

4. Патент 21281. Способ металлографического контроля структуры чугуна: заявлено 09.07.2014, опубл. 30.08.2017 2 / А. И. Покровский; заявит. ФТИ НАН Беларуси. – № а 20140377 // Афіц. бюлл. / НЦІУ. – 2017. – № 4. – С. 107–108.
5. Патент 23931. Способ изготовления образца для металлографического контроля структуры сплава на основе железа: заявлено 12.05.2021, опубл. 28.02.2023 / А. И. Покровский; заявит. А. И. Покровский // Афіц. бюлл. / НЦІУ. – 2023. – № 1. – С. 57.
6. Патент 23932. Способ металлографического контроля структуры сплавов на основе железа: заявлено 12.05.2021, опубл. 28.02.2023 / А. И. Покровский; заявит. А. И. Покровский // Афіц. бюлл. / НЦІУ. – 2023. – № 1. – С. 57–58.

REFERENCES

1. **Pokrovskij A. I.** *Ustrojstvo dlja vyjavenija formy grafitnyh vkljuchenij v strukture chuguna* [A device for identifying the shape of graphite inclusions in the structure of cast iron]. Patent RB, no. 10652, 2015.
2. **Pokrovskij A. I.** *Sposob kontrolja formy grafitnyh vkljuchenij v strukture chuguna* [Method for controlling the shape of graphite inclusions in the structure of cast iron]. Patent RB, no. 21186, 2017/
3. **Pokrovskij A. I.** *Sposob kontrolja formy grafitnyh vkljuchenij v strukture chuguna* [Method for controlling the shape of graphite inclusions in the structure of cast iron]. Patent RB, no. 21187, 2017.
4. **Pokrovskij A. I.** *Sposob metallograficheskogo kontrolja struktury chuguna* [Method of metallographic control of cast iron structure]. Patent RB, no. 21281, 2017.
5. **Pokrovskij A. I.** *Sposob izgotovlenija obrazca dlja metallograficheskogo kontrolja struktury splava na osnove zheleza* [Method for preparing a sample for metallographic testing of the structure of an iron-based alloy]. Patent RB, no. 23931, 2023.
6. **Pokrovskij A. I.** *Sposob metallograficheskogo kontrolja struktury splavov na osnove zheleza* [Method of metallographic control of the structure of iron-based alloys]. Patent RB, no. 23932, 2023.



УДК 621.762–03; 621.793

РЕЦИКЛИНГ ШЛАКОВ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЕЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Al_2O_3-Al

А. Д. РУЛЕНКОВ, И. В. РАФАЛЬСКИЙ, П. Е. ЛУЩИК, О. Г. ДЕВОЙНО, Л. П. ДОЛГИЙ,
Белорусский национальный технический университет, Республиканское инновационное
унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,
г. Минск, Беларусь, Я. Коласа, 24. E-mail: rulenkov@park.bntu.by

В работе представлены результаты рециклинга шлаков с использованием технологии температурно-временной обработки алюмоматричных литейных композиционных сплавов с целью получения дисперсных материалов системы Al_2O_3-Al , применяемых для формирования металлокерамических покрытий. Обсуждаются механизмы синтеза дисперсных материалов на основе системы «оксид алюминия-алюминий», выделенных после рафинирующей обработки композиционного сплава $Al-SiO_2$. Методами газотермического напыления получены металлокерамические покрытия с использованием синтезированного порошкового материала. Для повышения механических свойств полученные покрытия подвергали лазерной обработке.

Ключевые слова. Алюминиевый сплав, композиционный материал, система $Al-SiO_2$, температурно-временная обработка, рециклинг шлака, газотермическое напыление, металлокерамическое Al_2O_3-Al покрытие, лазерная обработка.

