

**Раздел 1. «Металлургия»**

МРНТИ 53.39.31

В.А. Андреященко

*Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан  
(E-mail.ru: Vi-ta.z@mail.ru)*

**Влияние флюсов при получении металлокерамических материалов системы Al-Fe-Si**

В данной статье изучено влияние флюсов при получении металлокерамических материалов. В качестве металлокерамического материала выбрана система Al-Fe-Si. Использовано две группы флюсов: флюс марки АН348 и керамический флюс. Каждый флюс распределяли по фракциям и анализировали для выявления наиболее рационального фракционного состава, способствующего полноценной защите шихты от окисления. Выполнен нагрев в контролируемых условиях до температуры 915°C с замером веса на каждом этапе нагрева. Визуально оценена эффективность покрытия флюсами шихтового материала. Проанализированы выходные данные термогравиметрического анализа. Предпочтительнее использование флюса марки АН348 для обеспечения полноценной защиты шихты от окисления. Использование керамического флюса любой фракции приводит к образованию оксидов, в том числе на поверхности флюса.

*Ключевые слова:* металлокерамический материал, Al-Fe-Si, флюс, керамический флюс, термогравиметрический анализ.

*Введение*

Текущая ситуация рынка металлоизделий представлена подавляющим большинством промышленного использования черных металлов, однако перспективность цветных сплавов является неоспоримой. Исследование сплавов системы Al-Si, содержащих такие элементы, как железо, медь, марганец, является одним из перспективных направлений в металлургии и материаловедении. Сплавы с повышенным содержанием кремния проявляют хорошее сопротивление износу, жидкотекучесть и термическую стабильность. Однако эти сплавы плохо обрабатываются давлением из-за склонности к образованию трещин. Высокое содержание железа вызывает повышение прочности, а присутствие марганца снижает отрицательное действие железа, изменяя морфологию структурных соединений.

На данном этапе развития науки и техники широкое распространение получили сплавы системы Al-Si-Fe с добавлением таких элементов, как Mn, Cu, Ti и др. во многих отраслях промышленности. Уникальность сплавов данной системы заключается в возможности формирования специфических фаз, обладающих уникальными свойствами без добавления дорогостоящих легирующих компонентов. Свойства той или иной фазы определяется в первую очередь типом ее кристаллической решетки, и соответствующим химическим составом.

Металлокерамические материалы в последнее время получают все больше и больше внимание исследователей, что обусловлено благоприятным сочетанием свойств, как например, прочность, твердость, износостойкость и коррозионная стойкость.

Известно, что аддитивные технологии позволяют быстро изготавливать трехмерные металлические, керамические или композиционные детали с металлической матрицей любой сложной формы. Такие сложные «компоненты-конфигурации» невозможно получить с помощью традиционных методов обработки. Вне зависимости от метода синтеза, такие материалы характеризуются повышенными механическими характеристиками по сравнению с матричным сплавом. В настоящей работе для синтеза материала использован аддитивный метод путем наплавки под флюсом плавящимся электродом. Выбор такого подхода обеспечивает получение заданного состава путем использования шихты с определенным содержанием требуемых элементов, использование флюса минимизирует угар шихтовых элементов и исключает окисление при высоких температурах. При этом

## Раздел 1. «Металлургия»

высокие температуры, достигаемые при реализации синтеза, обеспечивают полноценное формирование требуемого фазового состава.

Целью данного исследования является оценка и выбор флюсового материала для синтеза металлокерамических материалов системы Al-Si-Fe.

### *Методы и материалы*

Для исследования использованы следующие коммерческие материалы: металлический кремний, технический чистый алюминий, сталь марки 08кп. Все исходные материалы подвергнуты измельчению до фракции 0,3-0,5 мм. Измельчение выполнено в виброистирателе. Контроль размеров частиц осуществлялся просеиванием через сита с соответствующим размером ячеек. Далее измельченные порошки исходных компонентов смешивали в соотношении Al 59 : Fe 32 : Si 9 весовых процентов. Затем проведено механическое легирование путем совместного измельчения в вибрационной мельнице в течение 5 минут с частотой 30Гц. Вес каждой навески в стакане мельницы составлял 20 гр. Одновременно измельчалось две навески. После механической активации готовая смесь была готова для синтеза аддитивным методом. Для исследования влияния флюсов подготовлено две партии образцов, первая из которых исследовалась с использованием флюса марки АН348, вторая партия обрабатывалась под керамическим флюсом.

