

СОДЕРЖАНИЕ

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

*Цуканов В. В., Смирнова Д. Л., Кархин В. А., Хомич П. Н., Ефимов С. В.* Расчетное моделирование процесса снижения содержания водорода при противофлокеной термической обработке. Решение диффузионной задачи ..... 6

*Веретенникова Ю. В., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И., Яковлева Е. А.* Влияние термической обработки на механические свойства и хладостойкость среднеуглеродистой среднелегированной высокопрочной стали ..... 17

*Шерина Ю. В., Луц А. Р., Минаков Е. А.* Исследование влияния высокодисперсной фазы карбида титана на физико-механические свойства сплавов AM4,5Kd и AK10M2H ..... 27

*Барактин Б. К., Анисимов Д. М.* Особенности тепловой диссипации в технологии термомеханической обработки металлических материалов ..... 37

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Беличко Д. Р., Волкова Г. К., Малецкий А. В., Исаев Р. Ш.* Влияние протонного облучения на структуру и свойства композитной керамики состава YSZ–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ..... 46

*Хрусталева А. Н., Арбанас Л. А.* Синтез и структура соединений гомологического ряда Ti<sub>n</sub>O<sub>2n-1</sub>, полученных восстановлением в водородной среде ..... 57

*Ткачев Д. А., Жуков И. А., Валихов В. Д., Григорьев М. В.* Исследование структурных и механических свойств композиционной керамики системы AlMgV<sub>14</sub>–TiV<sub>2</sub> ..... 72

*Геращенко Д. А., Макаров А. М., Геращенко Е. Ю., Быстров Р. Ю., Барковская Е. Н., Мухамедзянова Л. В., Попова Е. А., Климов В. Н.* Исследование покрытий системы Ni–Ti–(SiC, WC, B<sub>4</sub>C), нанесенных на поверхность пластин из титанового сплава при совместном использовании методов ХГДН и лазерной обработки ..... 84

*Красиков А. В., Меркулова М. В., Яковлева Н. В., Мухамедзянова Л. В.* Влияние легирования молибденом и кобальтом на коррозионную стойкость электрохимических покрытий на основе системы Ni–W ..... 93

*Каракчиева Н. И., Абзаев Ю. А., Амеличкин И. В., Жуков И. А., Лоскутов В. В., Князев А. С., Сачков В. И., Курзина И. А.* Формирование структурно-фазового состояния Ti–Al материалов с добавками Hf, полученных гидридной технологией ..... 102

*Каракчиева Н. И., Абзаев Ю. А., Амеличкин И. В., Жуков И. А., Князев А. С., Сачков В. И., Курзина И. А.* Формирование структурно-фазового состояния Ti–Al материалов с добавками Zr, полученных гидридной технологией ..... 112

*Шевченко В. Я., Орыщенко А. С., Балабанов С. В., Сычев М. М., Павлова Э. А.* Уравнение Гибсона – Эшби для сотовых материалов на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии ..... 122

*Прохоров Д. А., Зуев С. М.* К анализу физических свойств термоинтерфейсов на основе гексагонального нитрида бора и меди ..... 133

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Габдулхаев К. Р., Валеева А. Р., Твердов И. Д., Готлиб Е. М.* Сравнение состава, свойств и модифицирующего действия природного и синтетического диопсидсодержащих наполнителей в эпоксидных композициях ..... 145

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

*Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Шишков Ф. Л., Юрченко Е. В.* Анализ влияния пластической деформации на распространение микротрещин скола в вероятностной постановке. Часть 1. Постановка задачи и методы исследования ..... 153

*Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Шишков Ф. Л., Юрченко Е. В.* Анализ влияния пластической деформации на распространение микротрещин скола в вероятностной постановке. Часть 2. Результаты исследований ..... 169

## КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

Ганиев И. Н., Амиров А. Дж., Джайлоев Дж. Х., Зокиров Ф. Ш., Амонзода И. Т. Влияние лантана, церия, празеодима на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 в среде электролита NaCl..... 187

Леонов В. П., Малинкина Ю. Ю., Ставицкий О. А., Малашев П. И., Парменова О. Н., Маркова Ю. М. Влияние микродобавок рутения на структуру и коррозионную стойкость титановых  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов ..... 196

## РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Забусов О. О., Угрюмов А. В., Грехов М. М., Мальцев Д. А., Шишкин А. А., Курский Р. А., Рожков А. В. Оценка структуры гидридов и механических свойств облученных оболочек твэлов из сплава Э110 после термомеханических испытаний, имитирующих условия сухого хранения..... 210

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов ..... 221

УДК 621.785.1:669.15–194:669.788

### РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА ПРИ ПРОТИВОФЛОКЕННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ. РЕШЕНИЕ ДИФфуЗИОННОЙ ЗАДАЧИ

В. В. ЦУКАНОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, Д. Л. СМИРНОВА<sup>1</sup>, В. А. КАРХИН<sup>2</sup>, д-р техн. наук, П. Н. ХОМИЧ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, С. В. ЕФИМОВ<sup>3</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49. E-mail: mail@crism.ru

<sup>2</sup> ГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

<sup>3</sup> ГНЦ РФ АО НПО «ЦНИИТМАШ», 15088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4

Поступила в редакцию 1.03.2024

После доработки 5.03.2024

Принята к публикации 14.03.2024

Рассмотрены факторы, влияющие на изменение концентрации водорода в поковках из средне-легированных сталей, и выполнено расчетное моделирование кинетики изменения содержания водорода при различных вариантах предварительной термической обработки. Показано, что при прохождении диффузионных процессов превращения аустенита в изотермических условиях на стадии накопления и в ходе непосредственно изотермического отжига (с учетом роста коэффициента диффузии водорода в  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фазах на несколько порядков) существует возможность достижения максимальной полноты удаления водорода.

*Ключевые слова:* среднелегированные стали, диффузия водорода, противоблоксенная термическая обработка, термические циклы, диффузионная задача, расчетное моделирование

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-119-3-06-16

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов В. В. Поведение водорода при сварке плавлением. – М.: Машиностроение, 1966. – 154 с.
2. Дьяков Ю. Г., Кархин В. А., Аниковский В. В. Кинетика деформаций и напряжений при многопроходной сварке пластин из биметалла // Автоматическая сварка. – 1984. – № 8. – С. 14–18.
3. Кархин В. А., Цуканов В. В., Новиков Е. В., Хомич П. Н. Анализ диффузии водорода при термической противоблоксенной обработке стали // Черные металлы. – 2013. – № 4. – С. 68–72.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»  
<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

5. Böllinghaus T., Hoffmeister H., Middel C. Scatterbands for hydrogen coefficients in steels having a ferritic or martensitic microstructure and steels having an austenitic microstructure at room temperature // *Welding in the World*. – 1996. – V. 37, N 1. – P. 16–23.

6. Ray G. P., Jarman R. A., Thomas J. G. N. Some aspects of crack initiation in mild steel under corrosion fatigue condition // *J. Mater Sci.* – 1994. – V. 29. – P. 47–53.

7. Казанцев Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Металлургия, 1975.

8. Металлургические основы сварки. Нагрев и кристаллизация: Учеб. пособие / В. А. Кархин и др. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 74 с.

9. Цуканов В. В., Смирнова Д. Л., Кархин В. А., Хомич П. Н., Ефимов С. В. Решение задачи теплопроводности для расчетного моделирования процесса снижения содержания водорода при противоблуженной термической обработке // *Вопросы материаловедения*. – 2023. – № 3(115). – С. 68–75.

УДК 669.14.018.41: 621.785.72

### **ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННОЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ**

Ю. В. ВЕРЕТЕННИКОВА, Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук,  
Е. А. ЯКОВЛЕВА, канд. техн. наук

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,  
Шпалерная ул., 49. E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 20.03.2024

После доработки 8.04.2024

Принята к публикации 9.04.2024

Представлены результаты определения механических свойств и хладостойкости среднеуглеродистой среднелегированной высокопрочной износостойкой стали, рекомендуемой для изготовления элементов дноуглубительной техники, после различных режимов термической обработки. Выявлены закономерности изменения прочностных и пластических свойств в зависимости от температуры отпуска. Установлено, что отпуск в интервале температур 560–580°C обеспечивает оптимальное сочетание прочностных и вязкопластических свойств и позволяет повысить хладостойкость исследуемой стали.

*Ключевые слова:* среднеуглеродистая среднелегированная высокопрочная сталь, закалка и отпуск, механические свойства, структура, твердость

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-17-26

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин Р. Г. Роль Северного морского пути в Арктической транспортной системе // *Региональная экономика: теория и практика*. – 2008. – № 23 (80). – С. 50–55.

2. Мерзликин В. В. Основные аспекты эксплуатационной надежности акваторий и подходов каналов морских портов // *Transport business in Russia*. – 2015. – № 5. – С. 169–170.

3. Зайцева С. А. Арктическая гидрография // *Вестник Атомпрома*. – 2022. – № 8. – С. 24–27.

4. Ежов Е. Ю., Погодаев Л. И., Кузьмин А. А. Повышение надежности ведущих деталей рабочих устройств судов технического флота // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. – 2012. – № 4. – С. 37–45.

5. Анализ актуальных направлений исследований в области производства многофункциональных материалов для экстремальных условий эксплуатации / П. П. Полецков, А. Е. Гулин, Д. Г. Емалева и др. // *Новые технологические процессы и оборудование*. Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 109–114.

6. Петровский В. А., Рубан А. Р., Саламех А. Некоторые результаты испытаний образцов на абразивный износ // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2017. – № 44 (4). – С. 40–48.

7. Петровский В. А., Рубан А. Р. Результаты исследования абразивного износа деталей черпаковой цепи земснаряда // Вестник АГТУ. Серия Морская техника и технология. – 2014. – № 1. – С. 94–99.

8. Исследование влияния режимов термической обработки на механические свойства высокопрочного листового проката / П. П. Полецков, М. С. Гущина, Г. А. Бережная и др. // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2015. – № 4 (52). – С. 88–92.

9. Князюк Т. В., Михайлов М. С., Мотовилина, Г. Д., Рябов В. В., Хлусова Е. И. Структура и свойства новых износостойких сталей для сельскохозяйственного машиностроения // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 2(86). – С. 7–19.

10. Патент RU 2606825 С1 Высокопрочная износостойкая сталь для сельскохозяйственных машин (варианты) / Хлусова Е. И., Голосиенко С. А., Рябов В. В. и др. – Заявка 2015125002, опубл. 10.01.2017.

11. Рябов В. В., Хлусова Е. И., Голосиенко С. А. Фазовые превращения, структура и свойства новых высокопрочных сталей с пределом текучести 1200–1700 МПа для деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин // Металлург. – 2015. – № 6. – С. 48–68.

12. Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Влияние структуры, сформированной при закалке на свойства высокопрочной хладостойкой стали после отпуска // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 1 (53). – С. 32–44.

УДК 669.715:669.018.9:666.792.3

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ КАРБИДА ТИТАНА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ АМ4,5Кд И АК10М2Н**

Ю. В. ШЕРИНА, А. Р. ЛУЦ, канд. техн. наук, Е. А. МИНАКОВ

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244. E-mail:rector@samgtu.ru

Поступила в редакцию 20.12.2023

После доработки 16.04.2024

Принята к публикации 22.04.2024

Рассмотрены примеры создания и термической обработки композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов, упрочненных дисперсной фазой карбида титана, обладающих высокими твердостью и модулем упругости, хорошей смачиваемостью расплавом. Отмечено, что в настоящее время наиболее доступным и эффективным способом их получения является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).

Показана возможность получения новых алюмоматричных композиционных материалов на основе промышленных алюминиевых сплавов АМ4,5Кд и АК10М2Н путем их армирования высокодисперсным карбидом титана (10 мас. %). Армирующая фаза образована в расплавах сплавов по технологии СВС из исходных элементных компонентов – порошков титана и технического углерода. На полученных образцах была произведена оценка равномерности распределения керамической фазы по объему матричных сплавов, которая составила 0,15 и 0,12 для образцов АМ4,5Кд – 10%TiC и АК10М2Н – 10%TiC соответственно, что можно отнести к высокой степени равномерности. Произведена оценка физических свойств: пористости, плотности, электропроводности, а также коэффициента термического линейного расширения. Анализ полученных данных показал, что полученные композиционные материалы обладают несколько большей плотностью (на ~4%), чем матричные сплавы, что связано с наличием керамической фазы, низкими значениями пористости (~1%), более низким ТКЛР (на ~6%), чем матричные сплавы, и низким уровнем электропроводности (~25% IACS). Представлены значения механических свойств композиционных материалов АМ4,5Кд – 10%TiC и АК10М2Н – 10%TiC.

Показано, что армирование керамической фазой способствует значительному приросту твердости – на 15 и 42 НВ, а также более высоким значениям предела текучести при сжатии – на 31 и 17 МПа соответственно при сохранении высокого уровня относительной деформации. Полученные результаты свидетельствуют, что разработанные композиционные материалы могут быть рекомендованы к применению для изделий, работающих в условиях повышенных температур и значительного износа.

**Ключевые слова:** алюминий, карбид титана, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, AM4,5Кд, АК10М2Н

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-27-36

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов Ю. М., Антипов В. В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 2. – С. 5–6.
2. Амосов А. П., Луц А. Р., Латухин Е. И., Ермошкин А. А. Применение процессов СВС для получения in-situ алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными частицами карбида титана. Обзор // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2016. – № 1. – С. 39–49.
3. Аксенов А. А. Оптимизация состава и структуры композиционных материалов на алюминиевой и медной основе, получаемых жидкофазными методами и механическим легированием // Дис. ... д-ра техн. наук, 2007. – 390 с.
4. Курганова Ю. А. Разработка и применение дисперсно упрочненных алюмоматричных композиционных материалов в машиностроении // Дис. ... д-ра техн. наук, 2008. – 285 с.
5. Луц А. Р., Амосов А. П., Латухин Е. И., Ермошкин А. А. Армирование сплава Al–5%Cu наночастицами карбида титана методом СВС в расплаве // Известия Самарского научного центра РАН. – 2017. – Т. 19, № 1 (3). – С. 529–535.
6. Луц А. Р., Шерина Ю. В., Амосов А. П., Качура А. Д. Жидкофазное получение методом СВС и термическая обработка композитов на основе алюминий-магниевого сплава, упрочненных высокодисперсной фазой карбида титана // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2023. – Т. 59, № 4. – С. 70–86.
7. Березовский В. В., Шавнев А. А., Ломов С. Б., Курганова Ю. А. Получение и анализ структуры дисперсно упрочненных композиционных материалов системы SiC с различным содержанием армирующей фазы // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 6. – С. 17–23.
8. Калашников И. Е. Развитие методов армирования и модифицирования структуры алюмоматричных композиционных материалов // Дис. ... д-ра техн. наук, 2011. – 428 с.
9. Pan S., Wang T., Jin K., Cai X. Understanding and designing metal matrix nanocomposites with high electrical conductivity: a review // Journal Materials Science. – 2022. – № 57. – P. 6487–6652.
10. Няфкин А. Н., Шавнев А. А., Курбаткина Е. И., Косолапов Д. В. Исследование влияния размера частиц карбида кремния на температурный коэффициент линейного расширения композиционного материала на основе алюминиевого сплава // Труды ВИАМ. – 2020. – №2 (86) . – С. 41–49.
11. Алаттар А. Л. А. Формирование повышенных теплофизических свойств конструкционных материалов системы Al–Cu // Дис. ... канд. техн. наук, 2022. – 110 с.
12. Михеев Р.С. Разработка износостойких дисперсно-наполненных композиционных материалов и покрытий из них // Дис. ... канд. техн. наук, 2010. – 202 с.
13. Рыбаков А. Д. Применение различных форм углерода для СВС высокодисперсного карбида титана в расплаве при получении алюмоматричных композиционных материалов // Дис. ... канд. техн. наук, 2021. – 186 с.
14. Способ оценки и визуализации неоднородности микроструктуры материалов / Д. В. Жуков и др // Технология металлов. – 2023. – № 4. – С. 30–37.
15. Прусов Е. С. Развитие научных основ создания литых комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов для отливок ответственного назначения // Дис. ... д-ра техн. наук. – Нижний Новгород, 2023. – 365 с.

16. Bagliuk G. Hot forging of P/M metal matrix composites // Advanced forming technologies and nanostructured materials. – 2014. – V. 2. – P. 20–21.
17. Баглюк Г. А. Вплив технологічної схеми виготовлення на характер анізотропії і пружні властивості гарячештампованих порошкових алюоматричних композитів // Наукові нотатки. – 2016. – Вип. 54. – С. 20–27.
18. Мостафа А. Л. М. Структуру и свойства композитов на основе алюминия с низким коэффициентом термического расширения // Дис. ... канд. техн. наук. – МИСиС, 2018. – 113 с.
19. Бобылев С. В., Гуткин М. Ю., Шейнерман А. Г. Предел текучести композитов «металл – графен» с однородной и бимодальной зеренной структурой // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2020. – № 1. – С. 28–40.

УДК 621.789:621.77.016.2

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОЙ ДИССИПАЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Б. К. БАРАХТИН, канд. техн. наук, Д. М. АНИСИМОВ

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,  
Шпалерная ул., 49. E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 29.02.2024

После доработки 11.03.2024

Принята к публикации 22.03.2024

Рассмотрены результаты пластического сжатия сталей и сплавов разного химического состава при температурах и скоростях пластической деформации, соответствующих распространенным режимам термомеханической обработки (ТМО). Выявлены особенности диаграмм  $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$ . Процессы деформационной аккумуляции и тепловой диссипации сопровождаются структурными перестройками. В зависимости от химического состава и режимов горячего сжатия структурные превращения происходят самоорганизованно с возможностью возбуждения колебаний и образования деформационных солитонов диссипации.

*Ключевые слова:* горячая пластическая деформация, неустойчивости, диссипация механической энергии, колебания, самоорганизация структур, солитоны деформации.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-37-45

### ЛИТЕРАТУРА

1. Барахтин Б. К., Орыщенко А. С., Малышевский В. А., Варгасов Н. Р., Немец А. М. Методология проведения пластометрических испытаний конструкционных металлов и сплавов: Справ.-метод. рук-во по применению уник. оборудов. – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2010. – 86 с.
2. Барахтин Б. К., Немец А. М. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения: Справ. / Под. ред. Б. К. Барахтина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 490 с.
3. Криштал М. М. Общая теория неустойчивости и мезоскопической неоднородности пластической деформации // Известия РАН. Серия физическая. – 2004. – Т. 68, №10. – С. 1391–1402.
4. Рудской А. И., Варгасов Н. Р., Барахтин Б. К. Термопластическое деформирование металлов. Исследование и моделирование. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 286 с.
5. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Солитоны кривизны как обобщенные волновые структурные носители пластической деформации и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16, № 3. – С. 7–26.
6. Зуев Л. Б. Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. – 208 с.

## ВЛИЯНИЕ ПРОТОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ СОСТАВА $YSZ-SiO_2-Al_2O_3$

Д. Р. БЕЛИЧКО<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, Г. К. ВОЛКОВА<sup>1</sup>, А. В. МАЛЕЦКИЙ<sup>1,2</sup>, Р. Ш. ИСАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина». 283114, Донецк, ул. Розы Люксембург, 72А.

