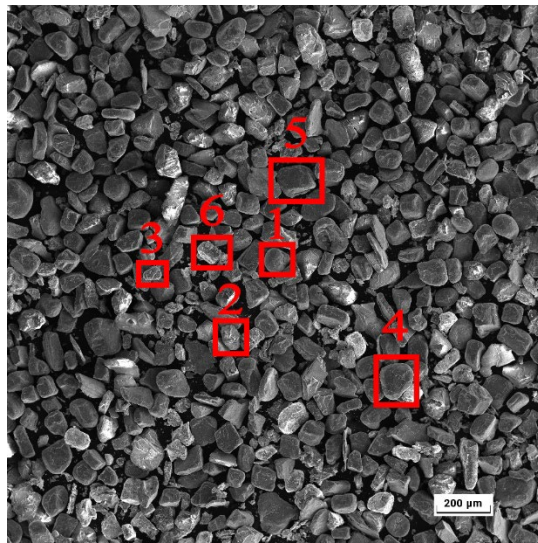


Рис. 1. Микрофотографии ПД лигатур: а) – ВнАл-65; б) – ВнАл-1.

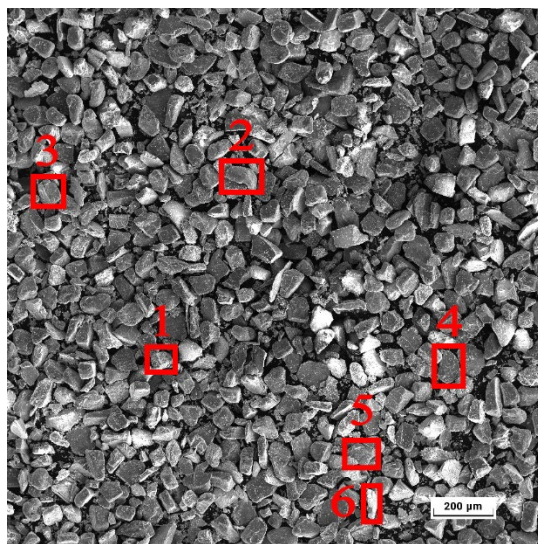
Видно, что наряду с большим количеством мелких фракций пыли, имеются частицы с размерами более нескольких десятков микрометров. В обоих случаях они имеют неправильную, осколочную форму с развитой шероховатой поверхностью. Для крупных частиц характерно пластинчатое строение.

Для более подробного морфологического анализа распределения компонентов ПД в зависимости от их химического состава и размера был произведен отсев промпродукта через сита (размер ячейки: 0.063 мм, 0.04 мм) с разделением частиц на фракции: больше 63 мкм, от 40 до 63 мкм и меньше 40 мкм. На рис. 2 и 3 представлены результаты отсева пыли дробеметной от обеих лигатур с EDX анализом.

*a*

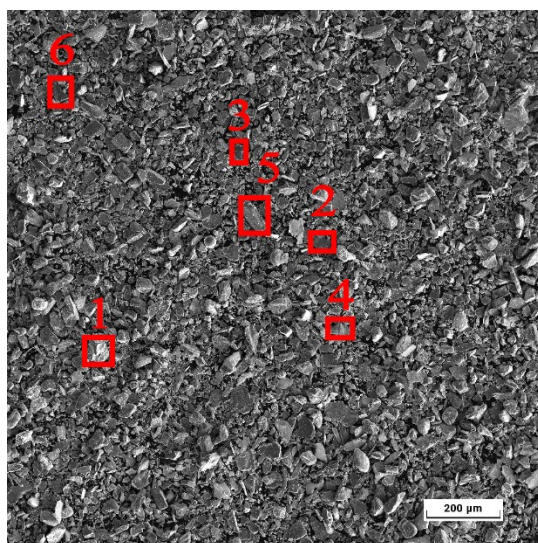
Области EDX анализа (масс. %):

- 1) – 4.2 Al, 4.7 O, 1.9 V, 89.3 Fe;
- 2) – 49.8 Al, 47.5 O, 0.8 V, 2 Fe;
- 3) – 21.7 Al, 13.8 O, 61.9 V, 2.6 Fe;
- 4) – 16.7 Al, 10.3 O, 60.3 V, 12.7 Fe;
- 5) – 13.7 Al, 9.8 O, 72.9 V, 3.6 Fe;
- 6) – 18.2 Al, 18.7 O, 59.6 V, 3.5 Fe.