Обе партии для исследования были загружены в Термогравиметрический анализатор Eltra Thermostep thermogravimetric Analyzer, где в контролируемых условиях определялся вес навесок при нагреве до 915°C, а затем изучались визуально.

Помимо двух типов флюсов также исследованию подвергался фракционный состав, при этом каждая из партий подразделялась на три группы: с фракцией 1,6-1,0 мм, 1,0-0,63 мм и менее 0,63 мм.

Всего было изучено 19 образцов с повторным дублированием.

В анализируемых тиглях были загружены материалы при следующих условиях: только флюсы, шихтовый материал без флюса, шихтовый материал, покрытый флюсом для имитации процесса синтеза.

### *Результаты и обсуждение*

Термогравиметрический анализ применяют преимущественно для анализа выхода летучих при нагреве. В данном случае этот подход был использован для оценки газопроницаемости флюсов и исследовании его защитной функции. Контролируемый нагрев до температуры 915°C с параллельным измерением массы навески позволяет изучить эти параметры и спрогнозировать поведение флюса и шихтового материала в реальных условиях синтеза. При синтезе температура превышает 5000°C, что приводит к расплавлению как шихты, так и флюса. При термогравиметрическом анализе расплавления ни шихты, ни флюса не происходит, однако этот анализ прекрасно моделирует поведение материалов на начальных этапах нагрева при синтезе. При данной температуре наблюдается образование и рост оксидов металлов шихты. В случае наблюдения оксидообразования при низких температурах большая вероятность их образования и при температурах синтеза. Однако высокая газопроницаемость флюса также будет способствовать стабильности процесса горения при синтезе.

Интерпретация данных термогравиметрического анализа (Рисунок 1) показала, что флюсы сами по себе (без присутствия шихтовых материалов) инертны, не происходит ни набора веса, ни его уменьшения за счет влажности.

Окисление при нагреве в данных условиях определяется типом используемого флюса и его фракционным составом.

## Раздел 1. «Металлургия»

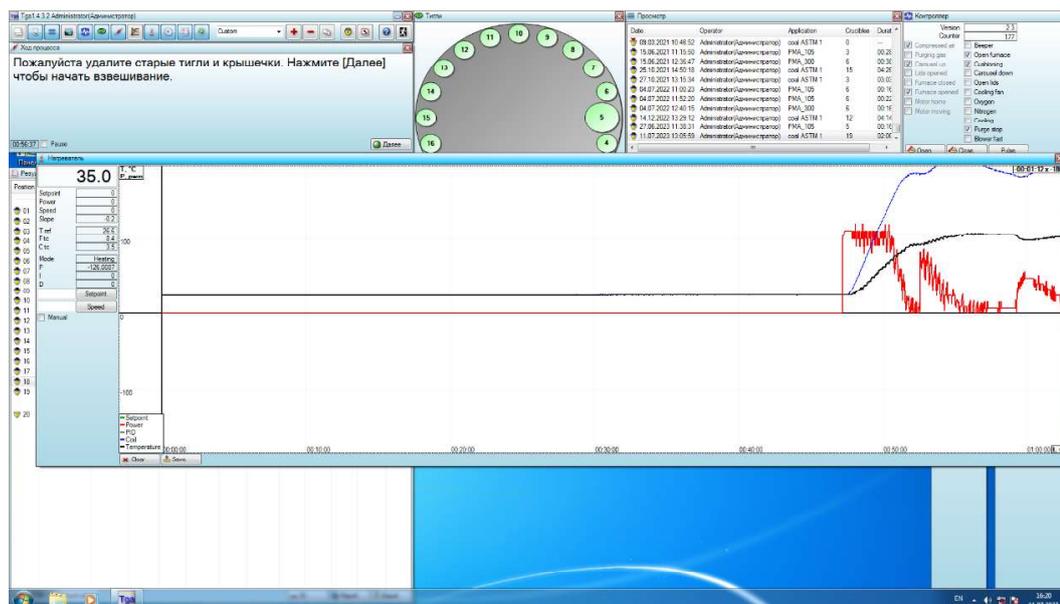


Рисунок 1. График термогравиметрического анализа

Проведенные исследования показали высокую реакционную способность шихтовых материалов, шихта активно вступает в реакцию с кислородом, что приводит к образованию окислов и остаточной зольности (рисунок 2).