E-mail: danil.belichko@yandex.ru

<sup>2</sup> Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований». 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио Кюри, д. 6

Поступила в редакцию 15.02.2024

После доработки 18.03.2024

Принята к публикации 19.03.2024

Показано воздействие протонного облучения мощностью  $1 \cdot 10^{17}$  ед./см<sup>2</sup> и энергией 2 МэВ на структуру и свойства композитной керамики состава  $ZrO_2-SiO_2-Al_2O_3$ . Установлено, что при такой дозе облучения изменения фазового состава керамики не происходит. Расчеты с помощью методов рентгенографии показали, что облучение протонами создает на поверхности керамики сжимающие напряжения (напряжения 1-го рода) величиной от  $\sim -1$  до  $-2$  ГПа, при этом микронапряжения (напряжения 2-го рода) практически отсутствуют. Анализ снимков (СЭМ) поверхности керамики после облучения показал хаотичное расположение макропор в  $t-ZrO_2$ -матрице, тогда как поры в частицах циркона расположены исключительно по границам включений. Отмечено снижение уровня твердости и плотности в керамике после обработки протонами в связи с образованием большого количества пор.

*Ключевые слова:* нанопорошки, диоксид циркония, композитная керамика, циркон, поток протонов, облучение, структура

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-119-3-46-56

### ЛИТЕРАТУРА

1. Диагностика предела прочности на растяжение ATZ-керамики с различным содержанием  $SiO_2$  методом «бразильского теста» / А. А. Дмитриевский, Д. Г. Жигачева, Н. Ю. Ефремова и др. // Физика твердого тела. – 2022. – Т. 64, № 8. – С. 1018–1021.

2. Леонов А. А., Абдульменова Е. В., Калашников М. П., Ли Цзин. Влияние нановолокон  $Al_2O_3$  на уплотнение, фазовый состав и физико-механические свойства композитов на основе  $ZrO_2$ , полученных свободным вакуумным спеканием // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 4(104). – С. 132–143.

3. Зиганьшин И. Р., Порозова С. Е., Трапезников Ю. Ф. Получение пористого материала на основе нанодисперсного порошка  $ZrO_2 - 5$  мол.% $CeO_2$  // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 4(64). – С. 79–84.

4. Дмитриевский А. А., Жигачев А. О., Жигачева Д. Г., Родаев В. В. Влияние диоксида кремния на стабильность фазового состава и механические свойства керамики на основе диоксида циркония, упрочненной оксидом алюминия // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90, № 12. – С. 2108–2117.

5. Effect of the Compositions on the Biocompatibility of New Alumina–Zirconia–Titania Dental Ceramic Composites / A. Khaskhoussi, L. Calabrese, M. Currò et al. // Materials. – 2020. – N 13. – P. 122586.

6. Чайка, Э. В., Акимов Г. Я., Тимченко И. М. Особенности использования холодного изостатического прессования в технологии конструкционной керамики из ультрадисперсных оксидных порошков // Огнеупоры и техническая керамика. – 2006. – № 8. – С. 27–32.

7. Фазовая стабильность керамики на основе нанопорошков  $ZrO_2 - 3$  mol %  $Y_2O_3$ , компактированных в условиях высокого гидростатического давления / Ф. И. Глазунов, Г. К. Волкова, Т. Е. Константинова и др. // Физика и техника высоких давлений. – 2014. – Т. 24, № 3–4. – С. 100–110.

8. Константинова Т. Е., Даниленко И. А., Горбань О. А. Эффекты влияния высоких давлений в наноразмерных порошковых системах на основе диоксида циркония // Физика и техника высоких давлений. – 2014. – Т. 24, № 2. – С. 67–85.
9. Juntavee N., Attashu S. Effect of sintering process on color parameters of nano-sized yttria partially stabilized tetragonal monolithic zirconia // J Clin Exp Dent. – 2018. – N 10(8). – P. 794–804.
10. Sulfur durability of NOX storage and reduction catalyst with supports of TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> mixed oxides / N. Takahashi, A. Suda, I. Hachisuka et al. // Applied Catalysis B: Environmental. – 2007. – V. 72, N 1–2. – P. 187–195.
11. Дмитриевский А. А., Жигачева Д. Г. Механические свойства композиционной керамики ZrO<sub>2</sub> (CaO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с различным содержанием корунда // 60-я Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности», Витебск, 14–18 мая 2018 г., Витебский государственный технологический университет, 2018. – С. 120–122.
12. Radiation tolerance of nanocrystalline ceramics: insights from Yttria Stabilized Zirconia / S. Dey, J. W. Drazin, Y. Wang et al. // Sci. Rep. – 2015. – N 6. – P. 7746.
13. Effects of He ion irradiation on the microstructures and mechanical properties of t' phase yttria-stabilized zirconia ceramics / Pu, G., Zou, J., Lin, L., et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – V. 771. – P. 777–783.
14. Enhanced radiation tolerance of YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> multilayered nanofilms with pre-existing nanovoids / H. Wang, F. Ren, J. Tang et al. // Acta Materialia. – 2018. – V. 144. – P. 691–699.
15. Improved high temperature radiation damage tolerance in a three-phase ceramic with heterointerfaces / K. K. Ohtaki, M. K. Patel, M. L. Crespillo et al. // Sci Rep. – 2018. – N 8 (1). – P. 13993.
16. Effects of YSZ ceramics doping with silica and alumina on its structure and properties / D. Belichko, T. Konstantinova, G. Volkova et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – V. 287, N 1. – art. 126237
17. Беличко Д. Р., Волкова Г. К., Константинова Т. Е., Малецкий А. В. Эффект легирования керамики на основе диоксида циркония оксидами алюминия и кремния // ФТВД. – 2023. – Т. 33, № 2. – С. 1–10.
18. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
19. Васильев Д. М. Дифракционные методы исследования структур. – М.: Изд-во СПбГТУ, 1998. – 502 с.
20. Взаимодействие радиационного излучения с иерархическими структурами / Б. Л. Оксенгендлер, А. Х. Аширметов, Ф. А. Искандарова и др. // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 1. – С. 37–49.

УДК 621.762.242:661.882

## СИНТЕЗ И СТРУКТУРА СОЕДИНЕНИЙ ГОМОЛОГИЧЕСКОГО РЯДА Ti<sub>n</sub>O<sub>2n-1</sub>, ПОЛУЧЕННЫХ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ В ВОДОРОДНОЙ СРЕДЕ

А. Н. ХРУСТАЛЕВ, Л. А. АРБАНАС

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, Москва, пр. Вернадского, 78, стр. 4. E-mail: rector@mirea.ru

Поступила в редакцию 18.03.2024

После доработки 18.06.2024

Принята к публикации 1.07.2024

Исследован один из малоизученных методов синтеза соединений гомологического ряда Ti<sub>n</sub>O<sub>2n-1</sub>, полученных восстановлением в водородной среде. Серия образцов (n = 2–8) была получена из исходных порошков TiO<sub>2</sub> различной химической чистоты (99,0–99,99 %) с модификацией рутилом в широком диапазоне температур и при разном времени восстановления в среде водорода. Установлено влияние чистоты исходных образцов, температуры и времени восстановления на структуру



полученных соединений. Показаны различия в кристаллической структуре соединений гомологического ряда  $Ti_nO_{2n-1}$ , а также  $\beta$ - и  $\lambda$ -полиморфных модификаций  $Ti_3O_5$ . Обоснован подход к подбору температуры и времени восстановления порошков  $TiO_2$  для получения конкретной фазы в соединениях гомологического ряда  $Ti_nO_{2n-1}$ .

**Ключевые слова:** гомологический ряд  $Ti_nO_{2n-1}$ , восстановление в среде водорода, метод Ритвельда, метод Ле Бейля, полиморфные модификации, фазы Магнели

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-57-71

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cancarevic M., Zinkevich M., Aldinger F. Thermodynamic description of the Ti–O system using the associate model for the liquid phase // *Calphad* – 2007. – N 31 (3). – P. 330–342. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2007.01.009>.
2. Varghese O. K., Gong D. W., Paulose M., Ong K. G., Grimes C. Extreme Changes in the Electrical Resistance of Titania Nanotubes with Hydrogen Exposure // *Advanced Materials*. – 2003. – V. 15, Is. 7–8. – P. 624–627. <http://dx.doi.org/10.1002/adma.200304586>.
3. Heinlaan M., Ivask A., Blinova I., Dubourguier H. C., Kahru A. Toxicity of nanosized and bulk ZnO, CuO and  $TiO_2$  to bacteria *Vibrio fischeri* and crustaceans *Daphnia magna* and *Thamnocephalus platyurus* // *Chemosphere*. – 2008. – N 71. – P. 1308–1316. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.11.047>
4. Guezane Lakoud S., Merabet-Khelassi M., Aribi-Zouioueche L.  $NiSO_4 \cdot 6H_2O$  as a new, efficient, and reusable catalyst for the  $\alpha$ -aminophosphonates synthesis under mild and eco-friendly conditions // *Res Chem Intermed*. – 2016. – V. 42. – P. 4403–4415. <https://doi.org/10.1007/s11164-015-2283-z>.
5. Chunxiang Cui, Hua Liu, Yanchun Li, Jinbin Sun, Ru Wang, Shuangjin Liu, Lindsay Greer A. Fabrication and biocompatibility of nano- $TiO_2$ /titanium alloys biomaterials // *Materials Letters*. – 2005. – V. 59 (24–25). – P. 3144–3148. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.05.037>.
6. Cao S., Wang Y., Cao L., Wang Y., Lin B., Lan W., Cao B. Preparation and antimicrobial assay of ceramic brackets coated with  $TiO_2$  thin films // *The Korean Journal of Orthodontics*. – 2016. – V. 46 (3). – P. 146–154. <https://doi.org/10.4041/kjod.2016.46.3.146>.
7. Solanki L., Dinesh S., Jain R. K., Balasubramaniam A. Effects of titanium oxide coating on the antimicrobial properties, surface characteristics, and cytotoxicity of orthodontic brackets-A systematic review and meta analysis of in-vitro studies // *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. – 2023. – N 13. – V. 5. – P. 553–562. <https://doi.org/10.1016/j.jobocr.2023.05.014>
8. Park H. J., Lee S. E., Park J. Y. Optical property of atomically thin titanium-oxide nanosheet for ultraviolet filtration // *Thin Solid Films*. – 2017. – V. 636. – P. 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.04.039>.
9. Лучинский Г. П. Химия титана. – М.: Химия, 1971. – 471 с..
10. Chen X., Liu L., Huang F. Black titanium dioxide ( $TiO_2$ ) nanomaterials // *Chemical Society Reviews*. – 2015. – V. 7, N 44. – P. 1861–1885. <https://doi.org/10.1039/C4CS00330F>.
11. Liu Y., Tian L., Tan X., Li X., Chen X. Synthesis, properties, and applications of black titanium dioxide nanomaterials // *Science Bulletin*. – 2017. – V. 6, N 62. – P. 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.01.034>.
12. Thompson T. L., Yates J. T. Surface science studies of the photoactivation of  $TiO_2$  – new photochemical processes // *Chemical reviews*. – 2006. – N 106, V. 10. – P. 4428–4453. <https://doi.org/10.1021/cr050172k>.
13. Tang H. et al. Electrical and optical properties of  $TiO_2$  anatase thin films // *Journal of applied physics*. – 1994. – V. 75, Is. 4. – P. 2042–2047. <https://doi.org/10.1063/1.356306>.
14. Tang C., Zhou D., Zhang Q. Synthesis and characterization of Magnéli phases: Reduction of  $TiO_2$  in a decomposed  $NH_3$  atmosphere // *Materials Letters*. – 2012. – N 79. – P. 42–44. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.03.095>.
15. Smith J. R., Walsh F. C., Clae R. L. Electrodes based on Magnéli phase titanium oxides: the properties and applications of Ebonex materials // *Journal of applied electrochemistry*. – 1998. – V. 28. – P. 1021–1033. <https://doi.org/10.1023/A:1003469427858>.

16. WO2008037941 / Simpson, A., Carter, Ph. A Method and apparatus for the manufacture of sub-stoichiometric oxides of titanium by reduction with hydrogen, Publ. 03.04.2008.
17. Gasik M. I., Lyakishev N. P. Theory and technology of electrometallurgy of ferroalloys. – M.: SP Internet Engineering, 1999. – V. 3.
18. Crystal Impact – Software for Chemists and Material Scientists. URL: <https://crystalimpact.com/company.htm> (accessed on 28.04.23).
19. Meagher E. P., Lager G. A. Polyhedral thermal expansion in the TiO<sub>2</sub> polymorphs; refinement of the crystal structures of rutile and brookite at high temperature // *The Canadian Mineralogist*. – 1979. – V. 1, N 17. – P. 77–85.
20. Newham R. E., Haan Y. M. Refinement of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> structures // *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*. – 1962. – V. 1–6, N 117. – P. 235–237.
21. Grey I. E., Madsen I. C., Watts A., Bursill L. A., Kwiatkowska J. New cesium titanate layer structures // *Journal of Solid State Chemistry*. – 1985. – V. 3, N 58. – P. 350–356.
22. Lakkis S., Schlenker C., Chakraverty B. K., Buder R., Marezio M. Metal-insulator transitions in Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystals: Crystal characterization, specific heat, and electron paramagnetic resonance // *Physical Review B*. – 1976. – V. 4, N 14. – P. 1429.
23. Andersson S. The crystal structure of Ti<sub>5</sub>O<sub>9</sub> // *Acta chem. scand.* – 1960. – V. 5, N 14. – P. 1161–1172.
24. Le Page Y., Strobel P. Structural chemistry of Magnéli phases Ti<sub>n</sub>O<sub>2n-1</sub> (4 ≤ n ≤ 9). I. Cell and structure comparisons // *Journal of Solid State Chemistry*. – 1982. – V. 3, N 43. – P. 314–319.
25. Horn M., Schwebdtfeger C. F., Meagher E. P. Refinement of the structure of anatase at several temperatures // *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*. – 1972. – V. 1–6, N 136. – P. 273–281.
26. ISO 13322-1. Particle size analysis - image analysis methods. Part 1: static image analysis methods. International Organization for Standardization. – Geneva, 2004.
27. Akimoto J., Gotoh Y., Oosawa Y., Nonose N., Kumagai T., Aoki K., Takei H. Topotactic oxidation of ramsdellite-type Li<sub>0.5</sub>TiO<sub>2</sub>, a new polymorph of titanium dioxide: TiO<sub>2</sub> (R) // *Journal of Solid State Chemistry*. – 1994. – V. 1, N 113. – P. 27–36.
28. Vasilyeva I., Kuz'micheva G., Pochtar A., Gainanova A., Timaev, O., Dorokhov A., Podbel'skiy V. On the nature of the phase “η-TiO<sub>2</sub>” // *New Journal of Chemistry*. – 2016. – V 1, N 40. – P. 151–161. <https://doi.org/10.1039/C5NJ01870F>.
29. Li M., Dai Y., Pei X., Chen W. Hierarchically porous γ-Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> hollow nanospheres as an effective sulfur host for long-life lithium-sulfur batteries // *Applied Surface Science*. – 2022. – V. 579. – P. 152178. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152178>.
30. Li X., Liu Y., Ma S., Ye J., Zhang X., Wang G., Qiu Y. The synthesis and gas sensitivity of the β-Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> powder: experimental and DFT study // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2015. – V. 649. – P. 939–948.
31. Zhao P. F., Li G. S., Li W. L., Cheng P., Pang Z. Y., Xiong X. L., Lu X. G. Progress in Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>: Synthesis, properties and applications // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2021. – V. 11, N 31. – P. 3310–3327. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65731-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65731-X).
32. Fu X. et al. Preparing high purity λ-Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> and Li/λ-Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> as high-performance electromagnetic wave absorbers // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2021. – V. 25, N 9. – P. 7976–7981. <https://doi.org/10.1039/D1TC01331A>.
33. Cai R. X., Kubota Y., Shuin T., Sakai H., Hashimoto K., Fujishima A. Induction of cytotoxicity by photoexcited TiO<sub>2</sub> particles // *Cancer research*. – 1992. – V.52. – P. 2346.
34. Song Y. Y., Schmidt-Stein F., Bauer S., Schmuki P. J. Amphiphilic TiO<sub>2</sub> nanotube arrays: an actively controllable drug delivery system // *Journal of the American Chemical Society*. – 2009. – V. 131. – P. 4230–4232. <https://doi.org/10.1021/ja810130h>.
35. Shrestha N. K., Macak J. M., Schmidt-Stein F., Hahn R., Miepke C. T., Fabry B., Schmuki P. Magnetically guided titania nanotubes for site-selective photocatalysis and drug release // *Angewandte Chemie International Edition, Int. Ed.* – 2009. – V. 48. – P. 969–972. <https://doi.org/10.1002/anie.200804429>.

36. Xinwei, G., Xia, Y., Liang, H., Yao, D., Zeng, Yu-P. Fabrication of high-performance Magnéli phase  $Ti_4O_7$  ceramics by in-situ hot-pressed sintering in a single step // *Materials Today Communications*. – 2023. – V. 37. – P. 107058. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107058.

37. Padilha A. C. M., Osorio-Guillén J. M., Rocha A. R., Dalpian G. M.  $Ti_nO_{2n-1}$  Magnéli phases studied using density functional theory // *Physical Review B*. – 2014. – V. 3, N 90. – P. 035213. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.035213>.

УДК 666.798.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОЙ КЕРАМИКИ СИСТЕМЫ $AlMgB_{14}-TiB_2$

Д. А. ТКАЧЕВ, И. А. ЖУКОВ, д-р техн. наук, В. Д. ВАЛИХОВ, М. В. ГРИГОРЬЕВ, канд. техн. наук

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: d.tkachev11@gmail.com

Поступила в редакцию 25.03.2024

После доработки 29.03.2024

Принята к публикации 02.04.2024

Керамика  $AlMgB_{14}$  известна как материал, характеризующийся повышенной твердостью в сочетании с низким коэффициентом трения. Композиционные структуры на основе данной керамики могут обладать еще более высокими прочностными характеристиками. В настоящей работе исследованы структурно-фазовые состояния и физико-механические свойства композиционной керамики системы  $AlMgB_{14}-TiB_2$  с варьируемым содержанием  $TiB_2$ , полученной путем горячего прессования исходной шихты на основе предварительно синтезированных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза керамических порошков  $AlMgB_{14}$  и  $TiB_2$ . Установлено, что получаемые материалы характеризуются композиционной структурой, представленной включениями  $TiB_2$ , распределенными в матрице  $AlMgB_{14}$ . Фазовый состав получаемых композитов аналогичен фазовому составу исходной шихты, при этом формируется от 5 до 9 мас. % шпинельной фазы  $MgAl_2O_4$ . Микротвердость композитов  $AlMgB_{14}-TiB_2$  составляет до 19,9 ГПа (твердость керамики  $AlMgB_{14}$ , полученной аналогичным методом, без добавок составляет 7 ГПа). Предел прочности при трехточечном изгибе композиционных материалов системы  $AlMgB_{14}-TiB_2$  составляет 309 МПа.

