

**Список литературы**

1. Goldstein A. Correlation between  $MgAl_2O_4$ -spinel structure, processing factors and functional properties of transparent parts (progress review) //Journal of the European Ceramic Society. – 2012. – Т. 32. – №. 11. – С. 2869-2886.
2. Kuang J., Liu Y., Zhang J. White-light-emitting long-lasting phosphorescence in  $Dy^{3+}$ -doped  $SrSiO_3$  //Journal of Solid State Chemistry. – 2006. – Т. 179. – №. 1. – С. 266-269.
3. Polissadova E. F., Vaganov V. A., Valiev D. T. et al. Influence of Temperature on the Luminescence Properties of  $MgAl_2O_4: Dy^{3+}$  Ceramics Synthesized by Spark Plasma Sintering //Physics of the Solid State. – 2019. – Т. 61. – №. 10. – С. 1829-1834.
4. Valiev D., Stepanov S., Khasanov O. et al. Synthesis and optical properties of  $Tb^{3+}$  or  $Dy^{3+}$ -doped  $MgAl_2O_4$  transparent ceramics //Optical Materials. – 2019. – Т. 91. – С. 396-400.
5. Kumar S., Prakash R., Kumar V. A novel yellowish white  $Dy^{3+}$  activated  $\alpha-Al_2O_3$  phosphor: Photoluminescence and optical studies //Functional Materials Letters. – 2015. – Т. 8. – №. 05. – С. 1550061.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ОТХОДОВ  
МЕТАЛЛООБРАБОТКИ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
В МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТАХ**

*А.В.ЛИПЕЕВ<sup>1,2</sup>, А.В. ЛЫСОВА<sup>1,2</sup>, И.О. НИКОЛАЕВ<sup>2</sup>, Е.Н. КОРОСТЕЛЕВА<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

E-mail: [Alexeylipe@outlook.com](mailto:Alexeylipe@outlook.com)

Одной из наиболее актуальных проблем последних десятилетий является эффективное использование ресурсов. Помимо энергоэффективности и возобновляемых источников энергии, также широко востребованы технологии утилизации и переработки отходов машиностроительных производств. Наибольший вклад в совокупный объем отходов производственных цепочек в машиностроении дает металлообработка на различных станках. Независимо от вида обработки, используемого инструмента, при изготовлении любой детали всегда образуется металлическая стружка. Чаще всего эта стружка утилизируется как металлический лом в металлургических процессах. В связи с этим при утилизации стружки основной задачей рассматривают возможность уплотнения стружечных отходов для минимизации объема с целью облегчения транспортировки [1-2]. Так как чаще всего для деталей используются заготовки из различных марок стали, то преимущественный объем отходов будет составлять стальная стружка. С другой стороны, стальную стружку можно рассматривать как самостоятельный материальный ресурс, который можно использовать в другом качестве, а не только в переплавке стальной шихты.

Во-первых, стальная стружка представляет собой уже отличный по структуре от исходной заготовки материал со своей сформированной в результате резания дефектной структурой. Во-вторых, большое значение имеет и возможное влияние среды обработки с охлаждающей жидкостью, окислительные процессы и т.п. В-третьих, стружка представляет собой достаточно активированный материал, который можно подвергнуть дальнейшему измельчению, доокислению и довести до порошкообразного вида. Это делает стальную стружку удобным сырьем для приготовления порошковых композиций с определенным сочетанием компонентов. В частности, достаточно активно изучается группа композиционных материалов на основе титана с различными тугоплавкими добавками из

соединений карбидов, нитридов, боридов, силицидов и оксидов [3]. Все эти материалы можно отнести к металломатричным композитам. Перспективы их использования весьма разнообразны, включают широкий спектр отраслей и производств. Причем, могут быть востребованы как плотные с низкой остаточной пористостью материалы, так и пористые с разветвленной поровой структурой. В связи с этим представляет интерес исследование порошка из стальной стружки как перспективного оксид-содержащего компонента, который может использоваться в порошковой смеси на основе титана и алюминия.

В представленном исследовании использовали металлическую стружку из отходов обработки заготовок стали 45, которую дополнительно подвергали процедуре окисления и измельчения. Для обеспечения более однородного перемешивания стружки в порошковой смеси ее измельчали в вибросмесителе в течение 4 часов. Измельчение в вибросмесителе со стальными шарами позволила фрагментировать куски стружки до порошкообразного состояния с дисперсностью до 315 мкм. Более мелкая фракция также присутствовала, но доля ее была существенно меньше. Окисление проводили в водной среде и отжиге на воздухе. Полученный порошок из обработанной стальной стружки стали 45 смешивали с порошками титана (ТПП-8) и алюминия (ПА-4) в нескольких вариантах: а) двухкомпонентные смеси 25 вес.% Al+75 вес.% стружки и 25 вес.% стружки+75 вес.% Ti; б) трехкомпонентная смесь 8 вес.% Al+69 вес.% Ti+23 вес.% стружки. Полученные смеси были спрессованы в виде цилиндрических образцов диаметром 10 мм и высотой 10-13 мм с остаточной пористостью не выше 30 %. Также были приготовлены прессовки из полученного порошка стружки. Спекание прессовок проводили в вакуумной печи при температурах 800-1100 °С с выдержкой 60 мин.