RECYCLING OF SLAG FROM THE PRODUCTION OF CASTING COMPOSITE ALLOYS BASED ON ALUMINUM FOR PRODUCING DISPERSED MATERIALS OF THE Al_2O_3-Al SYSTEM

A. D. RULENKOV, I. V. RAFALSKI, P. E. LUSHCHIK, O. G. DEVOINO, L. P. DOLGI,
Belarusian National Technical University, Science and Technology Park of BNTU “Polytechnic”,
Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: rafalski@park.bntu.by

The paper presents the results of recycling slags by the temperature-time treatment technology of aluminum-matrix casting composites to obtain dispersed Al_2O_3-Al materials for metal-ceramic coatings. The mechanisms of synthesis of dispersed Al_2O_3-Al materials, isolated after refining treatment of $Al-SiO_2$ composite alloys, are discussed. Metal-ceramic coatings were obtained using the synthesized powder material by gas-thermal spraying methods. Laser treatment was used to improve mechanical properties coatings.

Keywords. Aluminum alloy, composite material, $Al-SiO_2$ system, temperature-time treatment, slag recycling, thermal spraying, metal-ceramic Al_2O_3-Al coating, laser processing.

Введение

Одним из наиболее эффективных способов улучшения механических и эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин является формирование металлических, неметаллических и композиционных покрытий различного назначения газотермическими либо комбинированными методами. Основными целями нанесения различных материалов на поверхность изделия является обеспечение его защиты и функциональности при работе в жестких условиях эксплуатации. Применение защитных покрытий активно используется для повышения долговечности и функциональности металлических изделий во многих отраслях промышленности, например, в авто-, судо-, авиа- и машиностроении, строительном секторе, в химической и нефтегазовой промышленности, металлургии и в других сферах.

Актуальной проблемой остается разработка технологий получения доступных композиционных материалов для напыления. Если стоимость производства проволоочных металлических материалов для газотермического и лазерного нанесения относительно невелика, то синтез композиционных

металлокерамических материалов на сегодняшний день все еще остается дорогостоящим и требующим поиска технологий, которые будут обеспечивать функциональные свойства изделий.

Одним из путей решения проблемы получения металлокерамических порошков для газотермических и комбинированных методов нанесения покрытий может быть использование вторичного переработанного сырья от производства литейных алюминиевых композиционных сплавов. Переработка вторичного сырья производства композиционных сплавов на основе алюминия для получения порошковых материалов и использование их для газотермического напыления решает экологические проблемы, связанные с утилизацией литейных шлаков в отвалы [1].

Цель работы – разработка технологии рециклинга шлаков производства литейных композиционных сплавов на основе алюминия для получения дисперсных материалов системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$, используемых для формирования металлокерамических покрытий.

Формирование покрытий осуществляли с использованием методов газотермического напыления [2]. Повышение твердости и изностойкости покрытий обеспечивали с помощью лазерного оплавления [3].

Механизм синтеза дисперсных материалов на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$

Получение композиционных материалов на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$ проводили методом гетерофазного синтеза путем смешивания в жидко-твердофазном состоянии кремнезема и металлической основы (сплав на основе алюминия) с последующей температурно-временной обработкой композиции, обеспечивающего протекание химических процессов взаимодействия оксида кремния с алюминием и получение алюмооксидных фаз (Al_2O_3) [4].

Чтобы получить литейный композиционный сплав на основе алюминия с использованием кремнезема, необходимо на этапе ввода частиц керамической фазы (SiO_2) в расплав алюминия обеспечить их полное усвоение и равномерное распределение в объеме расплава. Выполнить это путем обычного замешивания частиц порошка SiO_2 в жидкий алюминий представляет определенную проблему из-за их низкой смачиваемости расплавом алюминия, поскольку частицы кремнезема в процессе перемешивания всплывают на поверхность металлической ванны.