*Ключевые слова:* композиционная керамика, система  $AlMgB_{14}-TiB_2$ , структурно-фазовое состояние, физико-механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-119-3-724-83

### ЛИТЕРАТУРА

1. A new class of ultra-hard materials based on  $AlMgB_{14}$  / B. A. Cook et al. // *Scr. Mater.* Elsevier BV. – 2000. – V. 42, N 6. – P. 597–602.
2. Tribological study on a novel wear-resistant  $AlMgB_{14}-Si$  composite / J. Chen et al. // *Ceram. Int.* – 2017. – V. 43, N 15. – P. 12362–12371.
3. Synthesis and mechanical properties of  $AlMgB_{14}-Al$  composite / J. Jiang et al. // *J. Alloys Compd.* Elsevier. – 2020. – V. 818. – P. 152910.
4. Synthesis and characterization of  $AlMgB_{14}$  hot pressed under different environments / Z. Yumei et al. // *Sci. Sintering.* National Library of Serbia. – 2017. – V. 49, N 3. – P. 311–317.
5.  $AlMgB_{14}-TiB_2$  composite materials obtained by self-propagating high-temperature synthesis and spark plasma sintering / P.Y. Nikitin et al. // *Ceram. Int.* – 2020. – V. 46, N 14. – P. 22733–22737.
6. Nikitin P. Y., Matveev A. E., Zhukov I. A. Energy-effective  $AlMgB_{14}$  production by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) using the chemical furnace as a source of heat energy // *Ceram. Int.* Elsevier BV. – 2021. – V. 47, N 15. – P. 21698–21704.
7. Phase content, structural and thermodynamic properties of  $AlMgB_{14}$ , obtained by SHS using the chemical furnace / P.Y. Nikitin et al. // *Proceedings of the International conference “Physical mesomechanics. Materials with multilevel hierarchical structure and intelligent manufacturing technology”.* – AIP Publishing, 2022.

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

8. On the structure and properties of AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> composites obtained from SHS powders by spark plasma sintering / P. Nikitin et al. // Materials (Basel). MDPI AG. – 2021. – V. 14, N 19. – P. 5521.
9. Zhou Y.M. et al. Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered AlMgB<sub>14</sub> and AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> // Ceram. Int. Elsevier BV. – 2018. – V. 44, N 7. – P. 8591–8598.
10. Matkovich V.I., Economy J. Structure of MgAlB<sub>14</sub> and a brief critique of structural relationships in higher borides // Acta Crystallogr. B. International Union of Crystallography (IUCr). – 1970. – V. 26, N 5. – P. 616–621.
11. Friction and wear mechanisms in AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> nanocoatings / C. Higdon et al. // Wear. – 2011. – V. 271, N 9. – P. 2111–2115.
12. Analysis of wear mechanisms in low-friction AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> coatings / B.A. Cook et al. // Surf. Coat. Technol. – 2010. – V. 205, № 7. – P. 2296–2301.
13. Tribological Characteristics of AlMgB<sub>14</sub> and Nanocomposite AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> Superhard Coatings / J. Qu et al. // STLE/ASME 2008 International Joint Tribology Conference. ASMEDC, 2008.
14. A study on ultra-hard AlMgB<sub>14</sub> modified by TiB<sub>2</sub> and Ni<sub>3</sub>Al / Y. M. Zhou et al. // Mater. Sci. For. Trans Tech Publications, Ltd. – 2016. – V. 848. – P. 607–612.
15. Mechanical properties and scratch test studies of new ultra-hard AlMgB<sub>14</sub> modified by TiB<sub>2</sub> / A. Ahmed et al. // Tribol. Int. – 2006. – V. 39, N 2. – P. 129–137.
16. Structure and flexural strength of the hot-pressed AlMgB<sub>14</sub> ceramic / D. Tkachev et al. // Phys. Scr. IOP Publishing. – 2023. – V. 98, N 2. – P. 025703.
17. The use of intermetallic AlxMgy powder to obtain AlMgB<sub>14</sub>-based materials / I. A. Zhukov et al. // Mater. Today Commun. Elsevier BV. – 2020. – V. 22, N 100848. – P. 100848.
18. Tkachev D., Nikitin P., Zhukov I., Vorozhtsov A., Marchenko E., Verkhoshanskiy Y., Belchikov I. Structure and flexural strength of the hot-pressed AlMgB<sub>14</sub> ceramic // Phys. Scr. – 2023. – V. 98, N 2. – P. 202398, 025703. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acaeaa>

УДК 621.793.7:621.9.048.7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ni–Ti–(SiC, WC, B<sub>4</sub>C), НАНЕСЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТЬ ПЛАСТИН ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДОВ ХГДН И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, д-р техн. наук, А. М. МАКАРОВ, канд. техн. наук, Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА, Р. Ю. БЫСТРОВ, Е. Н. БАРКОВСКАЯ, Л. В. МУХАМЕДЗЯНОВА, Е. А. ПОПОВА, В. Н. КЛИМОВ

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)

Поступила в редакцию 27.03.2024

После доработки 10.04.2024

Принята к публикации 12.04.2024

Рассматривается технология нанесения композиционных интерметаллидных покрытий системы Ni–Ti, армированных карбидами на основе порошков (SiC, WC, B<sub>4</sub>C), на поверхность пластин из титанового сплава при последовательном использовании метода ХГДН и лазерной обработки. Определены технологические параметры процесса лазерно-термической обработки, обеспечивающей получение композиционных покрытий системы Ni–Ti–(SiC, WC, B<sub>4</sub>C) высокой твердости.

*Ключевые слова:* интерметаллидные покрытия, лазерно-термическая обработка, порошковые материалы, структура, свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-119-3-84-92

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ляшенко Б. А., Подчерняева И. А., Коневцов Л. А., Козырь А. В., Коваленко С. В., Каминский А. В. Материаловедение покрытий титановых сплавов методами физикохимии и электроискрового

легирования. Ч. 1: Покрyтия методами физикохимии. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2019. – 413 с.

2. Chekalova E., Zhuravlev A. Improving the durability of titanium alloy products through a combined hardening technology // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – V. 38, Part 4. – P. 1804–1809.

3. Dong B., Guo X., Zhang K., Zhang Y., Li Z., Wang W., Cai C. Combined effect of laser texturing and carburizing on the bonding strength of DLC coatings deposited on medical titanium alloy // *Surface and Coatings Technology* – 2022. – V. 429. – P. 127951.

4. Мелюков В. В., Чирков А. М. Лазерно-плазменные технологии обработки поверхности // *Proc. of the Fifth Intern. Conf. "Beam technologies. Laser application"*, 2006. – С. 236–240.

5. Геращенко Д. А., Макаров А. М., Геращенко Е. Ю., Васильев А. Ф. Получение функционального интерметаллидного покрытия Ni–Ti путем комбинации технологий гетерофазного переноса и лазерной обработки // *Вопросы материаловедения*. – 2018. – № 3(95). – С. 102–110.

6. Orishich A., Malikov A., Fomin V., Golyshev A., Kosarev V., Ryashin N., Filippov A. Creation of heterogeneous metal-ceramic structures based on Ti, Ni and WC, B<sub>4</sub>C by combined method of laser cladding and cold gas-dynamic spraying // *Procedia CIRP*. – 2018. – V. 74. – P. 268–271.

7. Khatake P., Taluja R., Kumar M.S., Reddy M.M., Al-Ataby F.H., Sood S., Sonia P. Cold spray coating: A review of material systems and future perspectives // *Materials Today: Proceedings*, 2023.

8. Raoulison R.N., Xie Y., Sapanathan T., Planche M.P., Kromer R., Costil S., Langlade C. Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date // *Additive Manufacturing*. – 2018. – V. 19. – P. 134–159.

9. Ocelík V., De Hosson J. T. M. Thick Metallic Coatings Produced by Coaxial and Side Laser Cladding: Processing and Properties // *Advances in Laser Materials Processing (Second edition)*, Woodhead Publishing. – 2018. – P. 413–459.

10. Hu D., Liu Y., Chen H., Wang M. Microstructure and wear resistance of Ni-based tungsten carbide coating by laser cladding on tunnel boring machine cutter ring // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – V. 404. – P. 26432.

11. Соболева Н. Н., Николаева Е. П., Макаров А. В., Малыгина И. Ю. Влияние добавки карбида хрома на структуру и абразивную износостойкость NiCrBSi покрытия, сформированного лазерной наплавкой // *Вектор науки ТГУ*. – 2020. – № 1 (51). – С. 68–76.

12. Геращенко Д. А., Макаров А. М., Геращенко Е. Ю., Васильев А. Ф. Получение функционального интерметаллидного покрытия Ni–Ti путем комбинации технологий гетерофазного переноса и лазерной обработки // *Вопросы материаловедения*. – 2018. – № 3 (95). – С. 102–110.

13. Геращенко Д. А., Ивановский А. А., Макаров А. М., Евдокимов С. Ю. Создание и исследование интерметаллидного покрытия системы Ni–Ti, армированного карбидом вольфрама для повышения износостойкости титанового сплава // *Вопросы материаловедения*. – 2022. – № 4 (112). – С. 50–61.

14. Геращенко Д. А., Удалов Ю. П. Расчет и исследование фазового состава композиционного интерметаллидного слоя, синтезированного на поверхности титанового сплава ВТ6 из порошков Si–SiC и Al–SiC при лазерной обработке // *Вопросы материаловедения*. – 2023. – № 1 (113). – С. 62–71.

УДК 621.793.3:621.357:620.193.27

## **ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ МОЛИБДЕНОМ И КОБАЛЬТОМ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Ni–W**

А. В. КРАСИКОВ, канд. хим. наук, М. В. МЕРКУЛОВА, Н. В. ЯКОВЛЕВА, Л. В. МУХАМЕДЗЯНОВА

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,  
Шпалерная ул., 49. E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 11.12.2023

После доработки 9.01.2024

Принята к публикации 11.01.2024

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

Проведено исследование покрытий системы Ni–W, легированных молибденом и кобальтом, полученных методом электроосаждения. Исследовано влияние концентрации солей легирующего элемента в электролите на химический состав покрытий при различных режимах синтеза. Все полученные покрытия представляют собой нанокристаллический или аморфный твердый раствор вольфрама, молибдена или кобальта в никеле с ГЦК кристаллической решеткой. Проведенные поляризационные измерения позволили установить, что наиболее стойким к коррозии в 3,5%-ном растворе NaCl является покрытие, содержащее 35%W и 8%Mo.

*Ключевые слова:* электрохимические покрытия, легирование молибденом и кобальтом, коррозионная стойкость

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-93-101

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Galikova Z., Chovancova M., Danielik V. Properties of Ni–W alloy coatings on steel substrate // *Chemical Papers*. – 2006. – V. 60(5). – P. 353–359.
2. Cesiulis H., Budreika A. Hydrogen Evolution and Corrosion of W and Mo Alloys with Co and Ni // *Physicochemical Mechanics of Materials*. – 2010. – N 8. – P. 808–814.
3. Obradovic M., Stevanovic J., Despic A., Stevanovic R., Stoch J. Characterization and corrosion properties of electrodeposited Ni–W alloys // *J. Serb. Chem. Soc.* – 2001. – N 66 (11–12). – P. 899–912.
4. Chianpairot A., Lothongkum G., Schuh Ch. A. Boonyongmaneerat Yu. Corrosion of nanocrystalline Ni–W alloys in alkaline and acidic 3.5 wt. %NaCl solutions // *Corrosion Science*. – 2011. – V. 53. – P. 1066–1071.
5. Staffani C. P., Dini W. J., Groza J. R., Palazoglu A. Electrodeposition and corrosion resistance of Ni–W–B coatings // *Journal of materials engineering and performance*. – 1997. – V. 6(4). – P. 413–416.
6. Krolkowski A., Plonska E., Ostrowski A., Donten M., Stojek Z. Effects of Compositional and Structural Features on Corrosion Behavior of Nickel-Tungsten Alloys // *J. Solid State Electrochem.* – 2009. – V. 13. – P. 263–275.
7. Oliveira J. A. M., Almeida A. F., Campos A. R. N., Prasad S., Alves J.J.N., Santana R.A.C. Effect of current density, temperature and bath pH on properties of Ni–W–Co alloys obtained by electrodeposition // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – V. 853. – P. 157104.
8. Farzanek M. A., Raeissi K., Golozar M. A. Effect of current density on deposition process and properties of nanocrystalline Ni–Co–W alloy coatings // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – V. 489. – P. 488–492.
9. Красиков В. Л., Беркман Е. А., Александрова Г. С., Варыпаев В. Н. Каталитически активный катод на основе сплава молибден – никель для гидронных батарей // *Электротехническая промышленность. Сер. «Химические и физические источники тока»*. – 1997. – № 2. – С. 8–9.
10. Yamasaki T., Tomohira R., Ogino Y., Schloßmacher P., Ehrlich Y. Formation of ductile amorphous & nanocrystalline Ni–W alloys by electrodeposition // *Plating & Surface Finishing*. – 2000. – N 87. – P. 148–152.
11. Bobanova Zh., Dikusar A. I., Cesiulis H., Celis J.-P., Prosycevas I. Micromechanical and Tribological Properties of Nanocrystalline Coatings of Iron-Tungsten Alloys Electrodeposited from Citrate-Ammonia Solutions // *Russ. J. Electrochem.* – 2009. – V. 45, N. 8. – P. 895–901.
12. Вячеславов П. М. Электролитическое осаждение сплавов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 112 с.
13. Стасов А. А., Пасечник С. Я. Электроосаждение никельмолибденовых покрытий из пирофосфатного электролита // *Изв. вузов. Химия и хим. технол.* – 1973. – Т. 16, № 4. – С. 600–603.
14. Podlaha E. J., Landolt D. Induced Codepositon. I: An Experimental Investigation of Ni–Mo Alloys. // *J. Electrochem. Soc.* – 1996. – V. 143, N 3. – P. 885–892.
15. Beltowska-Lehman E., Bigos A., Indyka P., Kot M. Electrodeposition and characterisation of nanocrystalline Ni–Mo coatings // *Surf. Coatings Technol.* – 2012. – V. 211. – P. 67–71.
16. Павлова Н. В. Электроосаждение сплава Ni–Mo из электролитов, содержащих молибден в различных степенях окисления // *Автореф. дис. ... канд. хим. наук.* – М.: Изд. центр РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2009. – 16 с.

17. Krasikov A. V., Merkulova M. V., Markov M. A., Bykova A. D. Tungsten- rich Ni–W coatings, electrodeposited from concentrated electrolyte for complex geometry parts protection // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – N 1758(1). – P. 012019.

18. Krasikov A. V., Markov M. A., Bykova A. D., Kastsova A. G., Kravchenko I. N., Galinovskii A. L. Electrochemical synthesis of amorphous layers from a nonequilibrium Co–W alloy as a precursor for nanocomposite coating formation // Russian Metallurgy (Metally). – 2022. – V. 2022, N. 6. – P. 666–673.

19. Красиков А.В., Красиков В.Л. Механизм электроосаждения сплава никель-вольфрам из пирифосфатного электролита // Изв. СПбГТИ (ТУ). – 2016. – № 36 (62). – С. 12–23.

УДК 669.053.4:669.295'71'297

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ Ti–Al МАТЕРИАЛОВ С ДОБАВКАМИ Hf, ПОЛУЧЕННЫХ ГИДРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

Н. И. КАРАКЧИЕВА<sup>1,2</sup>, канд. хим. наук, Ю. А. АБЗАЕВ<sup>3</sup>, д-р физ.-мат. наук,  
И. В. АМЕЛИЧКИН<sup>1</sup>, И. А. ЖУКОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, В. В. ЛОСКУТОВ<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук,  
А. С. КНЯЗЕВ<sup>1</sup>, д-р хим. наук, В. И. САЧКОВ<sup>1</sup>, д-р хим. наук, И. А. КУРЗИНА<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,  
634050, Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: kosovanatalia@yandex.ru

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», 424000, Республика Марий Эл,  
Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»,  
634003, Томск, пл. Соляная, 2

Поступила в редакцию 29.03.2023

После доработки 24.04.2024

Принята к публикации 3.05.2024

Приведено описание структурно-фазового состояния композиционных материалов TiHf<sub>50</sub>, AlHf<sub>50</sub>, TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub>, полученных гидридной технологией. Построена трехкомпонентная фазовая диаграмма для Ti–Al–Hf при температуре 1150°C. Прогноз структурного состояния сплавов TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub> производили на основе эталонных решеток (код USPEX с интерфейсом VASP), дополнительно проведены квантово-химические расчеты энергии TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub> в коде CASTEP. Показано, что в образце сплава TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub> доминируют твердые растворы, в составе которых преобладают основные элементы Al<sub>10</sub>–Ti<sub>9</sub>Al<sub>23</sub>–Ti<sub>8</sub>. Атомы Hf могут быть внедрены в междоузлия [–0.257 0.042 0.2545] (St–Hf–27), [0.0053 –0.0120 –0.0765] (St–Hf–143), [0.5 0.5 0.5] (St–Hf). Внедрение гафния в указанные узлы решеток не нарушает стабилизирующий эффект в системах TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub>. Показано, что максимальное значение микротвердости (4,9 ГПа) получено при испытании образца TiHf<sub>50</sub> (для сравнения: для системы TiAl<sub>50</sub> – 1,2 ГПа, для системы TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub> – 2,2 ГПа).

**Ключевые слова:** композиционные материалы, гидридная технология, гафний, гидрид гафния, гидрид титана, алюминий, структурно-фазовое состояние

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-102-111

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гилев И. О., Шубин А. Б., Котенков П. В. Термодинамические характеристики расплавов бинарной системы Al–Hf // Расплавы. – 2021. – № 1. – С. 46–54.

2. Bai X., Li Y., Xiao B., Rao Y., Liang H., He L., Feng J. Structural, mechanical, electronic properties of refractory Hf–Al intermetallics from SCAN meta-GGA density functional calculations // Materials Chemistry and Physics. – 2020. – N 254. – P. 123423. – DOI 10.1016/j.matchemphys.2020.123423.

3. Скачков В. М., Яценко С. П., Пасечник Л. А., Сабирзянов Н. А. Получение лигатур Al–Sc, Al–Y, Al–Zr, Al–Hf в расплаве солей и последующее их обогащение // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9, № 2–1. – С. 443–448. – DOI 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.443–448.

4. Юхвид В. И., Андреев Д. Е., Санин В. Н., Сачкова Н. В. Энергетическое стимулирование автоволнового синтеза алюминидов гафния // Химическая физика. – 2017. – Т 36, № 9. – С. 40–44. – DOI 10.7868/S0207401X17090163.