*б*

Области EDX анализа (масс. %):

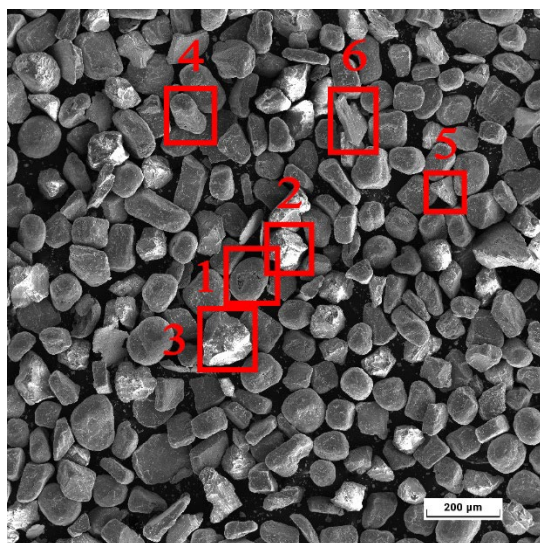
- 1) – 45.9 Al, 37.6 O, 3.1 V, 13.4 Fe;
- 2) – 5.2 Al, 4.9 O, 4.5 V, 85.4 Fe;
- 3) – 23 Al, 7.7 O, 65.8 V, 3.5 Fe;
- 4) – 26.1 Al, 7.3 O, 65.2 V, 1.4 Fe;
- 5) – 23.3 Al, 6.6 O, 65 V, 5.2 Fe;
- 6) – 6.3 Al, 5.5 O, 3.7 V, 84.5 Fe.

*в*

Области EDX анализа (масс. %):

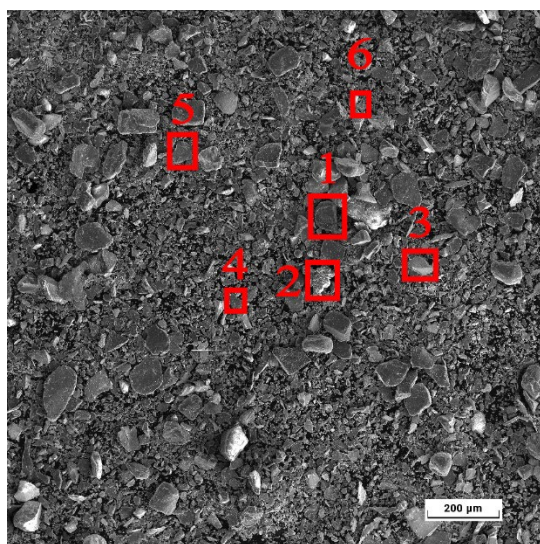
- 1) – 38.3 Al, 46.2 O, 11.8 V, 3.7 Fe;
- 2) – 1.1 Al, 0.7 O, 1.4 V, 96.8 Fe;
- 3) – 28.7 Al, 4.9 O, 64.1 V, 2.3 Fe;
- 4) – 2.6 Al, 1.8 O, 3.8 V, 91.8 Fe;
- 5) – 17.8 Al, 9.5 O, 68.4 V, 4.2 Fe;
- 6) – 18.4 Al, 9.2 O, 70.9 V, 1.5 Fe.

**Рис. 2.** Морфология и EDX анализ рассева частиц пыли дробеметной от лигатуры ВнАл-65 в зависимости от фракции: а) > 63 мкм; б) 40 - 63 мкм; в) < 40 мкм.