Оксид кремния в полученной алюмоматричной композиции вступает в химическую реакцию с алюминием с образованием Al_2O_3 и Si (рис. 1):

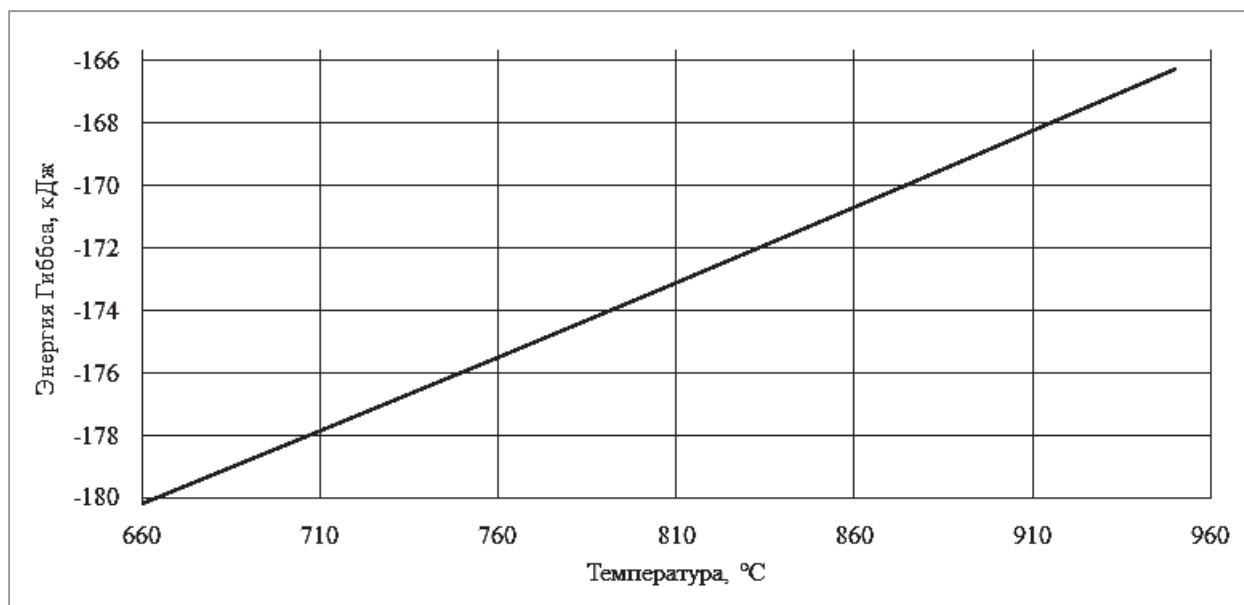
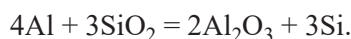


Рис. 1. Термодинамическая вероятность протекания реакции $4\text{Al} + 3\text{SiO}_2 = 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Si}$

Кремнезем при температуре 573°C претерпевает полиморфное превращение из α -кварца или низкого кварца (low-quartz) (плотность $2,65 \text{ г/см}^3$) в β -кварц (high-quartz) (плотность $2,53 \text{ г/см}^3$) с изменением кристаллической решетки. При нагреве из-за увеличения объема частицы нарушается сплошность образовавшейся на поверхности пленки оксида алюминия, что способствует проникновению жидкого металла в поры и микротрещины и образованию пятен контакта оксида кремния и алюминия (рис. 2).