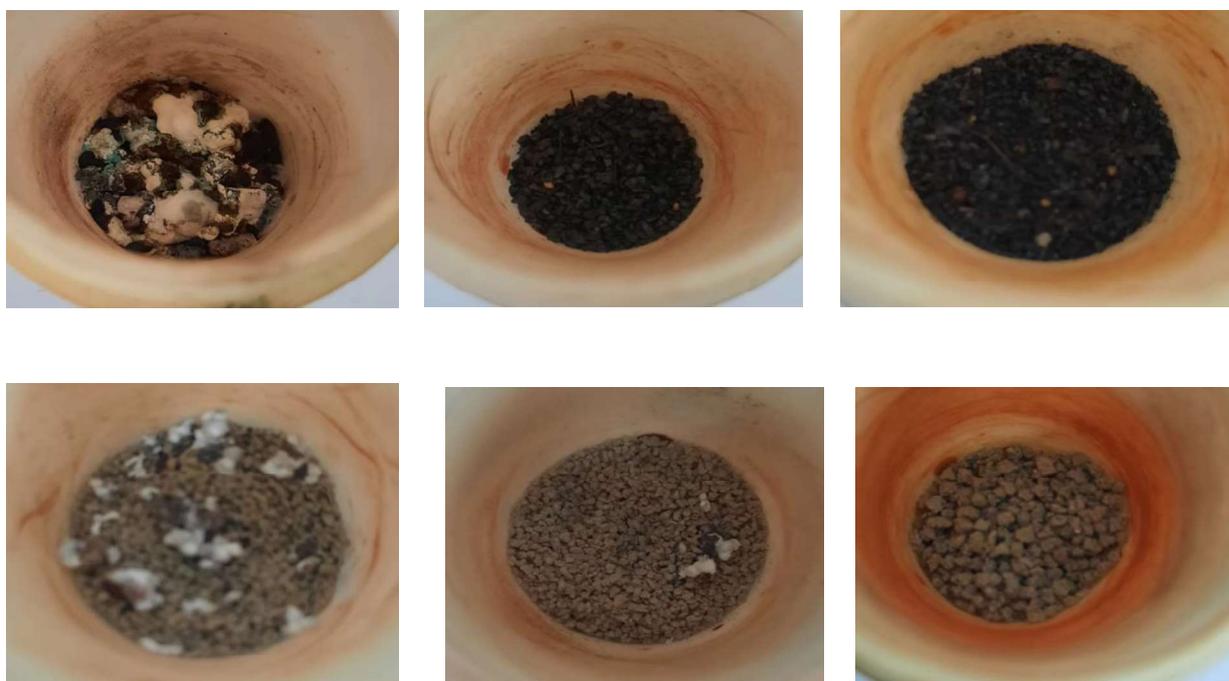


Рисунок 2. Вид шихты керамического материала после нагрева до 950°C: а – без флюса, б, в – с флюсом марки АН348, г, д, е – с керамическим флюсом размером 0,63; 1 и 1,6 мм

Результаты термогравиметрического анализа и визуальная оценка дают аналогичные результаты. Отсутствие флюса приводит к полному окислению поверхностного слоя, формированию грубой корки и переходе компонентов шихты в оксиды (рисунок 2а). Синтезирование керамического материала без

## Раздел 1. «Металлургия»

использования флюса невозможно. Использование флюса марки АН348 обеспечивает полноценную защиту шихтового материала от кислорода, исключая образование оксидов. При использовании керамического флюса полной защиты от окисления шихтового материала при нагреве не наблюдается. Стоит отметить, что флюс фракции 1,6 – 1,0 наиболее эффективно защищает шихту от визуальных проявлений процесса оксидообразования.