*a*

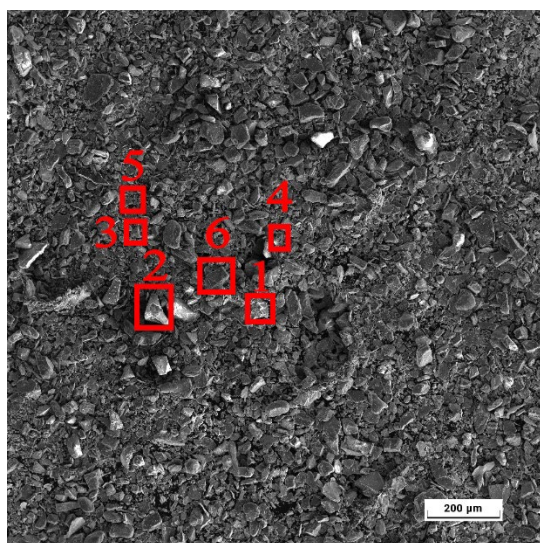
Области EDX анализа (масс. %):

- 1) – 2.7 Al, 2.7 O, 4.1 V, 90.5 Fe;
- 2) – 49.4 Al, 47 O, 1.5 V, 2.1 Fe;
- 3) – 54.9 Al, 33.2 O, 1.6 V, 10.3 Fe;
- 4) – 15.5 Al, 16.3 O, 47.3 V, 20.9 Fe;
- 5) – 46.1 Al, 47.6 O, 2 V, 4.4 Fe;
- 6) – 20.7 Al, 25.3 O, 32.4 V, 21.6 Fe.

*б*

Области EDX анализа (масс. %):

- 1) – 26.2 Al, 5.8 O, 65.2 V, 2.8 Fe;
- 2) – 47.4 Al, 41.5 O, 3.4 V, 7.6 Fe;
- 3) – 44.8 Al, 44 O, 3.7 V, 7.5 Fe;
- 4) – 3.7 Al, 5 O, 3.1 V, 88.1 Fe;
- 5) – 3.1 Al, 4.4 O, 3.7 V, 88.9 Fe;
- 6) – 49.5 Al, 42.5 O, 1.9 V, 6.1 Fe.

*в*

Области EDX анализа (масс. %):

- 1) – 58.2 Al, 36.7 O, 2.2 V, 2.9 Fe;
- 2) – 56.1 Al, 42.5 O, 0.5 V, 0.9 Fe;
- 3) – 27.4 Al, 8.9 O, 59.1 V, 4.6 Fe;
- 4) – 46.7 Al, 44.8 O, 3.4 V, 5.2 Fe;
- 5) – 5.7 Al, 6 O, 4.2 V, 84.1 Fe;
- 6) – 6.7 Al, 9.2 O, 67.8 V, 16.3 Fe.

**Рис. 3.** Морфология и EDX анализ рассева частиц пыли дробеметной от лигатуры ВнАл-1 в зависимости от фракции: а) > 63 мкм; б) 40 - 63 мкм; в) < 40 мкм.



Рентгенофазовый анализ ПД лигатуры марки ВнАл-65 (рис. 4а) показал, что она представляет собой механическую смесь состава: 50 масс. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 38 масс. %  $\text{V}_3\text{Al}$ , 8 масс. % Fe и 4 масс. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . В случае ВнАл-1 он представлен в следующем виде: 47 масс. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 42 масс. %  $\text{V}_3\text{Al}$ , 8 масс. % Fe и 3 масс. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (рис. 4б).