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»  
<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

5. Zhou Y. L., Niinomi M., Akahori T. Dynamic Young's Modulus and Mechanical Properties of Ti–Hf Alloys // *Materials Transactions*. – 2004. – V. 45, N 5. – P. 1549–1554.
6. Алексанян А.Г., Маилян Д. Г., Долуханян С. К., Шехтман В. Ш., Тер-Галстян О. П. Синтез гидридов и получение сплавов в системе Ti–Hf–H // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2008. – № 9.
7. Sato H., Kikuchi M., Komatsu M., Okuno O., Okabe T. Mechanical properties of cast Ti–Hf alloys // *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. – 2005. – Т. 72, N 2. – С. 362–367. – DOI 10.1002/jbm.b.30169.
8. Хлебникова Ю. В., Родионов Д. П., Егорова Л. Ю., Суаридзе Т. Р. Кристаллографические особенности структуры  $\alpha$ -фазы гафния и сплавов гафний–титан // *Журнал технической физики*. – 2019. – Т. 89, № 1. – DOI 10.21883/JTF.2019.01.46968.86–18.
9. Kosmachev P. V. Abzaev Yu. A., Vlasov V. A. Quantitative phase analysis of plasma-treated high-silica materials // *Russian Physics Journal*. – 2018. – V. 61, N 2.
10. Oganov A. R., Lyakhov A. O., Valle M. How Evolutionary Crystal Structure Prediction Works and Why // *Acc. Chem. Res*. – 2011. – V. 44, N 3. – P. 227–237.
11. Oganov A. R., Glass C. W. Crystal structure prediction using ab initio evolutionary techniques: Principles and applications / *The Journal of chemical physics*. – 2006. – V. 124, N 24.
12. Ажажа Р. В., Ковтун К. В., Малыхин С. В., Мерисов Б. А., Пугачёв А. Т., Решетняк Е.Н., Хаджай Г.Я. Накопление водорода в гафнии: структура и электросопротивление // *Физика металлов и металловедение*. – 2008. – Т. 105, № 2. – С. 201–205.
13. Chen S., Chen Z., Wang J., Zeng Y., Song W., Xiong X., Li X., Li T. Insight into the effect of Ti substitutions on the static oxidation behavior of (Hf,Ti)C at 2500°C // *Advanced Powder Materials*. – 2008. – V. 3, N 2. – P. 100168. DOI 10.1016/j.apmate.2023.100168.
14. Хлебникова Ю. В., Родионов Д. П., Суаридзе Т. Р., Егорова Л. Ю., Казанцев В. А., Николаева Н. В. EBSD-анализ структуры литых и закаленных сплавов гафний–титан // *Физика металлов и металловедение*. – 2018. – Т. 119, № 9. – С. 913–922. – DOI 10.1134/S0015323018090073.
15. COD [Электронный ресурс] // Crystallography Open Database. URL: <https://www.crystallography.net/cod/search.html> (дата обращения: 28.03. 2024).
16. OQMD [Электронный ресурс] // The Open Quantum Materials Database. URL: <https://oqmd.org/materials/composition> (дата обращения 28.03. 2024).
17. Belgibayeva A., Abzaev Yu., Karakchieva N., Erkasov R., Sachkov V., Kurzina I. The Structural and Phase State of the TiAl System Alloyed with Rare-Earth Metals of the Controlled Composition Synthesized by the “Hydride Technology” // *Metals*. – 2020. – V. 10. – P. 859. – DOI 10.3390/met10070859.
18. Патент РФ 2012128394/02. Высокотемпературный гафнийсодержащий сплав на основе титана / Попова Э. А., Котенков П. В., Пастухов Э. А., Бодрова Л. Е., 2006.

УДК 669.053.4:669.295'71'296

### **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ Ti–Al МАТЕРИАЛОВ С ДОБАВКАМИ Zr, ПОЛУЧЕННЫХ ГИДРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ**

Н. И. КАРАКЧИЕВА<sup>1,2</sup>, канд. хим. наук, Ю. А. АБЗАЕВ<sup>3</sup>, д-р физ.-мат. наук,  
И. В. АМЕЛИЧКИН<sup>1</sup>, И. А. ЖУКОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. С. КНЯЗЕВ<sup>1</sup>, д-р хим. наук,  
В. И. САЧКОВ<sup>1</sup>, д-р хим. наук, И. А. КУРЗИНА<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,  
634050, Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: karakchieva@mail.tsu.ru

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», 424000, Республика Марий Эл,  
Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»,  
634003, Томск, Соляная пл., 2



Поступила в редакцию 29.03.2023

После доработки 24.04.2024

Принята к публикации 3.05.2024

Исследован структурно-фазовый состав композиционных материалов  $TiZr_{50}$ ,  $AlZr_{50}$ ,  $TiAl_{49}Zr_2$ , полученных с использованием гидридной технологии. Построена модельная трехкомпонентная фазовая диаграмма для  $Ti-Al-Zr$  при температуре  $1150^{\circ}C$ . Прогноз структурного состояния сплавов  $TiAl_{49}Zr_2$  проведен на основе эталонных решеток (код USPEX с интерфейсом VASP), квантово-химические расчеты энергии  $TiAl_{49}Zr_2$  – в коде CASTEP. В  $TiAl_{49}Zr_2$  доминируют твердые растворы, в составе которых преобладают основные элементы  $Al_{10}-Ti_9Al_{23}-Ti_8$ . Атомы Zr могут быть внедрены в междоузлия  $[-0.257\ 0.042\ 0.2545]$  (St-Zr-27),  $[0.0053\ -0.0120\ -0.0765]$  (St-Zr-143),  $[-0.3251\ -0.3983\ 0.4880]$  (St-Zr-75). Внедрение Zr в указанные узлы решеток не нарушают стабилизирующего эффекта в системах  $TiAl_{49}Zr_2$ . Все эталонные решетки стабильные. В сплаве  $TiAl_{49}Zr_2$  основными фазами являются  $Al_{10}Ti_9Zr$ ,  $Al_{23}Ti_8Zr$ , вклады которых в теоретическую интенсивность равны 78,57 и 21,43%. В образце  $AlZr_{50}$  сформировались фазы  $ZrAl$ ,  $Zr_2Al_3$ ,  $ZrAl_2$ .

**Ключевые слова:** композиционные материалы, гидридная технология, цирконий, гидрид циркония, гидрид титана, алюминий, структурно-фазовое состояние

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-112-121

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Огородов Д. В., Попов Д. А., Трапезников А. В. Способы получения лигатуры Al-Zr (обзор) // Труды ВИАМ. – 2015. – № 11.
2. Lakshman S. V., Gibbins J. D., Wainwright E. R., Weihs T. P. The effect of chemical composition and milling conditions on composite microstructure and ignition thresholds of AlZr ball milled powders // Powder Technology. – 2019. – V. 343. – P. 87–94. – DOI 10.1016/j.powtec.2018.11.012.
3. Закономерности и механизм формирования алюминидов в системе  $TiH_2-ZrH_2-Al$  в гидридном цикле / Г. Н. Мурадян, С. К. Долуханян, А. Г. Алексанян и др. // Химическая физика. – 2019. – Т. 38, № 1. – С. 38–48. – DOI 10.1134/S0207401X19010102.
4. Zhao Q., Ueno T., Wakabayashi N. A review in titanium-zirconium binary alloy for use in dental implants: Is there an ideal Ti-Zr composing ratio // Japanese Dental Science Review. – 2023. – V. 59. – P. 28–37. – DOI 10.1016/j.jdsr.2023.01.002.
5. Cui W., Liu Y. Fatigue behavior of Ti50Zr alloy for dental implant application // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – V. 793. – P. 212–219. – DOI 10.1016/j.jallcom.2019.04.165.
6. Kosmachev P. V. Abzaev Yu. A., Vlasov V. A. Quantitative phase analysis of plasma-treated high-silica materials / Russian Physics Journal. – 2018. – V. 61, N 2.
7. Oganov A. R., Glass C. W. Crystal structure prediction using ab initio evolutionary techniques: Principles and applications. / The Journal of chemical physics. – 2006. – V. 124, N 24.
8. Oganov A. R., Lyakhov A. O., Valle M. How Evolutionary Crystal Structure Prediction Works and Why // Acc. Chem. Res. – 2011. – V. 44, N 3. – P. 227–237.
9. Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. Т. 1, кн. 1 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.
10. Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. Т. 3, кн. 2 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2000. – 448 с.
11. Трубицын В. Ю., Долгушева Е. Б. Расчет фазовой диаграммы сплава  $TiZr$  и исследование тенденции к расслоению омега-фазы // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53, № 2. – С. 209–214.
12. COD [Электронный ресурс] // Crystallography Open Database. URL: <https://www.crystallography.net/cod/search.html> (дата обращения: 28.03. 2024).
13. OQMD [Электронный ресурс] // The Open Quantum Materials Database. URL: <https://oqmd.org/materials/composition> (дата обращения 28.03. 2024).
14. The structural and phase state of the tial system alloyed with rare-earth metals of the controlled composition synthesized by the “hydride technology” / A. Belgibayeva, Y. Abzaev, N. Karakchieva et al. // Metals. – 2020. – V. 10, N 7. – P. 1–17. – DOI 10.3390/met10070859.

15. Фазовый состав композиционных материалов Ti–Al–Me (Me=Sc, Y, Dy, Ho, Ta), полученных «гидридной технологией» / Н. И. Каракчиева, Ю. А. Абзаев, А. С. Князев и др. // Южно-Сибирский научный вестник. – 2022. – № 5(45). – С. 28–33. – DOI 10.25699/SSSB.2022.45.5.006.

УДК 621.763

### УРАВНЕНИЕ ГИБСОНА – ЭШБИ ДЛЯ СОТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

В. Я. ШЕВЧЕНКО<sup>1,2</sup>, акад. РАН, А. С. ОРЫЩЕНКО<sup>1</sup>, д-р техн. наук, чл. корр. РАН, С. В. БАЛАБАНОВ<sup>2</sup>, М. М. СЫЧЕВ<sup>1,2</sup>, Э. А. ПАВЛОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49. E-mail: mail@crism.ru

<sup>2</sup>Институт химии силикатов РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

<sup>3</sup>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», 190013, Санкт-Петербург, Московский проспект, 24–26

Поступила в редакцию 22.04.2023

После доработки 5.05.2024

Принята к публикации 8.05.2024

Представлены экспериментальные данные о физико-механических свойствах сотовых материалов с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ). Установлено, что зависимость прочности и модуля Юнга от относительной плотности материалов с геометрией ТППМЭ с достаточно высокой точностью соответствует уравнению Гибсона – Эшби. Такие материалы превосходят классические сотовые по механическим свойствам и обладают высокой изотропией механических свойств.

*Ключевые слова:* сотовые материалы, трижды периодические поверхности минимальной энергии, уравнение Гибсона–Эшби, механические свойства

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-122-132

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко В. Я., Ковальчук М. В., Орыщенко А. С. Синтез нового класса материалов с регулярной (периодической) взаимосвязанной микроструктурой // Физика и химия стекла. – 2020. – Т. 46, № 1. – С. 3–11. – DOI 10.31857/S0132665120010187.
2. Shevchenko V. Y., Kovalchuk M. V., Oryshchenko A. S., Perevislov S. N. New chemical technologies based on Turing reaction-diffusion processes // Doklady Chemistry. – 2021. – V. 496, N 2. – P. 28–31.
3. Shevchenko V. Y., Perevislov S. N., Ugol'kov V. L. Physicochemical interaction processes in the carbon (diamond) – silicon system // Glass Physics and Chemistry. – 2021. – V. 47, N 3. – P. 197–208.
4. Ceramic Materials with the Triply Periodic Minimal Surface for Constructions Functioning under Conditions of Extreme Loads / V. Y. Shevchenko, M. M. Sychev, A. E. Lapshin et al. // Glass Phys Chem. – 2017. – V. 43. – P. 605–607, <https://doi.org/10.1134/S1087659617060153>.
5. Polymer Structures with the Topology of Triply Periodic Minimal Surfaces / V. Y. Shevchenko, M. M. Sychev, A. E. Lapshin et al. // Glass Phys Chem. – 2017. – V. 43. – P. 608–610, <https://doi.org/10.1134/S1087659617060177>.
6. Balabanov S., Makogon A., Sychoy M., Evstratov A., Regazzi A., Lopez-Cuesta J. 3D Printing and Mechanical Properties of Polyamide Products with Schwartz Primitive Topology. Technical Physics. – 2020. – N 65. – P. 211–215, <https://doi.org/10.1134/S1063784220020036>.
7. Maskery I., Sturm L., Aremu A.O., Panesar A., Williams C. B., Tuck C. J., Wildman R. D., Ashcroft I. A., Hague R. J. M. Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing // Polymer, Volume. – 2018. – V. 152. – P. 62–71, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.11.049>.

8. Han Lu, Che Shunai. An Overview of Materials with Triply Periodic Minimal Surfaces and Related Geometry: From Biological Structures to Self-Assembled Systems // *Advanced Materials*. – 2018. – N 30, art. 1705708, <https://doi.org/10.1002/adma.201705708>.
9. Xiacong Tian, Kun Zhou. 3D printing of cellular materials for advanced electrochemical energy storage and conversion // *Nanoscale*. – 2020. – N 12. – P. 7416–7432, <https://doi.org/10.1039/D0NR00291G>
10. Alomarah, Amer, Ruan Dong, Masood S., Gao, Zhanyuan. Compressive properties of a novel additively manufactured 3D auxetic structure. *Smart Materials and Structures*. – 2019. – N 28, <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab0dd6>.
11. Qin Yu., Qi Q., Scott P. J., Jiang X. Status, comparison, and future of the representations of additive manufacturing data // *Computer-Aided Design*. – 2019. – V. 111. – P. 44–64, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.02.004>.
12. *Polymer Data Handbook*. – Oxford University Press, 1999.
13. Engelberg, I., Kohn, J., Physico-mechanical properties of degradable polymers used in medical applications: a comparative study // *Biomaterials*. – 1991. – V. 12(3). – P. 292–304.
14. Dinh, Thi & Trang, Pham & Nguyen, Thom & Thu Phuong, Nguyen & Pham, Thi Nam & Trang, Nguyen & Seo-Park, Jun & Hoang, Thai. Effects of Porogen on Structure and Properties of Poly Lactic Acid/Hydroxyapatite Nanocomposites (PLA/HAp) // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2016. – N 16. – P. 9450-9459. DOI: 10.1166/jnn.2016.12032.14.
15. Зиомковская П. Е., Грязнов А. О., Козубский А. М. Определение модуля упругости ABS и PLA-пластиков, используемых в технологиях 3D-печати // *Материалы IV Междунар. студенч. науч.-практ. конф. «Научные исследования и разработки студентов» / Под ред. О. Н. Широкова и др. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – С. 166–169.*
16. Arsentiev, M.Yu., Balabanov, S.V., Sychev, M.M., Dolgin, D.S., Crystalline Design of Cellular Materials // *Glass Physics and Chemistry*. – 2020. – V. 46, No. 6. – P. 638–641.
17. ГОСТ 4651–2014 (ISO 604:2002). – М.: Стандартинформ, 2014.
18. Gibson L. J., Ashby M. F. The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. – Mathematical and Physical Sciences*, 1982. – V. 382, N 1782. – P. 43–59, <http://www.jstor.org/stable/2397268>.
19. Abou-Ali A. M., Lee D.-W., Abu Al-Rub R. K. On the Effect of Lattice Topology on Mechanical Properties of SLS Additively Manufactured Sheet-, Ligament-, and Strut-Based Polymeric Metamaterials // *Polymers*. – 2022. – N 14. – P. 4583. <https://doi.org/10.3390/polym14214583>
20. Sina G. Kh., Bagher M. S., Mehdi D. Effect of topology on strength and energy absorption of PA12 non-auxetic strut-based lattice structures // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022, October. – 10.1016/j.jmrt.2022.09.116.
21. Wang, Z., Liu J., Hui D. Mechanical behaviors of inclined cell honeycomb structure subjected to compression // *Composites. Part B: Engineering*. – 2017. – V. 110. – P. 307–314, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.062>.

УДК 666.792.5:534.2

## **К АНАЛИЗУ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСОВ НА ОСНОВЕ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА И МЕДИ**

Д. А. ПРОХОРОВ<sup>1,2</sup>, С. М. ЗУЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, Москва, пр. Вернадского, 78. E-mail: [prohorovdmiriii97@yandex.ru](mailto:prohorovdmiriii97@yandex.ru)

<sup>2</sup> ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 125438, Москва, ул. Автомоторная, д. 2. E-mail: [sergei\\_zuev@mail.ru](mailto:sergei_zuev@mail.ru)

Поступила в редакцию 22.04.2024

После доработки 26.04.2024

Принята к публикации 3.05.2024

Исследованы физические свойства (тепло- и температуропроводность) термоинтерфейсов на основе порошкообразного нитрида бора с гексагональной кристаллической решеткой (h-BN) и меди с кубической кристаллической решеткой (Cu), предназначенных для охлаждения электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники. Физические свойства термоинтерфейсов определяли флэш-методом. Описана перспективность применения в качестве термоинтерфейса спрессованного порошка гексагонального нитрида бора без использования связующего компонента. Произведено сравнение с физическими свойствами других термоинтерфейсов, получивших широкое распространение в настоящее время.

**Ключевые слова:** термоинтерфейс, гексагональный нитрид бора, медь, охлаждение интегральных микросхем

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-133-144

## ЛИТЕРАТУРА

1. Conformal hexagonal-boron nitride dielectric interface for tungsten diselenide devices with improved mobility and thermal dissipation / Liu D., Chen X., Yan Y., et al. // *Nature Communications*. – 2019. – N 10. – Art. 1188. – P. 2.
2. Sarkarat M., Lanagan M., Ghosh D., Lottes A., Budd K. Rajagopalan R. Improved thermal conductivity and AC dielectric breakdown strength of silicone rubber/BN composites, *Composites Part C: Open Access*, Elsevier Ltd. – 2020. – V. 2. – Art. 100023. – P. 2.
3. Solozhenko V. L., Lazarenko A.G., Petitot J.-P., Kanaev A.V. Bandgap energy of graphite-like hexagonal boron nitride // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2001. – N 62. – P. 1331.
4. Yu S., Kaviany M. Electrical, thermal, and species transport properties of liquid eutectic Ga-In and Ga-In-Sn from first principles // *The Journal of Chemical Physics*, AIP Publishing LLC. – 2014. – V. 140, Art. 064303. – P. 1-8.
5. Martin R. L., Kok J. F. Wind-invariant saltation heights imply linear scaling of aeolian saltation flux with shear stress // *Science Advances*. – 2017. – V. 3, Is. 6. – P. 7.
6. Zuev S. M., Prokhorov D. A. Investigation of the Characteristics of a Graphene-Based Thermal Interface for Cooling Integrated Circuits // *Protection of metals and physical chemistry of surfaces*. Pleiades Publishing. Ltd. – 2023. – V. 59. N 2. – P. 1-8.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
8. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей (определение и корреляция). – Л.: Химия, 1971. – С. 549.
9. Свидетельство об утверждении типа средств измерений № 82575-21. Описание типа средства измерений. Дифрактометры рентгеновские модели ДРОН-8Н и ДРОН-8Т. – ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 2023.
10. Alam, K., Open air X-ray diffractometer for crystallography, compression, contraction, and structural phase transitions with variable temperature capabilities // *Methods X*. – 2024. – V. 12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102703>.
11. Свидетельство об утверждении типа средств измерений № 57491-14. Описание типа средства измерений. Измерители теплофизических параметров модификации LFA 467 HyperFlash. – ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 2022.
12. Bachmann, J., Gleis, E., Schmölder, S., Fruhmann, G., Hinrichsen, O., Photo-DSC method for liquid samples used in vat photopolymerization // *Analytica Chimica Acta*. – 2021. – V. 1153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338268>.
13. Свидетельство об утверждении типа средств измерений № 54912-13. Описание типа средства измерений. Калориметры дифференциальные сканирующие модификаций DSC 200 F3, DSC 204 F1, DSC 204 HP, DSC 404 C, DSC 404 F1, DSC 404 F3. – ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 2023.
14. Sakthi Balan, G., Mohana Krishnan, A., Saravanavel, S., Ravichandran, M., Investigation of hardness characteristics of waste plastics and egg shell powder reinforced polymer composite by stirring route // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – V. 33(7), pp. 4090–4093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.545>.

15. Прохоров Д. А., Зуев С. М. Исследование характеристик термоинтерфейса на основе графена для охлаждения интегральных микросхем // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2023. – Т. 59, № 2. – С. 167–174.