### Выводы

В данной работе представлены результаты анализа защитной функции двух групп флюсов в трех фракционных составах каждый. При этом керамический флюс не оказывает заметной защитной функции вне зависимости от фракционного состава, при этом фракция 1,6-1,0 более предпочтительна. Флюс марки АН348 при всех фракционных составах исключает выход оксидов на поверхность флюса.

*Благодарности:* настоящее исследование выполнено при финансировании Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Гран № АР19675471).

### Список литературы

- 1 Chak V., Chattopadhyay H., Dora T. L. A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites //Journal of manufacturing processes, 2020, V. 56, 1059-1074.
- 2 Tjong, S. C. Novel Nanoparticle-Reinforced Metal Matrix Composites with Enhanced Mechanical Properties / S. C. Tjong // Adv. Eng. Mater, 2007, Vol. 9, № 8, 639 - 652.
- 3 Camargo, P. H. C. Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities / P. H. C. Camargo, K. G. Satyanarayana, F. Wypych // Mat. Research, 2009, Vol. 12, № 1, 1 - 39.
- 4 Casati, R. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles - A Review /R. Casati, M. Vedani, Metals, 2014, No. 4, 65 - 83.
- 5 Jingjie Shen, Yanfen Li, Feng Li, Huilong Yang, Zishou Zhao, Sho Kano, Yoshitaka Matsukawa, Yuhki Satoh and Hiroaki Abe, Microstructural characterization and strengthening mechanisms of a 12Cr-ODS steel, Materials Science & Engineering A, <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.030>
- 6 Durand, A., Sornin, D., Taché, O., Guilbert, T., Brisset, F., Delbes, L., ... & Logé, R. (2023). Stability of untransformed ferrite in 10Cr ODS steel. Journal of Nuclear Materials, 574, 154146. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.154146>
- 7 Nowik, K., Zybała, R., & Oksiuta, Z. (2023). Formation and Microstructural Evolution of Ferritic ODS Steel Powders during Mechanical Alloying. Materials, 16(2), 765. <https://doi.org/10.3390/ma16020765>
- 8 Slugen, V., Veternikova, J. S., Degmova, J., Sojak, S., Petriska, M., Noga, P., & Krsjak, V. (2023). Positron annihilation studies of Eurofer97/ODS steels after helium ion implantation. Nuclear Materials and Energy, 101369. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101369>
- 9 Peng, S., Lu, Z., Gao, S., & Li, H. (2023). Improved microstructure and mechanical properties of ODS-CoCrFeNiMn high entropy alloys by different Ti, Zr and Y2O3 addition. Journal of Alloys and Compounds, 935, 168166.
- 10 Gupta S. P. Intermetallic compound formation in Fe–Al–Si ternary system: Part I, Materials Characterization, 2003, V. 49, 269-291.
- 11 Gupta S.P. Intermetallic compound formation in Fe–Al–Si ternary system, Materials Characterization, 2003, №49, part 2, 293– 311.
- 12 Hassan S. B., Aponbiede O., Aigbodion V. S. Precipitation hardening characteristics of Al–Si–Fe/SiC particulate composites //Journal of alloys and Compounds. – 2008. – Т. 466. – №. 1-2. – С. 268-272.

**Раздел 1. «Металлургия»**

В.А. Андреященко

**Al-Fe-Si жүйесінің металл керамикалық материалдарын өндірудегі флюстердің әсері**

Бұл мақалада флюстердің металл керамикалық материалдар өндірісіне әсері зерттелген. Керамикалық-металл материалы ретінде Al-Fe-Si жүйесі таңдалды. Флюстердің екі тобы қолданылды: AN348 ағыны және керамикалық ағын. Әрбір ағын фракцияларға бөлініп, шихтаны тотығудан толық қорғауға ықпал ететін ең ұтымды фракциялық құрамды анықтау үшін талданды. Қыздыру бақыланатын жағдайларда 915°C температураға дейін қыздырудың әрбір сатысында салмақты өлшей отырып орындалды. Шихта материалын ағындармен жабудың тиімділігі визуалды түрде бағаланды. Термогравиметриялық талдаудың шығыс деректері талданады. Зарядты тотығудан толық қорғауды қамтамасыз ету үшін AN348 ағынын қолданған дұрыс. Кез келген фракцияның керамикалық ағынын пайдалану оксидтердің, соның ішінде ағынның бетінде пайда болуына әкеледі.