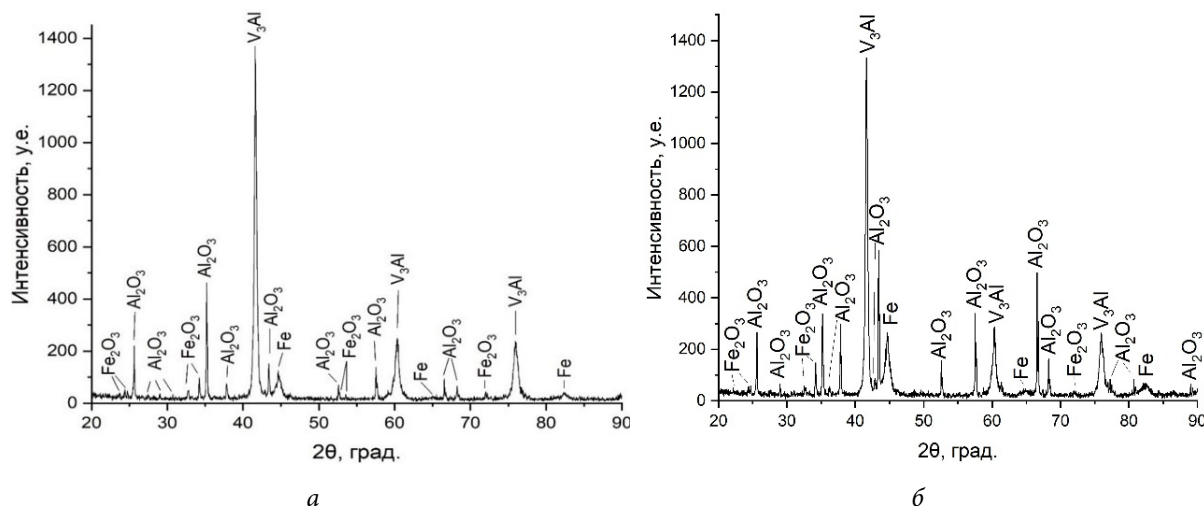


Рис. 4. Дифрактограммы ПД от лигатур ВнАл.65 (а) и ВнАл-1 (б).

Химический анализ ПД лигатуры ВнАл-65 показал содержание V – 34.3 масс. %, Fe – 10.7 масс. %, O – 22.3 масс. %, Al – 32.2 масс. % и сопутствующие примеси на уровне нескольких сотых процента. В случае ВнАл-1: V – 38.5 масс. %, Fe – 10.1 масс. %, Al – 31.1 масс. %, O – 19.8 масс. % и прочие примеси в аналогичном количестве.

По аналогии с изучением морфологии частиц при помощи электронного микроскопа в зависимости от фракции частиц (рис. 2, 3) произведен РФА анализ распределения фаз в составе ПД от лигатур ВнАл-65 и ВнАл-1 после ее рассева (таблица 1).

Таблица 1. Фракционный и рентгеновский состав до и после рассева.

Размер фракции ПД, мкм	Содержание фракций после рассева, %	$\text{V}_3\text{Al}$ , масс. %	$\text{Al}_2\text{O}_3$ , масс. %	Fe, масс. %	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ , масс. %
ВнАл-65					
Исходный	100	38	50	8	4
< 40	71.4	32	63	3	2
40 - 63	10.2	28	66	4	2
> 63	18.4	25	67	6	2
ВнАл-1					
Исходный	100	42	47	8	3
< 40	72.1	36	60	3	1
40 - 63	11.6	32	63	4	1
> 63	16.3	29	64	6	1

Как видно из таблицы 1 и рис. 2 и 3, основное содержание в ПД<sub>ВнАл-65</sub> частиц с фракцией размером < 40 мкм составляет 71.4%, присутствуют более крупные (> 63 мкм) в количестве 18.4%. Рентгенофазовый анализ показал рост составляющей  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с увеличением крупности частиц примерно на 25% при одновременном уменьшении количества интерметаллида  $\text{V}_3\text{Al}$ . В случае ПД<sub>ВнАл-1</sub> наблюдается схожая закономерность.



Преимущественно в этой смеси частиц с размером  $< 40$  мкм содержится около 72.1%, более крупных ( $> 63$  мкм) – 16.3%. Количество  $Al_2O_3$  так же возрастает с увеличением крупности частиц при снижении содержания  $V_3Al$ .

### Экспериментальные результаты

С целью уменьшения размера частиц и увеличения их реакционной активности ПД от лигатур ВнАл-1 и ВнАл-65 подвергали измельчению в планетарно-центробежной мельнице. Размол осуществлялся со скоростью 1300 об/мин в четырех временных режимах: 10, 30, 60 и 120 мин. Средний размер исходных частицы пыли дробебетной от каждой из лигатур составлял около 16 мкм. В таблице 2 представлены результаты изучения влияния продолжительности размола на средний размер частиц на примере пыли дробебетной от лигатуры ВнАл-1.