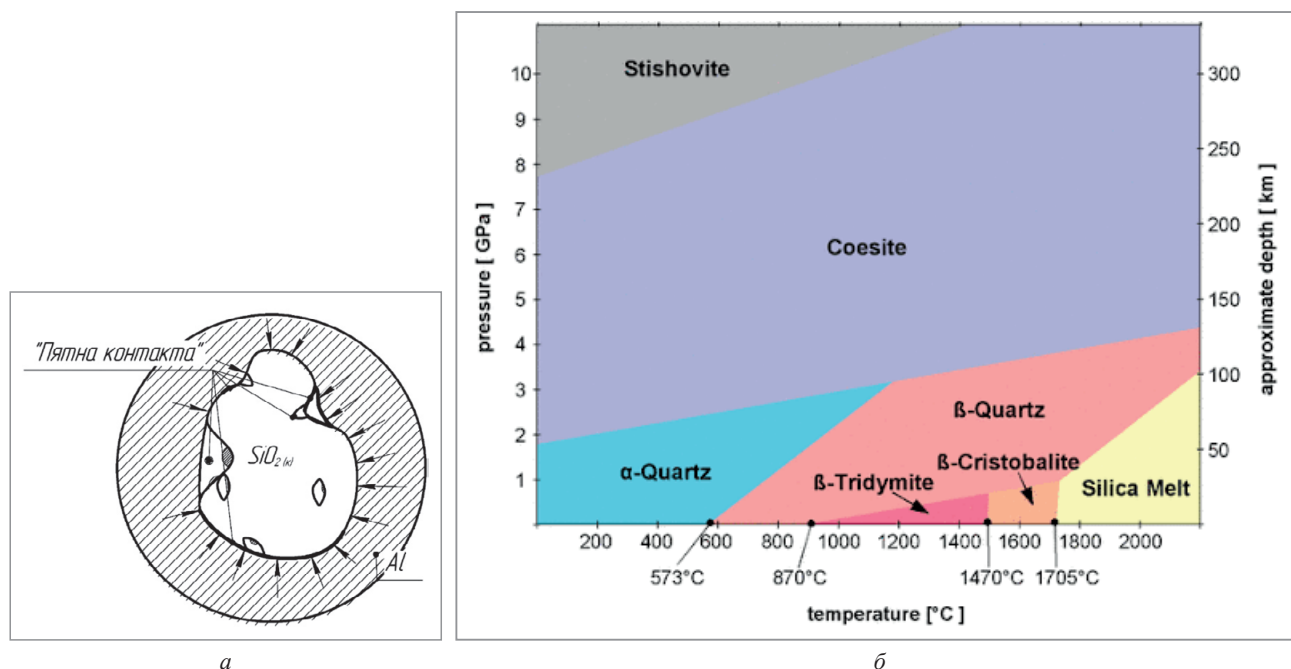


Рис. 2. Частица кремнезема в металле после кристаллизации:
 а – частица кремнезема на этапе затвердевания жидко-твердофазной композиции Al/SiO_2 ;
 б – диаграмма полиморфных превращений кремнезема в зависимости от температуры

После окончания замешивания кремнезема композиция охлаждается до полного затвердевания металлической основы. Во время кристаллизации частица оказывается под воздействием сжимающих напряжений вследствие усадки металла, что обеспечивает увеличение площади контактной поверхности частиц кремнезема с алюминием.

В процессе температурно-временной обработки композиции происходит термохимическое взаимодействие расплава с кремнеземом на пятнах контакта с образованием оксида алюминия и свободного кремния (рис. 3).