16. Зуев С. М., Кретушев А. В. Исследование микроструктуры люминофоров для лазерных осветительных устройств // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131, вып. 3. – С. 370–379.

УДК 678.686

## СРАВНЕНИЕ СОСТАВА, СВОЙСТВ И МОДИФИЦИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНОГО И СИНТЕТИЧЕСКОГО ДИОПСИДСОДЕРЖАЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ В ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

К. Р. ГАБДУЛХАЕВ<sup>1</sup>, А. Р. ВАЛЕЕВА<sup>2</sup>, И. Д. ТВЕРДОВ<sup>3</sup>, Е. М. ГОТЛИБ<sup>1</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 420015, Казань, Республика Татарстан, ул. Карла Маркса, 68. E-mail: office@kstu.ru

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», 420111, Казань, Республика Татарстан, ул. Карла Маркса, 10

<sup>3</sup> Аналитический исследовательский центр, Комплексная лаборатория «НаноАналитика» 420107, Казань, ул. Петербургская, 50 к. 26

Поступила в редакцию 05.02.2024

После доработки 21.03.2024

Принята к публикации 12.04.2024

Диопсид является одним из ключевых компонентов в составе строительных материалов различного назначения и может использоваться в качестве наполнителя для эпоксидных композиций. Поскольку разработка месторождений данного кальциймагниевого силиката связана с большими трудозатратами, наиболее рациональным представляется использовать синтезированный диопсид на основе золы рисовой шелухи и доломита. Проведено сравнение фазового состава и свойств синтезированного диопсида с диопсидовым концентратом, добываемым в природе. Установлено, что синтезированный кальциймагнийсодержащий силикат содержит на порядок большее количество диопсида, имеет в 3 раза меньший объем пор и почти в 5 раз меньший средний размер частиц по сравнению с природным минералом. Они существенно отличаются и по фазовому и гранулометрическому составам, и по пористости. Как природный, так и синтетический диопсидсодержащие наполнители повышают твердость, износостойкость и жизнеспособность эпоксидных композиций. Более эффективным для эпоксидных материалов с точки зрения эксплуатационных характеристик является наполнитель, синтезированный на основе золы рисовой шелухи.

*Ключевые слова:* эпоксидные композиции, фазовый состав, пористость, твердость, износостойкость, жизнеспособность, природный и синтетический диопсидсодержащие наполнители

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-145-152

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сафонова Т. В., Верещагин В. И., Баяндина Е. В. Строительная керамика на основе композиций низко- и среднепластичного глинистого и диопсидового сырья // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 2. – С. 154–162.

2. Керамические материалы на основе диопсида / В. И. Верещагин, В. К. Меньшикова и др. // Стекло и керамика. – 2010. – № 11. – С. 13–16.

3. Верещагин В. И. Бурученко А. Е., Меньшикова В. К. Безусадочный облицовочный керамический материал на основе диопсидового сырья // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–1. – С. 13.

4. Твердов И. Д., Готлиб Е. М., Нцуму Р. Ш., Ямалеева Е. С. Диопсид как наполнитель эпоксидных полимеров // Южно-Сибирский научный вестник. – 2023. – № 4. – С. 11–15.

5. Козик В. В., Бородин И. А., Борило Л. П., Слизов Ю. Г. Исследование материалов на основе полиэфирной смолы и диопсида // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2004. – Т. 47, № 1. – С. 112–115.

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cism-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

6. Characterization and Evaluation of Mechanical Properties of Dolomite as Filler in Polymers / A.O. Adesakin, O.O. Ajayi, et al. // Chem. Mater. Res. – 2013. – N 3. – P. 36–40.
7. A novel cost-effective approach to fabricate diopside bioceramics / P. A. Srinath, P. V. Azeem, et al. // Advanced powder technology. – 2021. – V. 32, N 3. – P. 875–884.
8. Colombo P., Mera G., Riedel R., Sorarù G.D. Polymer-Derived Ceramics: 40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics // J. Am. Ceram. Soc. – 2010. – N 93 (7). – P. 1805–1837.
9. Изучение влияния высокодисперсных и наноразмерных неорганических добавок на структурно-физические характеристики эпоксидных матриц и свойства трибопластиков / В. К. Крыжановский и др. // Вопросы материаловедения. – 2009. – Т. 57, № 1. – С. 66–76.
10. Минакова Т. С. Адсорбционные процессы на поверхности твердых тел: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2007. – 283 с.
11. Filled epoxy composites based on polyfraction microcalcite / T. A. Nizina, J. A. Sokolova et al. // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – N 83(7). – P. 83–91.
12. Кислотно-основные свойства аморфного диоксида кремния из соломы и шелухи риса / О. Д. Арефьева, П. Д. Пироговская и др. // Химия растительного сырья. – 2021. – № 1. – С. 327–335.
13. Liou T.-H., Liou Y. H. Utilization of Rice Husk Ash in the Preparation of Graphene-Oxide-Based Mesoporous Nanocomposites with Excellent Adsorption Performance // Materials. – Basel. – 2021. – N 14(5). – P. 1214.
14. Старцев О. В., Ефимов В. А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 412–423.
15. Study of the chemical, climatic and thermal resistance of epoxy coatings filled with natural and synthetic wollastonite / E.M. Gotlib, H.T. Nha Phuong et al. // Key Engineering Materials. – 2021. – V. 899. – P. 317–325.

УДК 621.039.531:539.422.22

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
МИКРОТРЕЩИН СКОЛА В ВЕРОЯТНОСТНОЙ ПОСТАНОВКЕ.  
Часть 1. Постановка задачи и методы исследования**

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, В. Н. ФОМЕНКО, канд. техн. наук,  
В. А. ШВЕЦОВА, канд. физ.-мат. наук, Ф. Л. ШИШКОВ, Е. В. ЮРЧЕНКО, канд. техн. наук

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,  
Шпалерная ул., 49. E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 21.02.2024

После доработки 16.04.2024

Принята к публикации 22.04.2024

В части 1 настоящей работы рассмотрены основные физико-механические процессы, происходящие при растяжении цилиндрических образцов в диапазоне температур хрупкого разрушения, и представлена процедура, позволяющая описать влияние пластической деформации на критическое напряжение хрупкого разрушения в вероятностной постановке. Представлены основные положения модели Прометей, описывающей хрупкое разрушение в вероятностной постановке, а также экспериментальные и расчетные методы. Исследования проведены для корпусной реакторной стали 15Х2НМФА в термически охрупченном состоянии и для низколегированной стали Ст.3 в исходном состоянии, которая рассматривается как модельный материал, позволяющий изучать хрупкое разрушение при пластической деформации до 50%.

*Ключевые слова:* вероятность хрупкого разрушения, локальный подход, распространение микротрещины, влияние пластической деформации

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-153-168

## ЛИТЕРАТУРА

1. Pisarenko G. S., Krasowsky A. J. Analysis of kinetics of quasibrittle fracture of crystalline materials // Proc. Int. Conf. Mech. Behav. Mater. "Mechanical Behaviour of Materials", Kyoto 1971. – V. I. – P. 421–432.
2. Ritchie R. O., Knott J. F., Rice J. R. On the relation between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel // J. Mech. Phys. Solids. – 1973. – N 21. – P. 395–410.
3. Beremin F. M. A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel // Metall Trans A. – 1983. – N 14. – P. 2277–2287.
4. Mudry F. A. local approach to cleavage fracture // Nuclear Engineering and Design. – 1987. – N 105. – P. 65–76.
5. Margolin B. Z., Shvetsova V. A. Local criterion for cleavage fracture: structural and mechanical approach // J. Phys. IV. – 1996. – N 6. – P. 225–234.
6. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Karzov G. P. Brittle fracture of nuclear pressure vessel steels. I. Local criterion for cleavage fracture // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 1997. – N 72. – P. 73–87.
7. Lefevre W., Barbier G., Masson R., Rousselier G. A modified Beremin model to simulate the warm prestress effect // Nuclear Eng. and Design. – 2002. – N. 216. – P. 27–42.
8. Bordet S. R., Karstensen A. D., Knowles D. M., Wiesner C. S. A new statistical local criterion for cleavage fracture in steel // Eng. Fract. Mech. – 2005. – V. 72. – P. 435–474.
9. Pineau A. Development of the local approach to fracture over the past 25 years: theory and applications / A. Carpinteri, Y.-W. Mai, R. Ritchie, ed. // ICF11 2005. Honour and Plenary Lectures Presented at the 11<sup>th</sup> International Conference on Fracture (ICF11), Held in Turin, Italy, on March 20–25, 2005. – Springer, 2006. – P. 139–166.
10. Tanguy B., Bouchet C., Bordet S. R., Besson J., Pineau A. Toward a better understanding of a cleavage in RPV steels: Local mechanical conditions and evaluation of a nucleation enriched Weibull model and of the Beremin model over large temperature range / EUROMECH-MECAMAT: 9th European Mechanics of Materials Conference Local Approach to Fracture / J. Besson, D. Moineau, D. Steglich (Eds.), Mines, 2006, pp. 129–134.
11. Мешков Ю. Я. Физические основы разрушения стальных конструкций. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 240 с.
12. Di Fant M., Carius H., Carollo G., Cleizergues O., Le Cog V., Mudry F. Local approach to brittle fracture: Discussion on the effects of temperature and strain on the critical cleavage stress // 2<sup>nd</sup> Griffiths Conf. on Mechanisms of Fracture and their Structural Significance, Sheffield, 13–15 Sept. 1995.
13. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г., Костылев В. И., Швецова В. А. Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 1. Развитие модели Прометей // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4(88). – С. 120–150.
14. Ludwik R. Elemente der technologischen Mechanik. – Berlin, 1909.
15. Иоффе А. Ф., Кирпичева М. В., Левитская М. А. Деформация и прочность кристаллов // Журн. Русск. физ.-хим. общества, часть физ. – 1924. – N 56. – С. 489–504.
16. Давыденков Н. Н. Динамические испытания материалов. – М.: ОНТИ, 1936 – 395 с.
17. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. – М.: Оборонгиз, 1952. – 556 с.
18. Knott J. F. Fundamentals of Fracture Mechanics. – London: Butterworths, 1973.
19. Hahn G. T., Averbach B. L., Owen W. S., Cohen M. Initiation of cleavage microcracks in polycrystalline iron and steel / Ed. B. L. Averbach et al. // Fracture. – MIT Press Cambridge, MA, Wiley, New York, 1959. – P. 91–116.
20. Копельман Л. А., Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – Л.: Машиностроение, 1978. – 231 с.
21. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. В. Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с характеристиками зарождения и распространения микротрещин. Часть 1. Стратегия, программа и методы экспериментальных и расчетных исследований // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 1(117) – С. 173–194.

22. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. В. Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с характеристиками зарождения и распространения микротрещин. Часть 2. Характеристики прочности и пластичности // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 1(117). – С. 195–209.

23. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. В. Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с характеристиками зарождения и распространения микротрещин. Часть 3. Моделирование хрупкого разрушения и анализ связи характеристик зарождения и распространения микротрещин с механизмами охрупчивания // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 2 (118). – С. 166–186.

24. Parrot A., Dahl A., Forget P., Marini B. Evaluation of fracture toughness from instrumented Charpy impact tests for a reactor pressure vessel steel using local approach to fracture / J. Besson, D. Moineau, D. Steglich, ed. // EUROMECH-MECAMAT 2006: local approach to fracture. Mines, 2006. – P. 291–296.

25. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 223 с.

26. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.

27. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Application of a new cleavage fracture criterion for fracture toughness prediction for RPV steels // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. – 2006. – V. 29(9). – P. 697–713.

28. Weibull W. A. A statistical theory of the strength of materials // Roy. Swed. Inst. Eng. Res. – 1939. – N 151. – P. 5–45.

УДК 621.039.531:539.422.22

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ МИКРОТРЕЩИН СКОЛА В ВЕРОЯТНОСТНОЙ ПОСТАНОВКЕ. Часть 2. Результаты исследований**

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, В. Н. ФОМЕНКО, канд. техн. наук,  
В. А. ШВЕЦОВА, канд. физ.-мат. наук, Ф. Л. ШИШКОВ, Е. В. ЮРЧЕНКО, канд. техн. наук

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,  
Шпалерная ул., 49. E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 21.02.2024

После доработки 16.04.2024

Принята к публикации 22.04.2024

В части 2 настоящей работы представлены результаты испытаний на одноосное растяжение гладких цилиндрических образцов из корпусной реакторной стали 15X2НМФА в термически охрупченном состоянии и низколегированной стали Ст. 3 в исходном состоянии. Выполнен анализ поверхности разрушения испытанных образцов методами растровой электронной микроскопии. Вероятность хрупкого разрушения рассчитывалась с помощью Прометей-модели, представленной в части 1 настоящей работы. Установлено, что влияние пластической деформации на вероятность распространения микротрещин вызвано двумя факторами: увеличением критического напряжения хрупкого разрушения из-за формирования новых барьеров для распространяющейся микротрещины вследствие пластической деформации и снижением рабочего объема из-за формирования шейки при растяжении гладкого цилиндрического образца. Предложен унифицированный набор параметров, который может быть использован для учета влияния пластической деформации на вероятность распространения микротрещин скола для корпусной реакторной стали и для низколегированной низкопрочной стали.

*Ключевые слова:* вероятность хрупкого разрушения, локальный подход, распространение микротрещины, влияние пластической деформации

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-169-186



## ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. В. Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с характеристиками зарождения и распространения микротрещин. Часть 2. Характеристики прочности и пластичности // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 1 (117). – С. 195–209.
2. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Application of a new cleavage fracture criterion for fracture toughness prediction for RPV steels // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. – 2006. – N 29 (9). – P. 697–713.
3. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. В. Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с характеристиками зарождения и распространения микротрещин. Часть 1. Стратегия, программа и методы экспериментальных и расчетных исследований // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 1 (117). – С. 173–194.
4. Физическое материаловедение. Т. 4 / Под ред. Б. А. Калина. – М.: МИФИ, 2008. – 696 с.
5. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. В. Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с характеристиками зарождения и распространения микротрещин. Часть 3. Моделирование хрупкого разрушения и анализ связи характеристик зарождения и распространения микротрещин с механизмами охрупчивания // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 2 (118). – С. 166–186.

УДК 669.715:620.193.013

### ВЛИЯНИЕ ЛАНТАНА, ЦЕРИЯ, ПРАЗЕОДИМА НА КОРРОЗИОННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА AlTi0.1 В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

И. Н. ГАНИЕВ<sup>1</sup>, д-р хим. наук, А. Дж. АМИРОВ<sup>1</sup>, Дж. Х. ДЖАЙЛОЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Ф. Ш. ЗОКИРОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, И. Т. АМОНЗОДА, д-р техн. наук

<sup>1</sup>Институт химии им. В. И. Никитина НАН Таджикистана, 734063, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2,  
Республика Таджикистан. E-mail: ganievisatullo48@mail.ru

<sup>3</sup>Таджикский технический университет им. М. С. Осими, Республика Таджикистан,  
734042, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10

Поступила в редакцию 20.02.2024

После доработки 11.04.2024

Принята к публикации 11.04.2024

Приведены результаты исследования влияния добавок лантана, церия и празеодима (0–1,0 мас. %) как модификаторов структуры на анодное поведение алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 в среде электролита NaCl. Исследования проведены потенциостатическим способом со скоростью развертки потенциала 2 мВ/с. Установлено, что с течением времени потенциал свободной коррозии сплавов смещается в положительную сторону и с ростом концентрации модификатора (лантана, церия, празеодима) в алюминиевом проводниковом сплаве приобретает положительное значение. Добавка лантана к алюминиевому проводниковому сплаву AlTi0.1 на 12–23%, церия на 20–30% и празеодима на 25–35% повышают его коррозионную стойкость. Отмечено повышение скорости коррозии сплавов при увеличении концентрации NaCl в растворе независимо от их состава. Рост концентрации хлорид-иона в электролите NaCl приводит к снижению потенциалов свободной коррозии, репассивации и питтингообразованию сплавов.

*Ключевые слова:* алюминиевый сплав AlTi0.1, лантан, церий, празеодим, потенциостатический метод, коррозионно-электрохимическое поведение, стационарный потенциал, потенциал коррозии, скорость коррозии, электролит NaCl

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-119-3-187-195

## ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.
2. Семенов А. П. Антифрикционные материалы: опыт применения и перспективы // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 12. – С. 21–36.
3. Снитовский Ю. П. Влияние состава легирующих элементов на физико-механические свойства алюминия // Вестник Югорского государственного университета. – 2022. – № 4(67). – С. 68–76. <https://doi.org/10.18822/byusu20220468-76>
4. Короткова Н. О., Белов Н. А., Авксентьева Н. Н., Аксенов А. А. Влияние добавки кальция на фазовый состав и физико-механические свойства проводникового сплава Al–0,5%Fe–0,2%Si–0,2%Zr–0,1%Sc // Физика металлов и металловедение. – 2020. – № 121(1). – С. 105–112. <https://doi.org/10.31857/S001532302001009X>
5. Белов Н. А., Алабин А. Н., Прохоров А. Ю. Влияние добавки циркония на прочность и электросопротивление холоднокатаных алюминиевых листов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2009. – №(4). – С. 42–47.
6. Duan Yu., Xu G. F., Zhou L., Xiao D. Achieving high superplasticity of a traditional thermal–mechanical processed non-superplastic Al–Zn–Mg alloy sheet by low Sc additions // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – N 638. – P. 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.03.090>
7. Belov N. A., Alabin A. N., Teleulova A. R. Comparative analysis of alloying additives as applied to the production of heat-resistant aluminum-base wire // Metal Science and Heat Treatment. – 2012. – N 9. – P. 455–459. <https://doi.org/10.1007/s11041-012-9415-5>
8. Белый Д. И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий // Кабели и провода. – 2012. – № 1. – С. 8–15.
9. Chao R. Z., Guan X. H., Guan R. G., Tie D., Lian C., Wang X. Effect of Zr and Sc on mechanical properties and electrical conductivities of Al wires // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2014. – N 24. – P. 3164–3169. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63456-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63456-7)
10. Назаров Ш., Росси С., Бисон П., Пеззато Л., Каллиари И., Ганиев И. Влияние добавки редкоземельных элементов на свойства сплавов Al–Li // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120, № 4. – С. 433–441.
11. Промышленные алюминиевые сплавы / М. Б. Альтман и др. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
12. Белый Д. И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий // Кабели и провода. – 2012. – № 1. – С. 8–15.
13. Chao R. Z., Guan X. H., Guan R. G., Tie D., Lian C., Wang X. Effect of Zr and Sc on mechanical properties and electrical conductivities of Al wires // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2014. – N 24. – P. 3164–3169.
14. Fallah V., Langelier B., Ofori-Opoku N., Raeisia B., Provas N., Esmaeili S. Cluster evolution mechanisms during aging in Al–Mg–Si alloys // Acta Materialia. – 2016. – N 103. – P. 290–300.
15. Дуюнова В. А., Трапезников А. В., Леонов А. А., Коренева Е. А. Модифицирование литейных алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2023. – № 4(122). – С. 14–26.
16. Григорьева И. О., Дресвянников А. Ф., Храмова А. В., Михалишин И. О. Влияние анионов на электрохимическое поведение алюминия в растворах солей // Вестник технологического университета. – 2018. – № 21(7). – С. 46–50.
17. Умарова Т. М., Ганиев И. Н. Коррозия двойных алюминиевых сплавов в нейтральных средах. – Душанбе: Дониш, 2017. – 258 с.
18. Никольский К. К. Защита от коррозии металлических кабелей. – М.: Связь, 1970. – 170 с.
19. Фрейман Л. И., Макаров В. А., Брыксин И. Е. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите. – Л.: Химия, 1972. – 238 с.
20. Ganiev I. N., Rakhmatulloeva G. M., Zokirovc F. Sh., Eshov B. B. The effect of sodium additives on the anodic behavior of AlTi0.1 aluminum conductor alloy in a medium of NaCl electrolyte // Protection of

Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2023. – N 59(4). – P. 451–455, <https://doi.org/10.1134/S2070205123700727>

21. Ганиев И. Н., Файзуллоев Р. Дж., Зокиров Ф. Ш. Влияние кальция на анодное поведение алюминиевого проводникового сплава AlTi<sub>0.1</sub> в среде электролита NaCl // Известия СПбГТИ (ТУ). – 2021. – № 58 (84). – С. 33–37, <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2021-58-84-33-37>

22. Ганиев И. Н., Зокиров Ф. Ш., Амиров А. Дж. Влияние лантана на анодное поведение алюминиевого проводникового сплава AlTi<sub>0.1</sub> в среде электролита NaCl // Вестник ПНИПУ. – 2023. – № 3. – С. 66–78. <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2023.3.05>

23. Петрий О. А. Эквивалент электрохимический // Краткая химическая энциклопедия. Т.5 / Под ред. И. Л. Кнунянц. – М.: Сов. энциклопедия. – С. 979.