**Таблица 2.** Влияние времени механоактивации на средний размер частиц ПД<sub>ВнАл-1</sub>.

Время измельчения, мин	Средний размер частиц, мкм
0	16.0
10	10.0
30	9.5
60	7.8
120	10.0

Как видно из таблицы 2, эффективность измельчения образцов ПД<sub>ВнАл-1</sub> достигается при времени их обработки в течение 60 мин. В этом случае средний размер частиц доходит до уровня  $\sim 7.8$  мкм при возрастании удельной поверхности практически в 6.5 раз ( $S_{уд,0} = 0.2925$ ;  $S_{уд,60} = 1.9048$ ). Увеличение же времени обработки до 120 мин приводит к обратному эффекту – росту среднего размера до  $\sim 10.0$  мкм из-за слипания частиц. В случае ПД от лигатуры ВнАл-65 наблюдается схожая картина. Оптимальное время размола составило 60 мин, при котором средний размер частиц достиг значения 8 мкм при изменении удельной поверхности от 0.3561 до 1.8834 м<sup>2</sup>/г.

Рентгенофазовый анализ показал, что при механохимической активации происходит изменение содержания компонентов в смеси ПД<sub>ВнАл-1</sub>. Если до измельчения, как было отмечено ранее на рис. 4б:  $Al_2O_3$  - 47 масс. %,  $V_3Al$  - 42 масс. %, Fe - 8 масс. %,  $Fe_2O_3$  - 3 масс. %, то после дробления:  $Al_2O_3$  - 32 масс. %,  $V_3Al$  - 52 масс. %, Fe - 10 масс. %,  $Fe_2O_3$  - 6 масс. %. Видно, что содержание  $Al_2O_3$  уменьшилось более чем на 30 %. Это объясняется тем, что при высокоэнергетическом воздействии на поверхности частиц образуется тонкий слой аморфного оксида алюминия, то есть происходит процесс аморфизации  $Al_2O_3$  [5; 15]. Одновременно с этим на дифрактограмме фиксируется увеличение интенсивности пиков от  $Fe_2O_3$ , Fe и интерметаллида  $V_3Al$ . В случае ПД<sub>ВнАл-65</sub> наблюдается схожая закономерность. Если в начальный момент (до измельчения, рис. 4а) фазовый состав был выражен в виде:  $Al_2O_3$  - 50 масс. %,  $V_3Al$  - 38 масс. %, Fe - 8 масс. %,  $Fe_2O_3$  - 4 масс. %, то после дробления:  $Al_2O_3$  - 35 масс. %,  $V_3Al$  - 46 масс. %, Fe - 12 масс. %,  $Fe_2O_3$  - 7 масс. %.

Следующим шагом был синтез композиционного материала. Для этого подготовлены смеси, содержащие 5% ПД<sub>ВнАл-1</sub> (до и после измельчения) и 95% Al в виде порошка марки АПЖ. Алюминиевый порошок марки АПЖ имеет сферическую,



каплевидную форму с гладкой поверхностью, характерную для порошков, полученных методом распыления инертным газом. Средний размер его частиц составляет порядка 52.5 мкм, при удельной поверхности - 0.19 м<sup>2</sup>/г. Эти составы спрессовывались в таблетки диаметром 10 мм, толщиной 6 мм и массой 2 г, а затем спекались в вакуумной печи при 750 °С в аргоне с выдержкой 30 мин. Рентгенофазовый анализ спеченных образцов показал, что полученный материал из неизмельченного ПД<sub>ВнАл-1</sub> состоит из 88 масс. % Al, 9 масс. % Al<sub>23</sub>V<sub>4</sub>, 2 масс. % Al<sub>3</sub>V и 1 масс. % Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub>. Образец с размолотым ПД<sub>ВнАл-1</sub> повлиял на количество идентифицированных фаз: 85 масс. % Al, 10 масс. % Al<sub>23</sub>V<sub>4</sub>, 3 масс. % Al<sub>3</sub>V и 2 масс. % Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub>. В обоих случаях кристаллических оксидных фаз не обнаружено.

В случае синтеза композиционного материала в аналогичных условиях из смесей АПЖ и ВнАл-65 (до и после размола) РФА анализ показал схожие результаты с образцами Al+ПД<sub>ВнАл-1</sub>, лишь незначительно отличающиеся в количественном эквиваленте: без дробления - 89 масс. % Al, 8 масс. % Al<sub>23</sub>V<sub>4</sub>, 1 масс. % Al<sub>3</sub>V и 2 масс. % Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub>; после дробления - 87 масс. % Al, 9 масс. % Al<sub>23</sub>V<sub>4</sub>, 2 масс. % Al<sub>3</sub>V и 2 масс. % Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub>. Таким образом, введение ПД после размола влияет на снижение содержания Al, Al<sub>3</sub>V, и увеличение количества Al<sub>23</sub>V<sub>4</sub> и Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> в композите, что указывает на повышение реакционной способности пыли дробебетной за счет механоактивации.