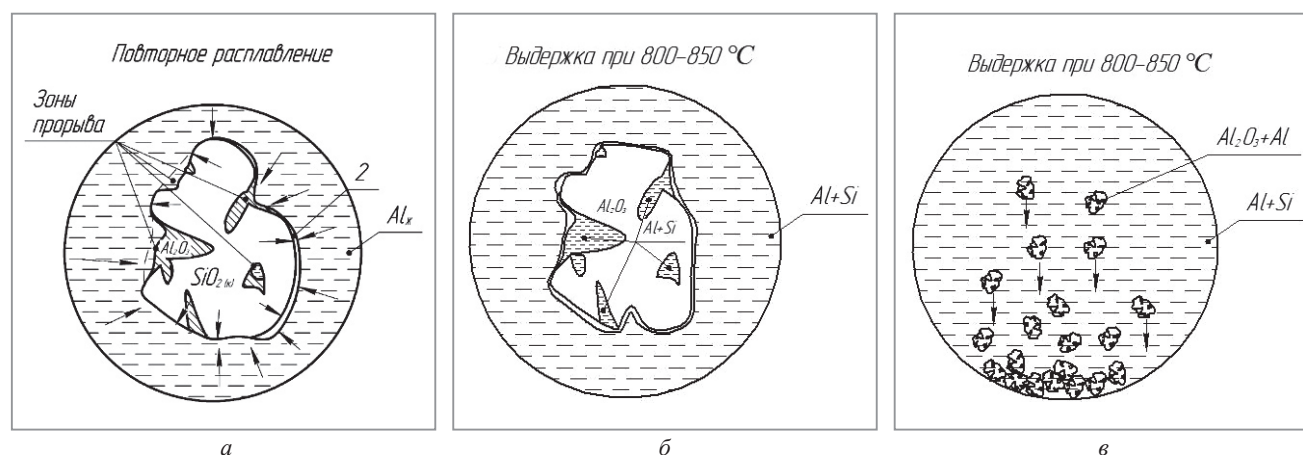


Рис. 3. Образование оксида алюминия и свободного кремния при температурно-временной обработке композиции Al/SiO_2

Результаты и их обсуждение

Образующиеся в процессе химического взаимодействия частицы оксида алюминия наследуют окологлубчатую морфологию частиц кремнезема, частично захватывая корольки алюминия и интерметаллических фаз (рис. 4).

При завершении процесса металлургической обработки композиционного сплава для удаления алюмооксидных фаз проводили рафинирующую обработку солевыми смесями (рис. 5).

Методами газотермического (газопламенного, плазменного) напыления были получены опытные образцы с металлокерамическими покрытиями с использованием порошкового материала на основе

системы «оксид алюминия-алюминий», выделенного после рафинирующей обработки композиционного сплава. Для повышения твердости и износостойкости полученные покрытия подвергали лазерной обработке (рис. 6).

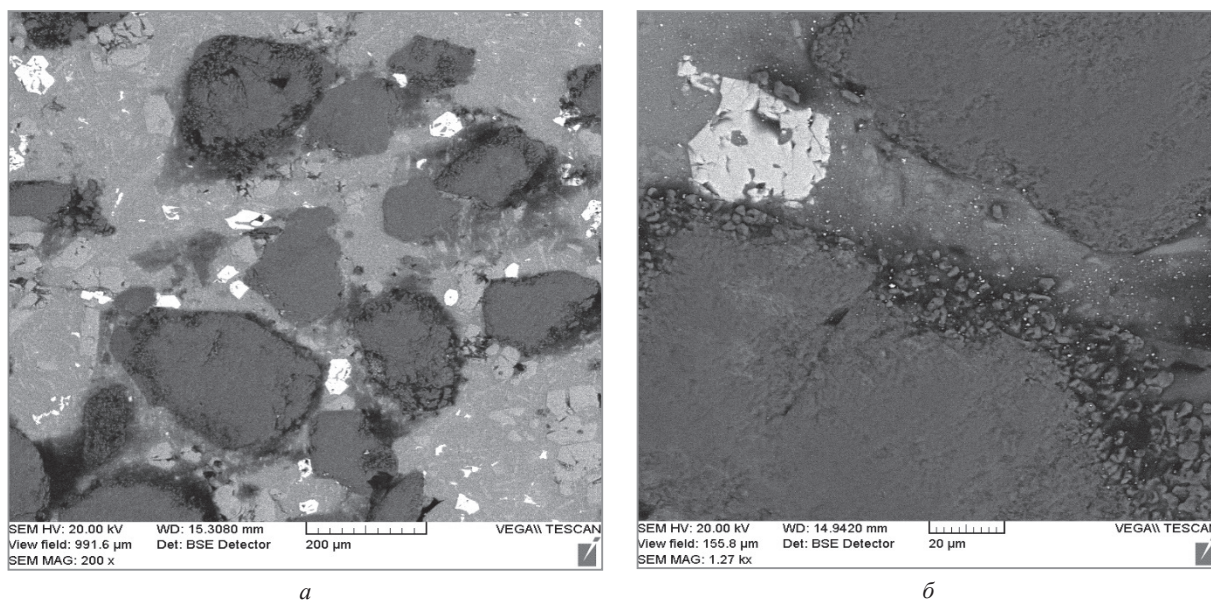


Рис. 4. Результаты сканирующей электронной микроскопии литейного композиционного сплава на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$: а – $\times 200$; б – $\times 1270$