Для того, чтобы оценить, какие структурно-фазовые трансформации испытывает материал из стружки стали 45 после всех стадий механо- и термообработки, был проведен рентгеноструктурный анализ исходного состояния стальной стружки после станочной обработки фрезерованием без использования СОЖ и после соответствующих обработок (рисунок 1). Анализ показал, что фазовый состав стружки стали 45 практически не изменился и соответствует состоянию самой исходной заготовки из стали 45. Присутствие возможных окисных компонентов допускается, но их объемная доля очень незначительна, и не превышает область чувствительности рентгеновского аппарата.

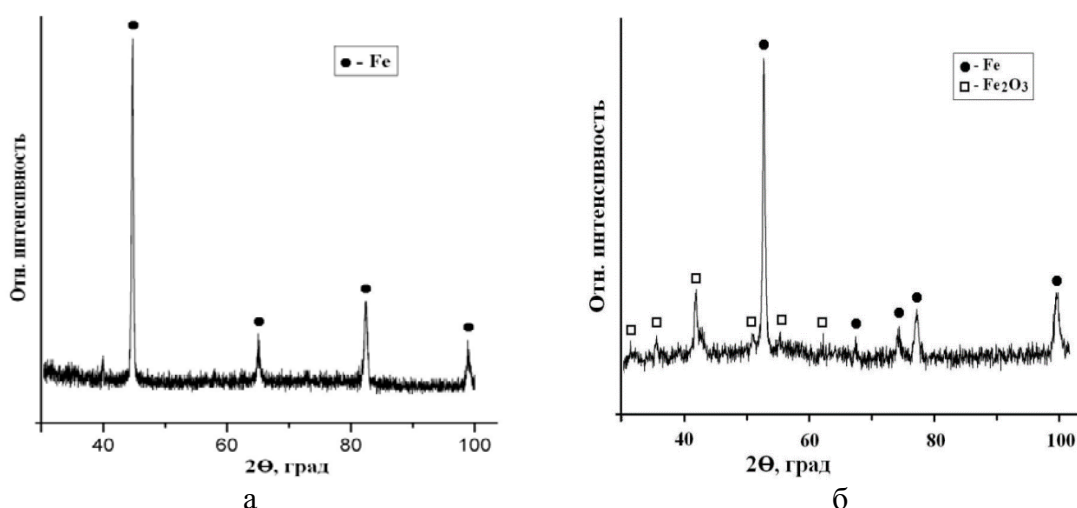


Рисунок 1 – Дифрактограммы металлической стружки из стали 45: а) исходное состояние; б) после выдержки в воде в течение 48 часов и сушке при комнатной температуре

Для формирования достаточного объема оксидной фазы стальная стружка была подвергнута нескольким простейшим вариантам окисления. Наиболее простые и доступные способы сочетали смачивание водой и нагрев на воздухе не выше 400 °С. Достаточно эффективным способом оказалась заливка горячей водой и остыванием при комнатной температуре в течение 24-48 часов. Отожжённая при 400°С стружка плохо измельчалась, так как фактически снимался наклеп, и она становилась более пластичной. Кроме того, РСА показал, что выдержка стружки 2-4 часа при 400°С на воздухе не обеспечивает формирование оксидной фазы на ее поверхности в заметных для рентгена объемах и фактически по своему составу идентична исходному состоянию стружки. При этом, смачивание водой и сушка фрагментированной стальной стружки на воздухе при комнатной температуре уже через 48 часов позволили зафиксировать до 28 об.% оксида Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рисунок 1, б). Этот порошок хорошо прессовался и продемонстрировал удовлетворительную спекаемость при 1000°С. Его РСА анализ после спекания показал, что исходный оксид железа (III) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> переходит в монооксид FeO, а основной фазой является α-железо (рисунок 2, а).

Параллельно рассмотрен вариант получения порошкообразных фрагментов из отходов стружки путем осаждения взвеси продуктов размола стружки (ст45) из воды за счет ее испарения (рисунок 2, б). После высушивания водяного раствора был получен мелкий порошок, фазовый состав которого показал сложную конфигурацию дигидроксокарбоната железа Fe<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> в присутствии Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Поскольку такой порошковый продукт имел очень сложный состав, требовал отдельного изучения и его продуктивность была существенно ниже, чем при обычной процедуре смачивания и динамического измельчения, то при составлении многокомпонентных композиций ограничились отсеянным порошком из измельченной в вибросмесителе после смачивания водой и сушки на воздухе стальной стружки.