Отсутствие в структуре спеченных образцов Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, объясняется тем, что во время синтеза происходит термитная реакция жидкого алюминия с оксидом железа [16]:



Металлическое железо, прореагировав с жидким алюминием, образует интерметаллид состава Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> [17, 18]. Это также хорошо согласуется с общими принципами переработки железосодержащих отходов цветной металлургии. Как отмечено в обзоре [18], комбинированные пиро-гидрометаллургические методы позволяют эффективно извлекать железо из шлаков и переводить его в ценные соединения. В нашем случае, термитная реакция (3) и последующее взаимодействие железа с алюминием (4) демонстрирует реализацию схожего подхода при твердофазном синтезе, что и у авторов [19]. Также измельчение ПД заметно повлияло и на процессы фазообразования композитов: переход при температуре 750 °С интерметаллида V<sub>3</sub>Al (перитектическая T<sub>образования</sub> 1360 °С) в Al<sub>23</sub>V<sub>4</sub> (перитектическая T<sub>образования</sub> 736 °С), т.е. прошел процесс растворения V<sub>3</sub>Al в Al. Взаимодействие на границах раздела фаз (V<sub>3</sub>Al/ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Al) способствует формированию гетерогенной структуры материала.

На рис. 5 представлены микрофотографии поверхности композитов Al+ПД<sub>ВнАл-1</sub> (а) и Al+ПД<sub>ВнАл-65</sub> (б) после обработки.

Видно, что в алюминиевой матрице интерметаллиды равномерно распределены в поле шлифа. EDX анализ для образца Al+ПД<sub>ВнАл-1</sub> показал (рис. 5а), что область 1 соответствует алюминию, в области 2 содержится 75.3 масс. % Al и 24.7 масс. % V, а в области 3 - 70.1 масс. % Al и 29.9 масс. % Fe. По всей плоскости шлифа композита Al+ПД<sub>ВнАл-1</sub> химический анализ показал следующее содержание элементов: 92.2 масс. % Al, 5.9 масс. % V и 1.9 масс. % Fe.