*Негізгі сөздер:* керамикалық-металл материалы, Al-Fe-Si, флюс, керамикалық ағын, термогравиметриялық талдау.

V.A. Andreyachshenko

**Influence of fluxes in the production of metal-ceramic materials of the Al-Fe-Si system**

In this article, the influence of fluxes in the production of metal-ceramic materials has been studied. The Al-Fe-Si system was chosen as the ceramic-metal material. Two groups of fluxes were used: AN348 flux and ceramic flux. Each flux was divided into fractions and analyzed to identify the most rational fractional composition, which contributes to the complete protection of the charge from oxidation. Heating was performed under controlled conditions to a temperature of 915°C with weight measurement at each stage of heating. The efficiency of charge material coating with fluxes was visually evaluated. The output data of thermogravimetric analysis are analyzed. It is preferable to use the AN348 flux to ensure full protection of the charge from oxidation. The use of ceramic flux of any fraction leads to the formation of oxides, including on the surface of the flux.

*Key words:* ceramic-metal material, Al-Fe-Si, flux, ceramic flux, thermogravimetric analysis.

## References

- 1 Chak V., Chattopadhyay H., Dora T. L. A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites //Journal of manufacturing processes, 2020, V. 56, 1059-1074.
- 2 Tjong, S. C. Novel Nanoparticle-Reinforced Metal Matrix Composites with Enhanced Mechanical Properties / S. C. Tjong // Adv. Eng. Mater, 2007, Vol. 9, № 8, 639 - 652.
- 3 Camargo, P. H. C. Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities / P. H. C. Camargo, K. G. Satyanarayana, F. Wypych // Mat. Research, 2009, Vol. 12, № 1, 1 - 39.
- 4 Casati, R. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles - A Review /R. Casati, M. Vedani, Metals, 2014, No. 4, 65 - 83.
- 5 Jingjie Shen, Yanfen Li, Feng Li, Huilong Yang, Zishou Zhao, Sho Kano, Yoshitaka Matsukawa, Yuhki Satoh and Hiroaki Abe, Microstructural characterization and strengthening mechanisms of a 12Cr-ODS steel, Materials Science & Engineering A, <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.030>

**Раздел 1. «Металлургия»**

- 6 Durand, A., Sornin, D., Taché, O., Guilbert, T., Brisset, F., Delbes, L., ... & Logé, R. (2023). Stability of untransformed ferrite in 10Cr ODS steel. *Journal of Nuclear Materials*, 574, 154146. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.154146>
- 7 Nowik, K., Zybala, R., & Oksiuta, Z. (2023). Formation and Microstructural Evolution of Ferritic ODS Steel Powders during Mechanical Alloying. *Materials*, 16(2), 765. <https://doi.org/10.3390/ma16020765>
- 8 Slugen, V., Veternikova, J. S., Degmova, J., Sojak, S., Petriska, M., Noga, P., & Krsjak, V. (2023). Positron annihilation studies of Eurofer97/ODS steels after helium ion implantation. *Nuclear Materials and Energy*, 101369. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101369>
- 9 Peng, S., Lu, Z., Gao, S., & Li, H. (2023). Improved microstructure and mechanical properties of ODS-CoCrFeNiMn high entropy alloys by different Ti, Zr and Y2O3 addition. *Journal of Alloys and Compounds*, 935, 168166.
- 10 Gupta S. P. Intermetallic compound formation in Fe–Al–Si ternary system: Part I, *Materials Characterization*, 2003, V. 49, 269-291.
- 11 Gupta S.P. Intermetallic compound formation in Fe–Al–Si ternary system, *Materials Characterization*, 2003, №49, part 2, 293–311.
- 12 Hassan S. B., Aponbiede O., Aigbodion V. S. Precipitation hardening characteristics of Al–Si–Fe/SiC particulate composites // *Journal of alloys and Compounds*. – 2008. – Т. 466. – №. 1-2. – С. 268-272.