УДК 669.295:620.197

## ВЛИЯНИЕ МИКРОДОБАВОК РУТЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ТИТАНОВЫХ $\alpha$ - И ПСЕВДО- $\alpha$ -СПЛАВОВ

В. П. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, Ю. Ю. МАЛИНКИНА, канд. техн. наук,  
О. А. СТАВИЦКИЙ, канд. техн. наук, П. И. МАЛАШЕВ, О. Н. ПАРМЕНОВА, Ю. М. МАРКОВА

НИЦ «Курчатовский институт» – «ЦНИИ КМ «Прометей». E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)

Поступила в редакцию 28.03.2024

После доработки 27.05.2024

Принята к публикации 29.05.2024

Выполнены электрохимические исследования металла поковок из титановых  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов промышленных составов и с добавкой рутения. Построены сравнительные зависимости плотности тока от времени при различных потенциалах в процессе анодной поляризации в 3,5%-ном растворе NaCl для исследуемых титановых сплавов, на основании которых получены потенциостатические поляризационные кривые. Определен так называемый «потенциал пробоя» оксидной пленки при анодной поляризации титановых сплавов различных составов и проведены структурные исследования.

*Ключевые слова:* титановые сплавы, рутений, поляризация, поковки, потенциал пробоя

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-196-209

### ЛИТЕРАТУРА

1. Орыщенко А. С., Кузьмин Ю. Л., Трощенко В. Н., Медяник Т. Е., Подшивалов А. В., Ставицкий О. А. Долговременная электрохимическая защита от коррозионно-эрозионных разрушений в недокуемых морских сооружениях для нефтегазодобычи на шельфе Арктических морей // Практика противокоррозионной защиты. – 2013. – № 2 (68). – С. 56–68.

2. Калинин Г. Ю., Ставицкий О. А. Защита от коррозии корпусов судов и морской техники // Новый оборонный заказ. Стратегии. – 2018. – № 6. – С. 60–62.

3. Николаев Г. И., Кузьмин Ю. Л., Лишевич И. В., Ставицкий О. А. и др. Этапы создания систем катодной защиты от коррозии корпусов атомных ледоколов и арктических морских сооружений // Вопросы материаловедения. – 2021, № 3 (107). – С. 150–162.

4. Михайлов Б. Н., Немыкина О. В. Коррозионное поведение титана в хлоридно-гидроксидных растворах производства хлора и каустика // Ползуновский вестник. – 2008. – № 3. – С. 256–257.

5. Поварова Л. В., Кашеева Е. А., Бибииков Н. Н. Исследование анодной поляризации титана в морской воде // Труды ЦНИИТС. – Вып. 156. – 1973. – С. 53–59.

6. Томашов Н. Д. Титан и коррозионно-стойкие сплавы на его основе. – М.: Металлургия, 1985. – 80 с.

7. Hua F., Mon K., Pasupathi P., Gordon G. Corrosion of Ti Grade 7 and other Ti alloys in nuclear waste repository environments – a review // NACE International CORROSION. – 2004. – Paper N 04689. – 2004. – 52 p.

8. Чечулин Б. Б. Парогенераторы – борьба за ресурс // По пути созидания. Т. 1 / Под ред. акад. И. В. Горынина. – СПб: ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. – 255 с.

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»  
<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

9. Scherbinin V. F., Leonov V. P., Malinkina Yu. Yu. Increase in corrosion resistance of titanium alloy in concentrated aqueous solutions of chlorides at high temperatures // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2013. – V. 4, Is. 6. – P. 537–541.

10. Леонов В. П., Чудаков Е. В., Ртищева Л. П., Малинкина Ю. Ю., Тряев П. В., Михайлов А. С., Пряхин Д. А. Исследование влияния рутения на коррозионные свойства деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов для перспективной гражданской морской техники // *Титан*. – 2016. – № 3 (53). – С. 19–28.

11. ГОСТ 19807-91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. – М.: Издательство стандартов. – 2011. – С. 4.

12. Leonov V. P., Chudakov E. V., Malinkina Yu. Yu. The influence of micro additives of Ru on the structure, corrosive-mechanical strength and fractography of destruction of pseudo-alpha-Ti alloys // *Inorganic materials: Applied research*. – V. 8, № 4. – 2017. – P. 556–565.

13. Leonov V. P., Chudakov E. V., Tretyakova N. V., Malinkina Yu. Yu., Petrov S. N., Tsemenko A. V., Vasilieva E. A. Research of the peculiarities of ruthenium distribution in titanium  $\alpha$ -, pseudo- $\alpha$ - and pseudo- $\beta$ - alloys and its effects on corrosion resistance // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2021. – V. 12, N 6. – P. 1450–1458.

УДК 621.039.54:669.296

### **ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ ГИДРИДОВ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЛУЧЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СПЛАВА Э110 ПОСЛЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ, ИМИТИРУЮЩИХ УСЛОВИЯ СУХОГО ХРАНЕНИЯ**

О. О. ЗАБУСОВ<sup>1,2</sup>, канд. физ.-мат. наук, А. В. УГРЮМОВ<sup>3</sup>, канд. техн. наук,  
М. М. ГРЕХОВ<sup>3</sup>, канд. физ.-мат. наук, Д. А. МАЛЬЦЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А. А. ШИШКИН<sup>3</sup>,  
Р. А. КУРСКИЙ<sup>1</sup>, А. В. РОЖКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва,  
пл. Академика Курчатова, 1. E-mail: nrcki@nrcki.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва,  
Каширское шоссе, 31. E-mail: info@mephi.ru

<sup>3</sup> Акционерное общество «ТВЭЛ», 115409, Москва, Каширское шоссе, 49. E-mail: info@tvel.ru

Поступила в редакцию 15.04.2023

После доработки 17.05.2024

Принята к публикации 20.05.2024

Обоснование безопасности сухого хранения требует надежного прогнозирования механических характеристик оболочек твэлов в зависимости от структурных изменений на всех этапах обращения с ядерным топливом. В настоящей работе проведено исследование структуры гидридов в облученных оболочках твэлов из сплава Э110 в различных состояниях, в том числе после испытаний, имитирующих условия сухого хранения. С помощью программного кода выявлены коэффициенты, наилучшим образом коррелирующие с механическими характеристиками.

Ключевые слова: оболочки тепловыделяющих элементов, сплавы циркония, Э110, гидриды циркония, механические свойства, сухое хранение

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-119-3-210-220

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин В. И., Анисимов О. П., Размашкин Н. В., Тихонов Н. С., Симановский В. М. Хранение ОЯТ – обязательное условие развития атомной энергетики. – СПб.: ПРоАтом, 2006. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?file=article&name=News&sid=770> (дата обращения 15.01.2024).

2. Калинин В. И., Крицкий В. Г., Токаренко А. И., Тихонов Н. С., Размашкин Н. В., Серова А. Л., Балицкая А. Н. Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов. – СПб.: ВНИПИЭТ, 2009. – 124 с.

3. Ruiz-Hervias J., Simbruner K., Cristobal-Beneyto M., Perez-Gallego D., Zencker U. Failure mechanisms in unirradiated ZIRLO® cladding with radial hydrides // J. Nucl. Mater. – 2021. – V. 544. – P. 152668.
4. Konarski P., Cozzo C., Khvostov G., Ferroukhi H. Spent nuclear fuel in dry storage conditions – current trends in fuel performance modeling // J. Nucl. Mater. – 2021. – V. 555. – P. 153138.
5. Simon P. C. A., Frank C., Chen L. Q., Daymond M. R., Tonks M. R., Motta A. T. Quantifying the effect of hydride microstructure on zirconium alloys embrittlement using image analysis // J. Nucl. Mater. – 2021. – V. 547. – 152817.
6. Кобылянский Г. П., Мазаев А. О., Звир Е. А., Еремин С. Г., Чертопьятов Е. В., Обухов А. В. Влияние длительного отжига, моделирующего параметры сухого хранения твэлов ВВЭР-1000, на механические свойства оболочек из сплава Э110 в продольном направлении // Физика и химия обработки материалов. – 2021. – № 4. – С. 42–49.
7. Motta A. T., Capolungo L., Chen L. Q., Cinbiz M. N., Daymond M. R., Koss D. A., Lacroix E., Pastore G., Simon P. C. A., Tonks M. R., Wirth B. D., Zikry M. A. Hydrogen in zirconium alloys: a review // J. Nucl. Mater. – 2019. – V. 518. – P. 440–460.
8. Курский Р. А., Сафонов Д. В., Забусов О. О., Фролов А. С., Мальцев Д. А., Рожков А. В., Шишкин А. А. Эволюция структуры гидридов в облученном сплаве Э110 при термомеханических испытаниях, имитирующих закритические (предельные) режимы сухого хранения // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 1. – С. 108–120.
9. Курский Р. А., Рожков А. В., Забусов О. О., Мальцев Д. А., Скундин М. А., Бандура А. П., Васильева Е. А., Шишкин А. А. Влияние термомеханического воздействия на структуру гидридов в облученных оболочечных трубах из сплава Э110 в условиях длительного «сухого» хранения отработавшего ядерного топлива // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 1 (109). – С. 199–214.

CONTENTS

**METALS SCIENCE. METALLURGY**

- Tsukanov V.V., Smirnova D.L., Karkhin V.A., Khomich P.N., Efimov S.V.* Computational modeling of the process of reducing hydrogen content during anti-flock heat treatment. Solving the diffusion problem.... 6
- Veretennikova Yu.V., Motovilina G.D., Khlusova E.I., Yakovleva E.A.* Heat treatment effects on the mechanical properties and cold resistance of medium-carbon medium-alloyed high-strength steels..... 17
- Sherina Yu.V., Luts A.R., Minakov E.A.* Influence of highly dispersed phase of titanium carbide on physical and mechanical properties of alloys AM4.5Kd and AK10M2N ..... 27
- Barakhtin B.K., Anisimov D.M.* On the thermal dissipation in the thermomechanical treatment of metal materials ..... 37

**FUNCTIONAL MATERIALS**

- Belichko D.R., Volkova G.K., Maletsky A.V., Isaev R.Sh.* Proton irradiation influence on the structure and properties of composite ceramics of the  $YSZ-SiO_2-Al_2O_3$  composition ..... 46
- Khrustalev A.N., Arbanas L.A.* Synthesis and structure of compounds of the homological series  $Ti_nO_{2n-1}$  obtained by reduction in a hydrogen environment ..... 57
- Tkachev D.A., Zhukov I.A., Valikhov V.D., Grigoriev M.V.* Study of structural and mechanical properties of composite ceramics of the  $AlMgB_{14}-TiB_2$  system ..... 72
- Gerashchenkov D.A., Makarov A.M., Gerashchenkova E.Yu., Bystrov R.Yu., Barkovskaja E.N., Mukhamedzyanova L.V., Popova E.A., Klimov V.N.* Study of coatings of the Ni-Ti-(SiC, WC,  $B_4C$ ) system applied to the surface of titanium alloy plates using cold gas dynamic spraying and laser processing ..... 84
- Krasikov A.V., Merkulova M.V., Yakovleva N.V., Mukhamedzyanova L.V.* Effects of molybdenum and cobalt alloying on corrosion resistance of electrochemical coatings based on the Ni-W system ..... 93
- Karakchieva N.I., Abzaev Yu.A., Amelichkin I.V., Zhukov I.A., Loskutov V.V., Knyazev A.S., Sachkov V.I., Kurzina I.A.* Formation of structural-phase state of Ti-Al materials with Hf-additives obtained by hydride technology ..... 102
- Karakchieva N.I., Abzaev Yu.A., Amelichkin I.V., Zhukov I.A., Knyazev A.S., Sachkov V.I., Kurzina I.A.* Formation of structural-phase state of Ti-Al materials with Zr-additives obtained by hydride technology ..... 112
- Shevchenko V.Ya., Oryshchenko A.S., Balabanov S.V., Sychev M.M., Pavlova E.A.* Gibson – Ashby equation for cellular materials based on triply periodic minimal surfaces ..... 122
- Prokhorov D.A., Zuev S.M.* On the analysis of physical properties of thermal interfaces based on hexagonal boron nitride and copper..... 133

**POLYMER STRUCTURAL MATERIALS**

- Gabdulkhaev K.R., Valeeva A.R., Tverdov I.D., Gottlieb E.M.* Comparison of composition, properties and modifying effect in epoxy compositions of natural and synthetic diopside-containing fillers..... 145

**STRUCTURAL INTEGRITY AND SERVICEABILITY OF MATERIALS**

- Margolin B.Z., Fomenko V.N., Shvetsova V.A., Shishkov F.L., Yurchenko E.V.* Plastic strain effect on cleavage microcracks propagation in probabalistic statement. Part 1. Formulation of the problem and research methods ..... 153
- Margolin B.Z., Fomenko V.N., Shvetsova V.A., Shishkov F.L., Yurchenko E.V.* Plastic strain effect on cleavage microcracks propagation in probabalistic statement. Part 2. Research results ..... 169

**CORROSION AND PROTECTION OF METALS**

- Ganiev I.N., Amirov A.Dzh., Dzhaloev Dzh. Kh., Zokirov F.Sh., Amonzoda I.T.* Effect of lanthanum, cerium, praseodymium on corrosion-electrochemical behavior of aluminum conductor alloy AlTi0.1 in NaCl electrolyte ..... 187

Leonov V.P., Malinkina Yu.Yu., Stavitsky O.A., Malashev P.I., Parmenova O.N., Markova Yu.M. Effect of ruthenium microadditives on the structure and corrosion resistance of titanium  $\alpha$ -, pseudo- $\alpha$ -alloys ..... 196

#### RADIATION MATERIALS SCIENCE

Zabusov O.O., Ugryumov A.V., Grekhov M.M., Maltsev D.A., Shishkin A.A., Kurskiy R.A., Rozhkov A.V. Estimation of hydrides structure and mechanical properties of irradiated E110 alloy after thermomechanical tests imitating dry storage conditions..... 210

**Guidelines for authors of the scientific and technical journal “Voprosy Materialovedeniya”. Manuscript requirements**..... 221

UDC 621.785.1:669.15–194:669.788

#### COMPUTATIONAL MODELING OF THE PROCESS OF REDUCING HYDROGEN CONTENT DURING ANTI-FLOCK HEAT TREATMENT. SOLVING THE DIFFUSION PROBLEM

V.V. TSUKANOV<sup>1</sup>, Dr Sc. (Eng), D.L. SMIRNOVA<sup>1</sup>, V.A. KARKHIN<sup>2</sup>, Dr Sc. (Eng),  
P.N. KHOMICH<sup>2</sup>, Cand Sc. (Eng), S.V. EFIMOV<sup>3</sup>, Cand Sc. (Eng)

<sup>1</sup>NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)

<sup>2</sup>Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 29 Politekhnicheskaya St, 195251 St Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup>JSC NPO “TsNIITMASH”, 4 St Sharikopodshipnikovskaya, 115088 Moscow, Russian Federation

Received March 1, 2024

Revised March 5, 2024

Accepted March 14, 2024

**Abstract**—The paper considers factors influencing the change in hydrogen concentration in forgings made of medium-alloy steels. The computational modeling of the kinetics of changes in the hydrogen content under various variants of preliminary heat treatment is performed. It is shown that it is possible to achieve maximum completeness of hydrogen removal during diffusion processes of austenite transformation under isothermal conditions at the accumulation stage and during direct isothermal annealing (taking into account the increase in the diffusion coefficient of hydrogen in the  $\gamma$ - and  $\alpha$ -phases by several orders of magnitude).

**Keywords:** medium-alloy steels, hydrogen diffusion, anti-flock heat treatment, thermal cycles, diffusion problem, computational modeling

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-06-16

#### REFERENCES

1. Frolov, V.V., *Povedenie vodoroda pri svarke plavleniem* [Behavior of hydrogen during fusion welding], Moscow: Mashinostroenie, 1966.
2. Dyakov, Yu.G., Karkhin, V.A., Anikovskiy, V.V., *Kinetika deformatsii napryazhenii pri mnogo-prokhodnoi svarke platin iz bimetalla* [Kinetics of deformations and stresses during multi-pass welding of bimetal plates], *Avtomaticheskaya svarka*, 1984, No 8, pp. 14–18.
3. Karkhin, V.A., Tsukanov, V.V., Novikov, E.V., Khomich, P.N., *Analiz diffuzii vodoroda pri termicheskoi protivoflokennoi obrabotke stali* [Analysis of hydrogen diffusion during thermal anti-flock treatment of steel], *Chernye metally*, 2013, No 4, pp. 68–72.
4. Lykov, A.V., *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity], Moscow: Vysshaya shkola, 1967.
5. Böllinghaus, T., Hoffmeister, H., Middel, C., Scatterbands for hydrogen coefficients in steels having a ferritic or martensitic microstructure and steels having an austenitic microstructure at room temperature, *Welding in the World*, 1996, V. 37, No 1, pp. 16–23.
6. Ray, G.P., Jarman, R.A., Thomas, J.G.N., Some aspects of crack initiation in mild steel under corrosion fatigue condition, *J. Mater. Sci.*, 1994, V. 29, pp. 47–53.

7. Kazantsev, E.I., *Promyshlennye pechi* [Industrial furnaces]: Design and calculation reference book, Moscow: Metallurgiya, 1975.

8. Karkhin, V.A., et al., *Metallurgicheskie osnovy svarki. Nagrev i kristallizatsiya* [Metallurgical fundamentals of welding. Heating and crystallization]: study book, St Petersburg: Polytechnic University, 2014.

9. Tsukanov, V.V., Smirnova, D.L., Karkhin, V.A., Khomich, P.N., Efimov, S.V., Reshenie zadachi teploprovodnosti dlya raschetnogo modelirovaniya protsessa snizheniya soderzhaniya vodoroda pri protivoflokennoi termicheskoi obrabotke [Solving the problem of thermal conductivity for computational modeling of the process of reducing the hydrogen content during anti-flock heat treatment], *Voprosy Materialovedeniya*, 2023, No 3 (115), pp. 68–75.