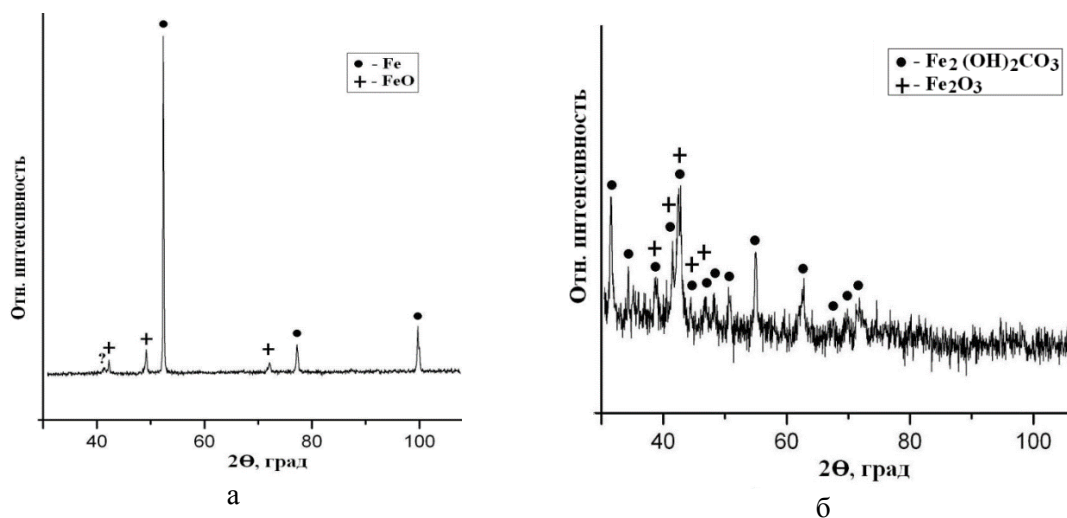


Рисунок 2 – Дифрактограммы порошкового материала из металлической стружки стали 45: а) после спекания при 1100°С; б) осажденного из водного раствора порошкового продукта из стальной стружки

Результаты спекания прессовок из исследуемых композиций показали, что в двухкомпонентном составе 25 вес.% Al+75 вес.% стружки реализуется комплекс параллельных реакций взаимодействия: Al+Fe и Al+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. И та, и другая реакция высокоэкзотермичны. В перспективе этот продукт реакции может быть использован в качестве прекурсора для металломатричного композита. В отличие от этого состава, другая

композиция 75 вес.% Ti+25 вес.% стружки продемонстрировала хорошую спекаемость с высоким процентом уплотнения (усадки). В трехкомпонентной смеси 8 вес.% Al+69 вес.% Ti+23 вес.% стружки несмотря на заметное содержание титана, реакции взаимодействия между компонентами оказали свое влияние на структурообразование композита. В большей степени влияние оказывало взаимодействие алюминия с компонентами порошка стальной стружки ( $\alpha$ -железо и  $Fe_2O_3$ ).

Предварительное исследование порошковых продуктов из измельченной и обработанной стружки стали 45 показали, что эти отходы металлообработки могут использоваться в качестве оксид-содержащих компонентов или прекурсоров для получения металлматричных композитов на основе титана с добавлением оксидной фазы. Подбор соотношения компонентов, режимов обработки и спекания дает возможность получать композиционные материалы с использованием отходов машиностроительного производства.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Администрации Томской области № 22-13-20031, <https://rscf.ru/project/22-13-20031>*

### Список литературы

1. Дьяконов О.М. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов. Минск: Технология, 2012. 262 с.
2. Ровин С.Л., Матюшенко В.М., Валицкая О.М. Чугунная стружка как шихтовой материал. Литье и металлургия. 2008. № 3. С. 158–161.
3. Яценко И.В., Самборук А.Р., Кузнец Е.А. Получение композита  $TiC + Al_2O_3 + AlFe$  из гранулированной шихты методом СВС. Современные материалы, техника и технологии, №3 (6), 2016, 149-153.

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КАТОДНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ NCA И SUPER C45

*Н.А. ЛИТОВЧЕНКО<sup>1</sup>, Л.И. СОРОКИНА<sup>1</sup>, Р.М. РЯЗАНОВ<sup>2</sup>, Е.А. ЛЕБЕДЕВ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

<sup>2</sup> Научно-производственный комплекс «Технологический центр»

E-mail: [natlitovch@gmail.com](mailto:natlitovch@gmail.com)

Одним из наиболее перспективных направлений в микро- и нанoeлектронике является разработка и создание микроразмерных источников питания. В настоящее время существуют различные симметричные планарные суперконденсаторы, в которых электроды из одинаковых материалов расположены в одной плоскости, однако, недостатком таких устройств является сравнительно низкие ёмкостные характеристики. Одним из путей решения данной проблемы является создание микроразмерного литий-ионных аккумуляторов с разнородными электродами. В настоящее время нет простого способа локального формирования многокомпонентных материалов в едином топологическом цикле. Решением данной проблемы является использование процесса электрофоретического осаждения (ЭФО). В рамках данной работы исследовалась особенность осаждения слоев композитного катодного материала методом ЭФО, который позволяет без дорогостоящего оборудования производить на поверхности проводящих подложек формирование слоев материала с возможностью прецизионного контроля их состава и морфологии.