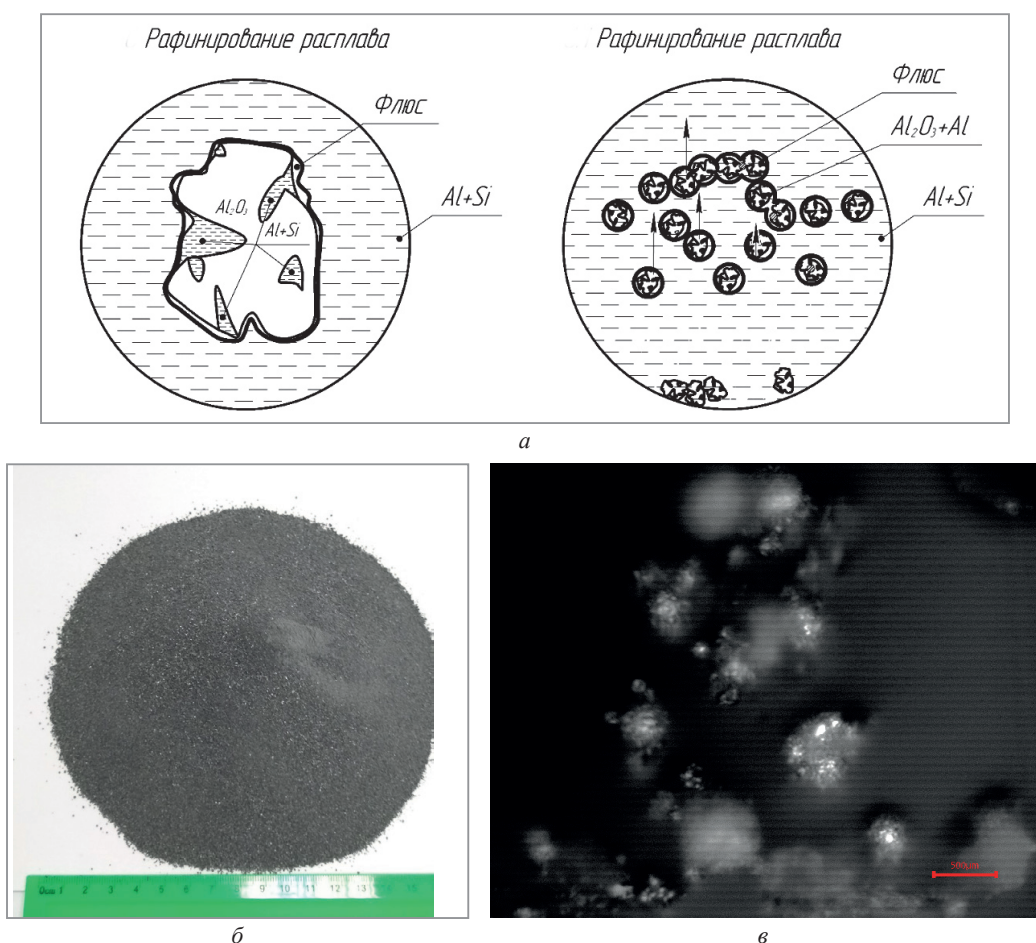


Рис. 5. Схема удаления частиц алюмооксидных фаз при рафинирующей обработке композиционного сплава (а), внешний вид (б) и макроструктура частиц порошкового материала на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$, выделенного после рафинирующей обработки композиционного сплава (в)