UDC 669.14.018.41: 621.785.72

## HEAT TREATMENT EFFECTS ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND COLD RESISTANCE OF MEDIUM-CARBON MEDIUM-ALLOYED HIGH-STRENGTH STEELS

Yu. V. VERETENNIKOVA, G. D. MOTOVILINA, Cand Sc. (Eng), E.I. KHLUSOVA, Dr Sc (Eng),  
E.A. YAKOVLEVA, Cand Sc. (Eng)

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received March 20, 2024

Revised April 8, 2024

Accepted April 9, 2024

**Abstract**—The paper studies heat treatment effects on the mechanical properties and cold resistance of medium-carbon, medium-alloyed high-strength cold-resistant steels. Kind of changes in strength and plastic properties depending on the tempering temperature have been revealed. It has been established, that tempering in the temperature range 560–580°C provides an optimal combination of strength and plastic properties and makes it possible to increase the cold resistance of the steel.

**Keywords:** medium-carbon medium-alloy high-strength steel, quenching and tempering, mechanical properties, structure, hardness

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-17-26

### REFERENCES

1. Kasatkin, R.G., Rol Severnogo morskogo puti v Arkticheskoi transportnoi sisteme [The role of the Northern Sea Route in the Arctic transport system], *Regionalnaya ekonomika: teoriya i praktika*, 2008, No 23 (80), pp. 50–55.

2. Merzlikin, V.V., Osnovnye aspekty ekspluatatsionnoi nadezhnosti akvatorii i podkhodnykh kanalov morskikh portov [Main aspects of the operational reliability of water areas and approach channels of sea-ports], *Transport business in Russia*, 2015, No 5, pp. 169–170.

3. Zaytseva, S.A., Arkticheskaya gidrografiya [Arctic hydrography], *Vestnik Atomproma*, 2022, No 8, pp. 24–27.

4. Ezhov, Ye.Yu., Pogodaev, L.I., Kuzmin, A.A., Povyshenie nadezhnosti vedushchikh detaley rabochikh ustroystv sudov tekhnicheskogo flota [Increasing the reliability of leading parts of working devices of technical fleet vessels], *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*, 2012, No 4, pp. 37–45.

5. Poletskov, P.P., Gulin, A.Ye., Emaleeva, D.G., et al. Analiz aktualnykh napravleny issledovany v oblasti proizvodstva mnogofunktsionalnykh materialov dlya ekstremalnykh usloviy ekspluatatsii [Analysis of current areas of research in the production of multifunctional materials for extreme operating conditions], *Novye tekhnologicheskie protsessy i oborudovanie: Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2021, V. 19, No 3, pp. 109–114.

6. Petrovsky, V.A., Ruban, A.R., Salamekh, A., Nekotorye rezultaty ispytany obraztsov na abrazivny iznos [Some results of testing samples for abrasive wear], *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, No 44 (4), pp. 40–48.



7. Petrovsky, V.A., Ruban, A.R., Rezultaty issledovaniya abrazivnogo iznosa detaley cherpakovoy tsepi zemsnyarada [Results of a study of abrasive wear of parts of a dredger's scoop chain], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2014, No 1, pp. 94–99.

8. Poletskov, P.P., Gushchina, M.S., Berezhnaya, G.A., et al., Issledovaniye vliyaniya rezhimov termicheskoy obrabotki na mekhanicheskie svoystva vysokoprochnogo listovogo prokata [Study of the influence of heat treatment modes on the mechanical properties of high-strength rolled sheets], *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2015, No 4 (52), pp. 88–92.

9. Knyazyuk, T.V., Mikhailov, M.S., Motovilina, G.D., Ryabov, V.V., Khlusova, E.I., Struktura i svoystva novykh iznosostoykikh staley dlya selskokhozyaistvennogo mashinostroeniya [Structure and properties of new wear-resistant steels for agricultural engineering], *Voprosy Materialovedeniya*, 2016, No 2 (86), pp. 7–19.

10. Patent RU 2 606 825 C1: *Vysokoprochnaya iznosostoikaya stal dlya selskokhozyaistvennykh mashin (varianty)* [High-strength wear-resistant steel for agricultural machines (options)], E.I. Khlusova, S.A. Golosienko, V.V. Ryabov, et al., Appl. 2015125002, Publ. 10.01.2017.

11. Ryabov, V.V., Khlusova, E.I., Golosienko, S.A., Fazovye prevrashcheniya, struktura i svoystva novykh vysokoprochnykh staley s predelom tekuchesti 1200–1700 MPa dlya detaley rabochikh organov selskokhozyaistvennykh mashin [Phase transformations, structure and properties of new high-strength steels with a yield strength of 1200–1700 MPa for working parts of agricultural machines], *Metallurg*, 2015, No 6, pp. 48–68.

12. Golosienko, S.A., Motovilina, G.D., Khlusova, E.I., Vliyanie struktury, sformirovannoy pri zakalke na svoystva vysokoprochnoy khladoistoikoy stali posle otpuska [The influence of the structure formed during hardening on the properties of high-strength cold-resistant steel after tempering], *Voprosy Materialovedeniya*, 2008, No 1 (53), pp. 32–44.

UDC 669.715:669.018.9:666.792.3

## INFLUENCE OF HIGHLY DISPERSED PHASE OF TITANIUM CARBIDE ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOYS AM4.5Kd AND AK10M2N

Yu.V. SHERINA, A.R. LUTS, Cand Sc. (Eng), E.A. MINAKOV

*Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya St, 443100 Samara, Russian Federation.  
E-mail: rector@samgtu.ru*

Received December 20, 2023

Revised April 16, 2024

Accepted April 22, 2024

**Abstract**—Dispersion-strengthened composite materials belong to the group of promising structural materials characterized by a diverse combination of properties. The work presents examples of the creation and heat treatment of composite materials based on aluminum alloys, strengthened by a dispersed phase of titanium carbide, and characterized by high hardness, elastic modulus and good wettability by the melt. The most accessible, inexpensive and effective way to obtain them is self-propagating high-temperature synthesis (SHS).

The work shows the possibility of obtaining new aluminum matrix composite materials based on industrial aluminum alloys AM4.5Kd and AK10M2N by reinforcing them with 10 wt.% highly dispersed titanium carbide or AM4.5Kd–5.95 vol.% TiC and AK10M2N–5.78 vol.% TiC. The reinforcing phase is formed in alloy melts using the technology of SHS from the initial elemental components—titanium powder and carbon black. Using the obtained samples, an assessment was made of the uniformity of the ceramic phase distribution over the volume of the matrix alloys, which amounted to 0.15 and 0.12 for the samples AM4.5Kd–10%TiC and AK10M2N–10%TiC, respectively, which constitutes a high degree of uniformity.

An assessment was made of physical properties such as porosity, density, electrical conductivity, as well as the coefficient of thermal linear expansion. Analysis of the data allows us to say that the final composite materials AM4.5Kd–10%TiC and AK10M2N–10%TiC have a slightly higher density ( $\uparrow$ ~4%) than the matrix alloys, due to the presence of a ceramic phase, low porosity values (~1%), lower TCLE ( $\downarrow$ ~6%) than matrix alloys and low electrical conductivity (~25% IACS). This article also presents data on the values of the mechanical properties of composite materials AM4.5Kd–10%TiC and AK10M2N–10%TiC. It has been

shown that reinforcement with a ceramic phase contributes to a significant increase in hardness by 15 and 42 HB, as well as higher values of the compressive yield strength by 31 and 17 MPa, respectively, while maintaining a high level of relative deformation. The results obtained allow us to conclude that the developed composite materials can be recommended for products used under conditions of elevated temperatures and significant wear.

**Keywords:** aluminum, titanium carbide, self-propagating high-temperature synthesis, AM4.5Kd, AK10M2N

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-27-36

## REFERENCES

1. Tarasov, Yu.M., Antipov, V.V., *Novye materialy VIAM – dlya perspektivnoi aviatsionnoi tekhniki proizvodstva OAO “OAK”* [New VIAM materials – for promising aviation equipment produced by UAC JSC], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, No 2. pp. 5–6.
2. Amosov, A.P., Luc, A.R., Latukhin, E.I., Ermoshkin, A.A., *Primenenie protsessov SVS dlya polucheniya in-situ alyumomatrichnykh kompozitsionnykh materialov, diskretno armirovannykh nanorazmernymi chastitsami karbida titana* [Application of SHS processes to produce in-situ alumina matrix composites discretely reinforced with nanoscale titanium carbide particles]: Review, *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2016, No 1, pp. 39–49.
3. Aksenov, A.A., *Optimizatsiya sostava i struktury kompozitsionnykh materialov na alyuminievoi i mednoi osnove, poluchaemykh zhidkofaznymi metodami i mekhanicheskim legirovaniem* [Optimization of composition and structure of aluminum and copper-based composite materials produced by liquid-phase methods and mechanical alloying]: Thesis for degree of Doctor of Sciences (Eng), Moscow, 2007.
4. Kurganova, Yu.A., *Razrabotka i primeneniye dispersno uprochnennykh alyumomatrichnykh kompozitsionnykh materialov v mashinostroenii* [Development and application of dispersion hardened aluminum matrix composite materials in mechanical engineering]: Thesis for degree of Doctor of Sciences (Eng), Moscow, 2008.
5. Luts, A.R., Amosov, A.P., Latukhin, E.I., Ermoshkin, A.A., *Armirovaniye splava Al-5%Cu nanochastitsami karbida titana metodom SVS v rasplave* [Reinforcement of Al-5%Cu alloy with titanium carbide nanoparticles by SHS in melt], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, V. 19, No 1 (3), 2017, pp. 529–535.
6. Luts, A.R., Sherina, Yu.V., Amosov, A.P., Kachura, A.D., *Zhidkofaznoe poluchenie metodom SVS i termicheskaya obrabotka kompozitov na osnove alyuminievo-magnievyykh splavov, uprochnennykh vysokodispersnoi fazoi karbida titana* [Liquid-phase SHS production and heat treatment of composites based on aluminum-magnesium alloys hardened with highly dispersed titanium carbide phase], *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, V. 59, No 4, pp. 70–86.
7. Berezovsky, V.V., Shavnev, A.A., Lomov, S.B., Kurganova, Yu.A., *Poluchenie i analiz struktury dispersno uprochnennykh kompozitsionnykh materialov sistemy SiC s razlichnym sodержaniem armiruyushchei fazy* [Preparation and analysis of the structure of dispersion hardened SiC composites with different content of reinforcing phase], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, No 6, pp. 17–23.
8. Kalashnikov, I.E., *Razvitiye metodov armirovaniya i modifitsirovaniya struktury alyumomatrichnykh kompozitsionnykh materialov* [Development of methods of reinforcement and structure modification of aluminum matrix composite materials]: Thesis for degree of Doctor of Sciences (Eng), Moscow, 2011.
9. Pan, S., Wang, T., Jin, K., Cai, X., *Understanding and designing metal matrix nanocomposites with high electrical conductivity: a review*, *Journal Materials Science*, 2022, No 57, pp. 6487–6652.
10. Niafkin, A.N., Shavnev, A.A., Kurbatkina, E.I., Kosolapov, D.V., *Issledovanie vliyaniya razmera chastits karbida kremniya na temperaturny koeffitsient lineinogo rasshireniya kompozitsionnogo materiala na osnove alyuminievogo splava* [Investigation of the influence of silicon carbide particle size on the temperature coefficient of linear expansion of aluminum alloy-based composite material], *Trudy VIAM*, 2020, No 2 (86), pp. 41–49.
11. Alattar, A.L.A., *Formirovaniye povyshennykh teplofizicheskikh svoystv konstruktsionnykh materialov sistemy Al–Cu* [Formation of increased thermophysical properties of structural materials of Al-Cu system]: Thesis for degree of Candidate of Sciences (Eng), St Petersburg, 2022.

12. Mikheev, R.S., *Razrabotka iznosostoikikh dispersno-napolnennykh kompozitsionnykh materialov i pokryty iz nikh* [Development of wear-resistant disperse-filled composite materials and coatings from them]: Thesis for degree of Candidate of Sciences (Eng), Moscow, 2010.
13. Rybakov, A.D., *Primenenie razlichnykh form ugleroda dlya SVS vysokodispersnogo karbida titana v rasplave pri poluchenii alyumomatrichnykh kompozitsionnykh materialov* [Application of different forms of carbon for SHS of highly dispersed titanium carbide in the melt at obtaining alumina matrix composite materials]: Thesis for degree of Candidate of Sciences (Eng), Samara, 2021.
14. Zhukov, D.V., et al., Sposob otsenki i vizualizatsii neodnorodnosti mikrostruktury material [Method of assessment and visualization of inhomogeneity of microstructure of materials], *Tekhnologiya metallov*, 2023, No 4, pp. 30–37.
15. Prusov, E.S., *Razvitie nauchnykh osnov sozdaniya litykh kompleksno-armirovannykh alyumomatrichnykh kompozitsionnykh materialov dlya otlivok otvetstvennogo naznacheniya* [Development of scientific bases for creation of cast complex-reinforced aluminomatrix composite materials for castings of responsible purpose]: Thesis for degree of Doctor of Sciences (Eng), Nizhny Novgorod, 2023.
16. Baglyuk, G., Hot forging of P/M metal matrix composites, *Advanced forming technologies and nanostructured materials*, 2014, V. 2, pp. 20–21.
17. Baglyuk, G.A., Vpliv tekhnologichnoi skhemi vigotovlenniya na kharakter anizotropii i pruzhni vlastivosti garyacheshtampovaniykh poroshkovykh alyuomatrichnykh kompozitiv [Influence of the technological scheme of manufacturing on the character of anisotropy and elastic properties of hot-stamped powdered alumomatrix composites], *Naukovi notatki*, 2016, V. 54, pp. 20–27.
18. Mostafa, A.L.M., *Struktura i svoystva kompozitov na osnove alyuminiya s nizkim koeffitsientom termicheskogo rasshireniya* [Structure and properties of aluminum-based composites with low coefficient of thermal expansion]: Thesis for degree of Candidate of Sciences (Eng), MISiS, 2018.
19. Bobylev, S.V., Gutkin, M.Yu., Sheinerman, A.G., Predel tekuchesti kompozitov “metall-grafen” s odnorodnoi i bimodalnoi zerennoi strukturoi [Yield strength of metal-graphene composites with homogeneous and bimodal grain structure], *Izvestiya RAN: Mekhanika tverdogo tela*, 2020, No 1, pp. 28–40.

UDC 621.789:621.77.016.2

## ON THE THERMAL DISSIPATION IN THE THERMOMECHANICAL TREATMENT OF METAL MATERIALS

B.K. BARAKHTIN, Cand Sc. (Eng), D.M. ANISIMOV

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpaleynaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received February 29, 2024

Revised March 11, 2024

Accepted March 22, 2024

**Abstract**—The results of plastic compression of steels and alloys of different chemical compositions at temperatures and rates of plastic deformation corresponding to common thermomechanical treatment (TMT) regimes are considered. The features of the diagrams  $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$  are revealed. The processes of strain accumulation and thermal dissipation are accompanied by structural rearrangements. Depending on the chemical composition and hot compression modes, structural transformations occur self-organized, with the possibility of excitation of oscillations and the formation of dissipative solitons.

**Keywords:** hot plastic deformation, instabilities, dissipation of mechanical energy, oscillations, self-organization of structures, deformation solitons

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-37-45

## REFERENCES

1. Barakhtin, B.K., Oryshchenko, A.S., Malyshevsky, V.A., Vargasov, N.R., Nemets, A.M., *Metodologiya provedeniya plastometricheskikh ispytany konstruksionnykh metallov i splavov* [Methodology of conducting plastometric tests of structural metals and alloys]: reference book, St Petersburg: CRISM Prometey, 2010.
2. Barakhtin, B.K., Nemets, A.M., *Metally i splavy. Analiz i issledovanie. Fiziko-analiticheskie metody issledovaniya metallov i splavov. Nemetallicheskie vkluycheniya* [Metals and alloys. Analysis and research.

Physico-analytical methods for the study of metals and alloys. Non-metallic inclusions]: reference book, B. K. Barakhtin (Ed.), St Petersburg: Professional, 2006.

3. Krishtal, M.M., Obshchaya teoriya neustoichivosti i mezoskopicheskoj neodnorodnosti plasticheskoj deformatsii [General theory of instability and mesoscopic heterogeneity of plastic deformation], *Izvestiya RAN. Ser. fizicheskaya*, 2004, V. 68, No 10, pp. 1391–1402.

4. Rudskoy, A.I., Vargasov, N.R., Barakhtin, B.K., *Termoplasticheskoe deformirovanie metallov. Issledovanie i modelirovanie* [Thermoplastic deformation of metals. Research and modeling], St Petersburg: Polytechnic University, 2018.

5. Panin, V.E., Egorushkin, V.E., Solitony krivizny kak obobshchennye volnovye strukturnye nositeli plasticheskoj deformatsii i razrusheniya [Curvature solitons as generalized wave structural carriers of plastic deformation and fracture], *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2013, V. 16, No 3, pp. 7–26.

6. Zuev, L.B., *Avtovolnovaya plastichnost. Lokalizatsiya i kollektivnye mody* [Autowave plasticity. Localization and collective modes], Moscow: FIZMATLIT, 2019.

UDC 666.798.2:621.039.531

## PROTON IRRADIATION INFLUENCE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPOSITE CERAMICS OF THE YSZ–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> COMPOSITION

D.R. BELICHKO<sup>1</sup>, Cand Sc. (Phys-Math), G.K. VOLKOVA<sup>1</sup>, A.V. MALETSKY<sup>1,2</sup>, R.Sh. ISAEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A.A. Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, 72 St Rosa Luxemburg, 283114 Donetsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, 6 St Joliot Curie, 141980 Dubna, Moscow Region, Russian Federation

Received February 15, 2024

Revised March 18, 2024

Accepted March 19, 2024

**Abstract**—The effect of proton irradiation with a power of  $1 \cdot 10^{17}$  units/cm<sup>2</sup> and an energy of 2 MeV on the structure and properties of composite ceramics of the composition ZrO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is shown. It has been established that at this irradiation dose, the phase composition of the ceramic does not change. Calculations using X-ray diffraction methods have shown that proton irradiation creates compressive stresses (stresses of the 1st kind) ranging from  $\sim -1$  to  $-2$  GPa on the surface of field ceramics, while microstresses (stresses of the 2nd kind) are practically absent. Analysis of SEM images of the ceramic surface after irradiation showed a chaotic arrangement of macropores in the t–ZrO<sub>2</sub> matrix, while pores in zircon particles are located exclusively along the boundaries of inclusions. A decrease in the level of hardness and density in ceramics after proton treatment was noted due to the formation of a large number of pores.

**Keywords:** nanopowders, zirconium dioxide, composite ceramics, zircon, proton flow, irradiation, structure

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-46-56

## REFERENCES

1. Dmitrievsky, A.A., Zhigacheva, D.G., Efremova, N.Yu., et al., Diagnostika predela prochnosti na rastyazhenie ATZ-keramiki s razlichnym sodержaniem SiO<sub>2</sub> metodom brazil'skogo testa, *Fizika tverdogo tela*, 2022, V. 64, No 8, pp. 1018–1021.