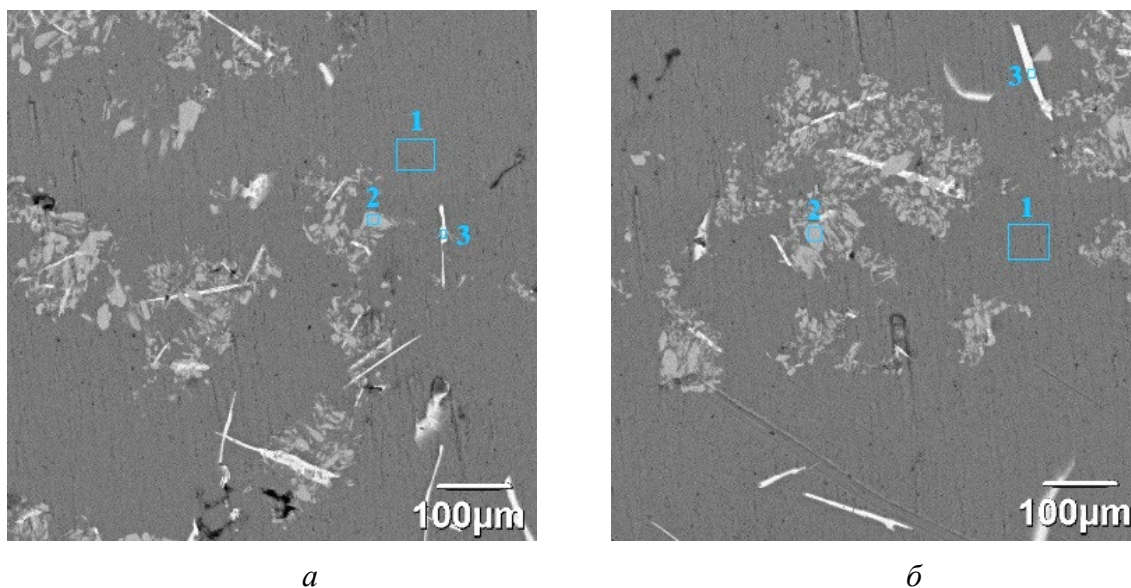


Рис. 5. Микроструктура композитов после использования ПД, подвергнутых размолу: а) - Al+ПД<sub>ВнАл-15</sub>; б) - Al+ПД<sub>ВнАл-65</sub>.

В случае Al+ПД<sub>ВнАл-65</sub> (рис. 5б): область 1 является алюминиевой матрицей, в области 2 находятся 78.4 масс. % Al и 21.6 масс. % V, а в области 3 – 73.5 масс. % Al и 26.5 масс. % Fe. EDX анализ всей плоскости шлифа Al+ПД<sub>ВнАл-65</sub>: 94.1 масс. % Al, 4.3 масс. % V и 1.6 масс. % Fe. Усредненный точечный анализ обоих образцов показал, что в зоне алюминиевой матрицы, располагающейся между ванадиевыми интерметаллидами, содержание V составляет ~0.9 ат. %. По данным диаграммы состояния V-Al [13] растворимость ванадия в алюминии при температурах 735, 660 и 500 °C составляет 0.91, 0.2 и 0.11 ат. %, соответственно, что согласуется с полученным выше результатом.

В таблице 3 представлены результаты измерений микротвердости синтезированных композитов Al+ПД в зависимости от вида лигатуры, времени механоактивации в сравнении с материалом из исходного алюминия марки АПЖ.

Таблица 3. Микротвердость спеченных образцов.

Образец	Среднее значение микротвердости, HV <sub>0.1</sub>
АПЖ	48.3
Al+ПД <sub>ВнАл-1</sub> без размолу	65.3
Al+ПД <sub>ВнАл-1</sub> после размолу	67.2
Al+ПД <sub>ВнАл-65</sub> без размолу	58.7
Al+ПД <sub>ВнАл-65</sub> после размолу	60.2

Из таблицы 2 и рис. 5 видно, что введение 5% дисперсного промпродукта в алюминиевый порошок приводит к значительному упрочнению матрицы при спекании за счет отсутствия кристаллических оксидных составляющих в конечном продукте, появления интерметаллидов в ходе термитной реакций Al-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и образования тугоплавких ванадиевых соединений ( $V_3Al + Al \rightarrow Al_3V$ ,  $Al_3V + Al \rightarrow Al_{23}V_4$ ). Полученные композиционные материалы демонстрируют однородную микроструктуру с равномерным распределением упрочняющих фаз, где значения показателя твердости зависят от исходного состава ПД и времени механоактивации.



## Выводы

1. Проведена аттестация пылей дробебетных от лигатур ВнАл-1 и ВнАл-65, которые представляют собой сложную механическую смесь, состоящую из интерметаллида  $V_3Al$ , оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), а также металлического железа и его оксида ( $Fe_2O_3$ ). Основная масса частиц (~70%) имеет размер менее 40 мкм. Установлено, что с увеличением размера частиц ПД растет содержание  $Al_2O_3$  и снижается количество  $V_3Al$ .

2. Обработка в планетарной мельнице позволяет эффективно влиять на дисперсность частиц пыли. Установлено оптимальное время измельчения (60 мин), при котором происходит частичная аморфизация  $Al_2O_3$  и снижается средний размер частиц с 16 до ~8 мкм с увеличением удельной поверхности в несколько раз, что способствует улучшению реакционной активности смеси при синтезе композиционных материалов.

3. В процессе спекания протекает термитная реакция алюминия с оксидом железа и частичное растворение  $Al_3V$  в алюминиевой матрице. Наличие в структуре конечного материала интерметаллидов  $Al_3V$ ,  $Al_{23}V_4$  и  $Fe_4Al_{13}$  без кристаллических оксидных составляющих способствует значительному упрочнению синтезированных композитов.

