

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по науке и
стратегическим проектам
К.ф.м.н.

А.С. Гоголев
« 25 » 09 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

Диссертация «Формирование керамических композитов на основе МАХ-фаз системы Ti-Si-Al-C из прекерамических бумаг» по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы выполнена в Отделении экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Кроткевич Дмитрий Георгиевич 1990 года рождения обучался в очной аспирантуре по направлению 03.06.01 Физика и астрономия в Отделении экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В 2020 г. с отличием окончил магистратуру в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению 03.04.02 Физика.

С 2020 г. по настоящее время является аспирантом в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению 03.06.01 Физика и астрономия.

Научный руководитель: Кашкаров Егор Борисович, основное место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Отделение экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий, Лаборатория

перспективных материалов и обеспечения безопасности водородных энергосистем, заведующий лабораторией.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Материалы на основе МАХ-фаз системы Ti-Al-Si-C являются перспективными в качестве материалов стойких к высоким температурам, коррозионному воздействию и механическим нагрузкам. Перспективность данных материалов определяется их уникальным сочетанием свойств металлов и керамических материалов, МАХ-фазы системы Ti-Al-Si-C имеют высокие механические свойства, стойки к коррозии, тугоплавки, при этом имеют высокую теплопроводность, электропроводность и поддаются механической обработке. Обладая низкой плотностью материалы на основе МАХ-фаз перспективны для применения в аэрокосмической отрасли, в роли конструкционных и функциональных материалов горячих частей газотурбинных и реактивных двигателей. Также, МАХ-фазы системы Ti-Al-Si-C являются перспективными для транспортной и энергетической отраслей в роли жаропрочных и жаростойких материалов.

Перспективным полуфабрикатом для получения композитов и функциональных материалов на основе МАХ-фаз системы Ti-Al-Si-C являются прекерамические бумаги. Прекерамические бумаги представляют собой новый материал, состоящий из керамического порошка наполнителя и органических связующих. При этом существует возможность варьирования доли и типа порошкового наполнителя в бумагах. Использование прекерамических бумаг позволяет осуществлять послойный контроль структуры и состава конечного материала, что открывает перспективы создания функциональных материалов из прекерамических бумаг.

Искровое плазменное спекания открывает возможность получения мелкозернистых композитов на основе МАХ-фаз системы Ti-Al-Si-C при относительно низких температурах и малом времени выдержки. Такие важные свойства как прочность на изгиб, в том числе при повышенных температурах, и стойкость к окислению будут определяться фазовым составом и микро- и макроструктурой конечных композитов. Важную роль в формировании структуры и фазового состава играют доля порошкового наполнителя МАХ-фазы системы Ti-Al-Si-C и режимы искрового плазменного спекания.

Работа посвящена разработке керамических композитов на основе МАХ-фаз систем Ti-Al-Si-C для потенциального применения в роли жаропрочных и жаростойких материалов для нужд аэрокосмической, транспортной и энергетической отраслей. Представлен способ создания функционально-градиентных по составу материалов на основе МАХ-фаз системы Ti-Al-Si-C. В работе приводятся результаты исследования фазового состава, микро- и макроструктуры, механических свойств, в том числе при повышенных температурах, и стойкости к высокотемпературному окислению.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, непосредственном участии в реализации исследования. Автор принимал участие в производстве исследуемых материалов, пробоподготовке, осуществлял структурный и фазовый анализ, проводил механические испытания. Также автор осуществлял обработку экспериментальных данных, принимал непосредственное участие в обсуждении результатов, и в подготовке публикаций.

Достоверность результатов. Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректностью постановки решаемых задач и их физической обоснованностью, использованием современных методов исследования, большим объемом экспериментальных данных и их статистической обработкой, сопоставлением установленных в работе закономерностей с результатами, полученными другими исследователями.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

1. Впервые показана возможность применения прекерамических бумаг для получения композитных керамических материалов на основе МАХ-фазы $Ti_3Al(Si)C_2$ методом искрового плазменного спекания.

2. Выявлены закономерности влияния параметров искрового плазменного спекания и доли органических компонент в прекерамической бумаге на фазовый состав и микроструктуру получаемых композитов на основе МАХ-фазы $Ti_3Al(Si)C_2$. Установлено, что увеличение температуры спекания и количества органических составляющих в прекерамической бумаге приводит к разложению МАХ-фазы $Ti_3Al(Si)C_2$, в результате чего формируются фазы TiC и Al_2O_3 .

3. Установлено что, снижение содержания МАХ-фазы в композитах приводит к понижению прочности на изгиб, трещиностойкости и увеличению твердости, преимущественно за счет образования более твердой фазы карбида титана. Деформационное поведение композитов характеризуется комплексными механизмами, связанными с поглощением энергии разрушения при реализации механизмов разрушения МАХ-фаз, наличием вторичных фаз TiC и Al_2O_3 и твердого раствора в слоях МАХ-фазы $Ti_3(Al, Si)C_2$.

4. Разработан подход для получения функционально-градиентных материалов из МАХ-фаз системы $Ti-Al-Si-C$ с различным соотношением Al/Si , основанный на послойной укладке прекерамических бумаг с порошковыми наполнителями из Al - и Si -обогащенной МАХ-фазы, демонстрирующие прочность на изгиб более 600 МПа, и устойчивость в условиях высокотемпературного окисления на воздухе при температуре 1300 °С.

Практическая значимость работы заключается в разработке подхода для получения новых композитных и функционально-градиентных материалов на основе МАХ- фаз системы $Ti-Al-Si-C$ методом искрового

плазменного спекания. Впервые для получения указанного класса материалов использовались прекерамические бумаги. Экспериментально установлены закономерности спекания композитов, зависимости фазового состава и микроструктуры от режимов спекания и состава прекерамических бумаг. Получены новые функционально-градиентные материалы из прекерамических бумаг на основе МАХ-фаз системы Ti-Al-Si-C с различным соотношением Al/Si. Практическая значимость также подтверждается выполнением научно-исследовательских работ по тематике диссертационного исследования: грант Российского научного фонда № 3.2054.РНФ.2019 «Разработка научных основ синтеза градиентных керамических материалов на основе МАХ-фаз из прекерамической бумаги методом искрового плазменного спекания» и гранта Президента Российской Федерации МК-1048.2022.4 «Получение новых функциональных металл-керамических ламинированных композитов из прекерамических бумаг», государственного задания «Наука» FSWW-2021-0017 «Лаборатория перспективных материалов и обеспечения безопасности водородных энергосистем».

Ценность научных работ соискателя и полнота изложения материалов в опубликованных работах. Опубликованные работы в полной степени отражают основное содержание диссертационного исследования, пункты научной новизны и практической значимости. Соискателем лично выполнялся анализ и интерпретация результатов исследований, подготовка их к публикации.

По результатам диссертационной работы опубликовано 16 работ, из них 9 в журналах входящих в базу данных Scopus и/или Web of Science и 1в рецензируемом научном журнале, рекомендованном ВАК РФ. Список основных публикаций по теме диссертации:

1. **Krotkevich D. G.**, Kashkarov, E. B., Syrtanov, M. S., Murashkina, T. L., Lider, A. M., Schmiedeke, S., Travitzky, N.. Preceramic paper-derived $Ti_3Al(Si)C_2$ -based composites obtained by spark plasma sintering //Ceramics International. – 2021. – Т. 47. – №. 9. – С. 12221-12227.

2. Kashkarov, E. B., Pushilina, N. S., Syrtanov, M. S., **Krotkevich, D. G.**, Gotman, I., Travitzky, N.. Preceramic paper-derived $SiC_f/Ti_3Al(Si)C_2$ and SiC_f/Ti_3SiC_2 МАХ-phase based laminates fabricated using spark plasma sintering //Scripta Materialia. – 2021. – Т. 194. – С. 113696.

3. Mingazova, Y. R., Kashkarov, E. B., Syrtanov, M. S., Sedanova, E. P., **Krotkevich, D. G.**, Travitzky, N. Formation of gradient porous composites from preceramic papers with Ti_3SiC_2 powder filler //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1989. – №. 1. – С. 012031.

4. Sedanova, E. P., Murashkina, T. L., **Krotkevich, D. G.**, Mingazova, Y. R., Lider, A. M., Travitzky, N. Laminated Ti_3SiC_2/Zr based composites obtained by spark plasma sintering //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1989. – №. 1. – С. 012040.

5. **Krotkevich, D. G.**, Kashkarov, E. B., Syrtanov, M. S., Sedanova, E. P.,

Mingazova, Y. R., Travitzky, N. High-temperature mechanical properties of preceramic paper-derived $Ti_3Al(Si)C_2$ composites obtained by spark plasma sintering //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1989. – №. 1. – С. 012007.

6. Kashkarov, E. B., **Krotkevich, D. G.**, Mingazova, Y. R., Pushilina, N. S., Syrtanov, M. S., Lider, A. M., Travitzky, N. Functionally graded laminated composites fabricated from MAX-phase filled preceramic papers: Microstructure, mechanical properties and oxidation resistance //Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – Т. 42. – №. 5. – С. 2062-2072.

7. **Кроткевич, Д. Г.**, Кашкаров, Е. Б., Мингазова, Ю. Р., Лидер, А. М., Травицкий, Н. Получение градиентных пористых материалов на основе МАХ-фаз из прекерамических бумаг //Известия высших учебных заведений. Физика. 2022. Т. 65, № 12. С. 132-138. – 2022.

8. Kashkarov, E. B., **Krotkevich, D. G.**, Abdulmenova, A. V., Ivashutenko, A. S., Perevislov, S. N., Lider, A. M., Travitzky, N. Spark plasma sintering of Nb/ $Ti_3Al(Si)C_2$ -TiC laminated composites //Materialia. – 2023. – Т. 27. – С. 101673.

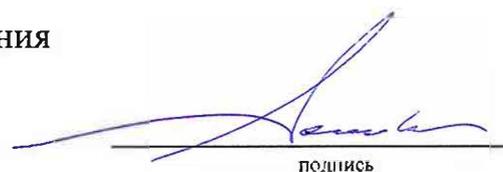
9. **Krotkevich, D. G.**, Kashkarov, E. B., Krinitsyn, M. G., Travitzky, N. High-temperature mechanical properties of MAX-phase based functionally graded laminated composites fabricated from preceramic papers //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2023. – Т. 2899. – №. 1.

Диссертация «Формирование керамических композитов на основе МАХ-фаз системы Ti-Si-Al-C из прекерамических бумаг» Кроткевича Дмитрия Георгиевича **рекомендуется** к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Заключение принято на заседании научного семинара Отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Присутствовало на заседании 10 чел. Результаты голосования: «за» - 10 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 1 от «21» сентября 2023 г.

Председатель научного семинара
Лидер Андрей Маркович, д.т.н.,
Заведующий кафедрой – руководитель отделения
на правах кафедры
Отделения экспериментальной физики



подпись

Секретарь научного семинара
Степанова Екатерина Николаевна, к.т.н.,
доцент Отделения экспериментальной физики



подпись