4. Полученные композиты по твердости близки к известным широко применяемым алюминиевым сплавам: авиали АД35 ( $HV_{0.1}=68.5$ ), силумины Ал4, Ал9 ( $HV_{0.1}(Ал4) = 53-73.7$ ,  $HV_{0.1}(Ал9) = 47-53$ ).

## Финансирование:

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Института химии твердого тела УрО РАН № 124020600007-8.

## Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в финансовой или какой-либо иной сфере.

## Список источников

1. Лигатуры на основе тугоплавких редких металлов для титановых сплавов на основе ванадия. ТУ1761-022-25087982-98 (с изм. 1-4), АО Уралредмет.: Екб.
2. **Никитин К.В.** Рециклинг металлоотходов на основе алюминия. Самара: СамГТУ, 2016. 34 с.
3. **Omran A.M.** Fabrication and characterization of Al-based in situ composites reinforced by  $Al_3V$  intermetallic compounds. *E3 J. Sci. Res.* 2014, 2(2), 26-34.
4. **Блиничев В.Н., Бобков С.П., Гаюмджан П.П.** Влияние конструктивного оформления мельниц на удельные энергзатраты и механохимические превращения измельчаемых материалов. Доклады VII Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Ч. 1. Ташкент, 1981. с. 73-78.
5. **Аввакумов Е.Г.** Механические методы активации химических процессов. Новосибирск: Наука, 1986, 305 с.
6. **С.В. Жуков, М.П. Никитин, А.К. Петров;** Пат. РФ 2793561, 2023.
7. **Болдырев В.В., Абакумов Е.Г., Логвиенко А.Т.** Эффективность измельчительных аппаратов для механического активирования твердых тел. Обогащение полезных ископаемых. Новосибирск: Наука, 1977. с. 3-10.



8. Gerold E., Luznik L., Samberger S., Antrekowitsch H. Sustainable extraction and recycling of non-ferrous metals: a review from a European perspective. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2024, 382, 20240173. <https://doi.org/10.1098/rsta.2024.0173>
9. Крупнов Л.В., Мидюков Д.О., Дациев М.С., Ильин В.Б. Изменение ресурсной базы производства тяжелых цветных металлов на примере меди и никеля. *Горный журнал.* 2024, (3), 10-16. [doi.org/10.17580/gzh.2024.03.01](https://doi.org/10.17580/gzh.2024.03.01)
10. Бакланов М.Н., Еселевич Д.А., Шевченко В.Г. Физико-химическое исследование возможности использования отходов дробеметной зачистки лигатур Al-V для получения функциональных материалов на основе алюминия. *Расплавы.* 2022, (1), 3-11. <https://doi.org/10.31857/S0235010622010029>
11. Rietveld H.M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *J. Appl. Crystallogr.* 1969, 2(2), 65-71.
12. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Игнатенко Г.Ф., Лаппо С.И. Алюмотермия. М.: «Металлургия», 1978, 424 с.
13. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т1. Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996, 992 с.
14. Чумарев В.М., Марьевич В.П., Ченцов В.П., Паздников И.Л., Паньков И.А., Бакланов М.Н. Фазовый состав и температуры плавления алюминотермических лигатур редких тугоплавких металлов. *Расплавы.* 2009, (3), 29-35.
15. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. М: Metallurgia, 1974, 232 с.
16. Plantier K.V., Pantoja M.L., Gach A.E. Combustion wave speeds of nanocomposite Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: the effects of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle synthesis technique. *Combust. Flame.* 2005, 140(4), 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.10.009>
17. Black P.J. The Structure of FeAl<sub>3</sub>. *Acta Crystallogr.* 1955, 8, 43. <https://doi.org/10.1107/S0365110X5500011X>
18. Han K., Ohnuma I., Kainuma R. Experimental determination of phase equilibria of Al-rich portion in the Al-Fe binary system. *J. Alloys Compd.* 2016, 668, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.215>
19. Qin Z., Xiao J., Du T., Cheng R., Zhang J. Resource utilization strategy of Fe-bearing smelting slag in China: a review. *Miner. Eng.* 2024, 219, 109066. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109066>

Поступила в редакцию 20.03.2026

Одобрена после рецензирования 15.04.2026

Принята к опубликованию 04.05.2026