2. Leonov, A.A., Abdulmenova, E.V., Kalashnikov, M.P., Li Czin, Vliyanie nanovolokon Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na uplotnenie, fazovy sostav i fiziko-mekhanicheskie svoistva kompozitov na osnove ZrO<sub>2</sub>, poluchennykh svobodnym vakuumnym spekaniem [The effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofibers on the sealing, phase composition and physico-mechanical properties of ZrO<sub>2</sub>-based composites obtained by free vacuum sintering], *Voprosy Materialovedeniya*, 2020, No 4 (104), pp.132–143.

3. Ziganshin, I.R., Porozova, S.E., Trapeznikov, Yu.F., Poluchenie poristogo materiala na osnove nanodispersnogo poroshka ZrO<sub>2</sub> – 5 mol.%SeO<sub>2</sub> [Obtaining a porous material based on nanodisperse powder ZrO<sub>2</sub> – 5 mol.%CeO<sub>2</sub>], *Voprosy Materialovedeniya*, 2010, No 4 (64), pp.79–84.

4. Dmitrievsky, A.A., Zhigachev, A.O., Zhigacheva, D.G., Rodaev, V.V., Vliyanie dioksida kremniya na stabilnost fazovogo sostava i mekhanicheskie svoistva keramiki na osnove dioksida tsirkoniya, up-rochnennoi oksidom alyuminiya [The effect of silicon dioxide on the stability of the phase composition and mechanical properties of ceramics based on zirconium dioxide, reinforced with aluminum oxide], *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2020, V. 90, No 12, pp. 2108–2117.
5. Khaskhoussi, A., Calabrese, L., Currò, M., et al., Effect of the Compositions on the Biocompatibility of New Alumina–Zirconia–Titania Dental Ceramic Composites, *Materials*, 2020, No 13, pp. 122586.
6. Chaika, E.V., Akimov, G.Ya., Timchenko, I.M., Osobennosti ispolzovaniya kholodnogo izostatichekogo pressovaniya v tekhnologii konstruksionnoi keramiki iz ultradispersnykh oksidnykh poroshkov [Features of the use of cold isostatic pressing in the technology of structural ceramics made of ultrafine oxide powders], *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2006, No 8, pp. 27–32.
7. Glazunov, F.I., Volkova, G.K., Konstantinova, T.E., et al., Fazovaya stabilnost keramiki na osnove nanoporoshkov  $ZrO_2 - 3 \text{ mol.}\% Y_2O_3$ , kompaktirovannykh v usloviyakh vysokogo gidrostatichekogo davleniya [Phase stability of ceramics based on  $ZrO_2 - 3 \text{ mol.}\% Y_2O_3$  nanopowders compacted under high hydrostatic pressure], *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy*, 2014, V. 24, No 3–4, pp.100–110.
8. Konstantinova, T.E., Danilenko, I.A., Gorban, O.A., Effekty vliyaniya vysokikh davleniy v nanorazmernykh poroshkovykh sistemakh na osnove dioksida tsirkoniya [Effects of high pressure in nanoscale powder systems based on zirconium dioxide], *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy*, 2014, V. 24, No 2, pp. 67–85.
9. Juntavee, N., Attashu, S., Effect of sintering process on color parameters of nano-sized yttria partially stabilized tetragonal monolithic zirconia, *J Clin Exp Dent.*, 2018, No 10 (8), pp. 794–804.
10. Takahashi, N., Suda, A., Hachisuka I., et al., Sulfur durability of NOX storage and reduction catalyst with supports of  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$  and  $ZrO_2-TiO_2$  mixed oxides, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2007, V. 72, No 1–2, pp. 187–195.
11. Dmitrievsky, A.A., Zhigacheva, D.G., *Mekhanicheskie svoistva kompozitsionnoi keramiki  $ZrO_2$  (CaO) –  $Al_2O_3$  s razlichnym sodержaniem korunda* [Mechanical properties of composite ceramics  $ZrO_2$  (CaO) –  $Al_2O_3$  with different corundum content], *60th International Scientific Conference “Current Problems of Strength”*, Vitebsky gosudarstvenny tekhnologicheskyy universitet, pp. 120–122.
12. Dey, S., Drazin, J.W., Wang, Y., et al., Radiation tolerance of nanocrystalline ceramics: insights from Yttria Stabilized Zirconia, *Sci. Rep.*, 2015, No 6, P. 7746.
13. Pu, G., Zou, J., Lin, L., et al., Effects of He ion irradiation on the microstructures and mechanical properties of t' phase yttria-stabilized zirconia ceramics, *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, V. 771, pp. 777–783.
14. Wang, H., Ren, F., Tang J., et al., Enhanced radiation tolerance of YSZ/ $Al_2O_3$  multilayered nanofilms with pre-existing nanovoids, *Acta Materialia*, 2018, V. 144, pp. 691–699.
15. Ohtaki, K.K., Patel, M.K., Crespillo, M.L., et al., Improved high temperature radiation damage tolerance in a three-phase ceramic with heterointerfaces, *Sci Rep.*, 2018, No 8 (1), p. 13993.
16. Belichko, D., Konstantinova, T., Volkova G., et al., Effects of YSZ-ceramics doping with silica and alumina on its structure and properties, *Materials Chemistry and Physics.*, 2022, V. 287, No 1, Art. 126237.
17. Belichko, D.R., Volkova, G.K., Konstantinova, T.E., Maletsky, A.V., Effekt legirovaniya keramiki na osnove dioksida tsirkoniya oksidami alyuminiya i kremniya [The effect of alloying ceramics based on zirconium dioxide with aluminum and silicon oxides], *FTVD*, 2023, V. 33, No 2, pp. 1–10.
18. Gusev, A.I., *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies], Moscow: Fizmatlit, 2005.
19. Vasiliev, D.M., *Difraktsionnye metody issledovaniya struktur* [Diffraction methods for studying structures], Moscow: SPbGTU, 1998.
20. Oksengendler, B.L., Ashirmetov, A.H., Iskandarova, F.A., et al., Vzaimodeistvie radiatsionnogo izlucheniya s ierarkhicheskimi strukturami [Interaction of radiation with hierarchical structures], *Poverkhnost, rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*, 2023, No 1, pp. 37–49.

UDC 621.762.242:661.882

# SYNTHESIS AND STRUCTURE OF COMPOUNDS OF THE HOMOLOGICAL SERIES $Ti_nO_{2n-1}$ OBTAINED BY REDUCTION IN A HYDROGEN ENVIRONMENT

A.N. KHRUSTALEV, L.A. ARBANAS

“MIREA – Russian Technological University”, 78, bld 4, Vernadsky Ave, 119454 Moscow, Russian Federation. E-mail: [rector@mirea.ru](mailto:rector@mirea.ru)

Received March 18, 2024

Revised June 18, 2024

Accepted July 1, 2024

**Abstract**—The paper considers one of the insufficiently explored methods for the synthesis of compounds of the homologous series  $Ti_nO_{2n-1}$ , in particular the method of hydrogen reduction. A series of samples ( $n = 2-8$ ) were obtained from initial  $TiO_2$  powders of various chemical purities (99.0–99.99%) with modification with rutile in a wide range of temperatures and reduction times in a hydrogen environment. The influence of the purity of the initial samples, temperature and recovery time on the structure of the resulting compounds was established. Differences in the crystal structure of compounds of the homologous series  $Ti_nO_{2n-1}$ , as well as  $\beta$ - and  $\lambda$ -polymorphic modifications of  $Ti_3O_5$ , are shown. An approach to selecting the temperature and time of reduction of  $TiO_2$  powders to obtain a specific phase in compounds of the homologous series  $Ti_nO_{2n-1}$  is substantiated.

**Keywords:** homologous series  $Ti_nO_{2n-1}$ , reduction in hydrogen, Rietveld method, Le Bail method, polymorphs, Magneli phases

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-57-71

## ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out using the equipment of the Center for Collective Use “Joint Educational and Scientific Center for Collective Use” MIREA – Russian Technological University (contract No 075-15-2021-689).

The authors express their gratitude to Anton Dmitrievich Sokolov from JSC NPP “ISTOK” named after A. Shokin for the synthesis and provision of samples of  $TiO_2$ ,  $Ti_nO_{2n-1}$ .

The authors are grateful to the Laboratory of Ceramic Materials and Technologies of the Russian Technological University MIREA for providing the opportunity to work with their laboratory equipment as part of their research interests.

The authors thank Anastasia A. Kholodkova for her assistance in conducting the SEM-EDS experiment.

## REFERENCES

1. Cancarevic, M., Zinkevich, M., Aldinger, F., Thermodynamic description of the Ti–O system using the associate model for the liquid phase, *Calphad*, 2007, V. 31, Is. 3, pp. 330–342. URL: <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2007.01.009>.
2. Varghese, O.K., Gong, D.W., Paulose, M., Ong, K.G., Grimes, C., Extreme Changes in the Electrical Resistance of Titania Nanotubes with Hydrogen Exposure, *Advanced Materials*, 2003, V. 15, Is. 7–8, pp. 624–627. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.200304586>.
3. Heinlaan, M., Ivask, A., Blinova, I., Dubourguier, H.C., Kahru, A., Toxicity of nanosized and bulk ZnO, CuO and  $TiO_2$  to bacteria *Vibrio fischeri* and crustaceans *Daphnia magna* and *Thamnocephalus platyurus*, *Chemosphere*, 2008, No 71, pp. 1308–1316. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.11.047>
4. Guezane Lakoud, S., Merabet-Khelassi, M., Aribi-Zouieueche, L.,  $NiSO_4 \cdot 6H_2O$  as a new, efficient, and reusable catalyst for the  $\alpha$ -aminophosphonates synthesis under mild and eco-friendly conditions, *Res Chem Intermed*, 2016, V. 42, pp.4403–4415. URL: <https://doi.org/10.1007/s11164-015-2283-z>.
5. Chunxiang Cui, Hua Liu, Yanchun Li, Jinbin Sun, Ru Wang, Shuangjin Liu, Lindsay Greer, A., Fabrication and biocompatibility of nano- $TiO_2$ /titanium alloys biomaterials, *Materials Letters*, 2005, V. 59 (24–25), pp. 3144–3148. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.05.037>.
6. Cao, S., Wang, Y., Cao, L., Wang, Y., Lin, B., Lan, W., Cao, B., Preparation and antimicrobial assay of ceramic brackets coated with  $TiO_2$  thin films, *The Korean Journal of Orthodontics*, 2016, V. 46 (3), pp. 146–154. URL: <https://doi.org/10.4041/kjod.2016.46.3.146>.

7. Solanki, L., Dinesh, S., Jain, R.K., Balasubramaniam, A., Effects of titanium oxide coating on the antimicrobial properties, surface characteristics, and cytotoxicity of orthodontic brackets: A systematic review and meta-analysis of in-vitro studies, *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 2023, No 13, V. 5, pp. 553–562. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2023.05.014>.
8. Papk, H.J., Lee, S.E., Papk, J.Y., Optical property of atomically thin titanium-oxide nanosheet for ultraviolet filtration, *Thin Solid Films*, 2017, V. 636, pp. 99–106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.04.039>.
9. Luchinsky, G.P., *Khimiya titana* [Chemistry of titanium], Moscow: Khimiya, 1971.
10. Chen, X., Liu, L., Huang, F., Black titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanomaterials, *Chemical Society Reviews*, 2015, V. 7, N 44, pp. 1861–1885. URL: <https://doi.org/10.1039/C4CS00330F>.
11. Liu, Y., Tian, L., Tan, X., Li, X., Chen, X., Synthesis, properties, and applications of black titanium dioxide nanomaterials, *Science Bulletin*, 2017, V. 6, No 62, pp. 431–441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.01.034>.
12. Thompson, T.L., Yates, J.T., Surface science studies of the photoactivation of TiO<sub>2</sub> — new photochemical processes, *Chemical reviews*, 2006, N 106, V. 10, pp. 4428–4453. URL: <https://doi.org/10.1021/cr050172k>.
13. Tang, H., et al., Electrical and optical properties of TiO<sub>2</sub> anatase thin films, *Journal of applied physics*, 1994, V. 75, Is. 4, pp. 2042–2047. URL: <https://doi.org/10.1063/1.356306>.
14. Tang, C., Zhou, D., Zhang, Q., Synthesis and characterization of Magnéli phases: Reduction of TiO<sub>2</sub> in a decomposed NH<sub>3</sub> atmosphere, *Materials Letters*, 2012, No 79, pp. 42–44. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.03.095>.
15. Smith, J.R., Walsh, F.C., Clae, R.L., Electrodes based on Magnéli phase titanium oxides: the properties and applications of Ebonex materials, *Journal of applied electrochemistry*, 1998, V. 28, pp. 1021–1033. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1003469427858>.
16. WO2008037941: Simpson, A., Carter, Ph., A Method and apparatus for the manufacture of sub-stoichiometric oxides of titanium by reduction with hydrogen, Publ. 03.04.2008.
17. Gasik, M.I., Lyakishev, N.P., *Theory and technology of electrometallurgy of ferroalloys*, Moscow: SP Internet Engineering, 1999, V. 3.
18. *Crystal Impact – Software for Chemists and Material Scientists*. URL: <https://crystalimpact.com/company.htm> (reference date: 28/04/23).
19. Meagher, E.P., Lager, G.A., Polyhedral thermal expansion in the TiO<sub>2</sub> polymorphs; refinement of the crystal structures of rutile and brookite at high temperature, *The Canadian Mineralogist*, 1979, V. 1, No 17, pp. 77–85.
20. Newham, R.E., Haan, Y.M., Refinement of the a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> structures, *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 1962, V. 1–6, No 117, pp. 235–237.
21. Grey, I.E., Madsen, I.C., Watts, A., Bursill, L.A., Kwiatkowska, J., New cesium titanate layer structures, *Journal of Solid State Chemistry*, 1985, V. 3, No 58, pp. 350–356.
22. Lakkis, S., Schlenker, C., Chakraverty, B.K., Buder, R., Marezio, M., Metal-insulator transitions in Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystals: Crystal characterization, specific heat, and electron paramagnetic resonance, *Physical Review B*, 1976, V. 4, No 14, p.1429.
23. Andersson, S., The crystal structure of Ti<sub>5</sub>O<sub>9</sub>, *Acta chem. scand.*, 1960, V. 5, No 14, pp. 1161–72.
24. Le Page, Y., Strobel, P., Structural chemistry of Magnéli phases Ti<sub>n</sub>O<sub>2n-1</sub> (4 ≤ n ≤ 9). I. Cell and structure comparisons, *Journal of Solid State Chemistry*, 1982, V. 3, No 43, pp. 314–319.
25. ISO 13322-1: *Particle size analysis – image analysis methods. Part 1: static image analysis methods*. International Organization for Standardization, Geneva, 2004.
26. Horn, M., Schwebdtfeger, C.F., Meagher, E.P., Refinement of the structure of anatase at several temperatures, *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 1972, V. 1–6, No 136, pp. 273–281.
27. Akimoto, J., Gotoh, Y., Oosawa, Y., Nonose, N., Kumagai, T., Aoki, K., Takei, H., Topotactic oxidation of ramsdellite-type Li<sub>0.5</sub>TiO<sub>2</sub>, a new polymorph of titanium dioxide: TiO<sub>2</sub> (R), *Journal of Solid State Chemistry*, 1994, V. 1, No 113, pp. 27–36.

28. Vasilieva, I., Kuzmicheva, G., Pochtar, A., Gainanova, A., Timaev, O., Dorokhov, A., Podbelsky, V., On the nature of the phase “ $\eta$ -TiO<sub>2</sub>”, *New Journal of Chemistry*, 2016, V. 1, No 40, pp. 151–161. URL: <https://doi.org/10.1039/C5NJ01870F>.

29. Li, M., Dai, Y., Pei, X., Chen, W., Hierarchically porous  $\gamma$ -Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> hollow nanospheres as an effective sulfur host for long-life lithium-sulfur batteries, *Applied Surface Science*, 2022, V. 579, p. 152178. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152178>.

30. Li, X., Liu, Y., Ma, S., Ye, J., Zhang, X., Wang, G., Qiu, Y., The synthesis and gas sensitivity of the  $\beta$ -Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> powder: experimental and DFT study, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, V. 649, p. 939–948.

31. Zhao, P.F., Li, G.S., Li, W.L., Cheng, P., Pang, Z.Y., Xiong, X.L., Lu, X.G., Progress in Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>: Synthesis, properties and applications, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, V. 11, No 31, pp. 3310–3327. URL: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65731-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65731-X).

32. Fu, X., et al., Preparing high purity  $\lambda$ -Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> and Li/ $\lambda$ -Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> as high-performance electromagnetic wave absorbers, *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, V. 25, No 9, pp. 7976–7981. URL: <https://doi.org/10.1039/D1TC01331A>.

33. Cai, R.X., Kubota, Y., Shuin, T., Sakai, H., Hashimoto, K., Fujishima, A., Induction of cytotoxicity by photoexcited TiO<sub>2</sub> particles, *Cancer research*, 1992, V. 52, p. 2346.

34. Song, Y.Y., Schmidt-Stein, F., Bauer, S., Schmuki, P.J., Amphiphilic TiO<sub>2</sub> nanotube arrays: an actively controllable drug delivery system, *Journal of the American Chemical Society*, 2009, V. 131, pp. 4230–4232. URL: <https://doi.org/10.1021/ja810130h>.

35. Shrestha, N.K., Macak, J.M., Schmidt-Stein, F., Hahn, R., Miepke, C.T., Fabry, B., Schmuki P. Magnetically guided titania nanotubes for site-selective photocatalysis and drug release, *Angewandte Chemie International Edition, Int. Ed.*, 2009, V. 48, pp. 969–972. URL: <https://doi.org/10.1002/anie.200804429>.

36. Xinwei, G., Xia, Y., Liang, H., Yao, D., Zeng, Yu-P., Fabrication of high-performance Magnéli phase Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> ceramics by in-situ hot-pressed sintering in a single step, *Materials Today Communications*, 2023, V. 37, p. 107058. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107058.

37. Padilha, A.C.M., Osorio-Guillén, J.M., Rocha, A.R., Dalpian, G.M., Ti<sub>n</sub>O<sub>2n-1</sub> Magnéli phases studied using density functional theory, *Physical Review B*, 2014, V. 3, No 90, p. 035213. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.035213>.

UDC 666.798.2

## STUDY OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE CERAMICS OF THE AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> SYSTEM

D.A. TKACHEV, I.A. ZHUKOV, Cand Sc. (Eng), V.D. VALIKHOV, M.V. GRIGORIEV, Cand Sc. (Eng)

*Tomsk State University, 36 Lenin Ave, 634050 Tomsk, Russian Federation.  
E-mail: d.tkachev11@gmail.com*

Received March 25, 2024

Revised March 29, 2024

Accepted April 2, 2024

**Abstract**—AlMgB<sub>14</sub> ceramics is known as a material characterized by increased hardness in combination with a low friction coefficient. Composite structures based on this ceramics have even higher strength characteristics. In the present work, we investigate the structural-phase states and physico-mechanical properties of composite ceramics of the AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> system with a variable TiB<sub>2</sub> content, obtained by hot pressing the initial batch based on AlMgB<sub>14</sub> and TiB<sub>2</sub> ceramic powders preliminarily synthesized by the method of self-propagating high-temperature synthesis. It was found that the resulting materials are characterized by a composite structure represented by TiB<sub>2</sub> inclusions distributed in the AlMgB<sub>14</sub> matrix. The phase composition of the resulting composites is similar to the phase composition of the initial batch, with 5 to 9 wt. % of the MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel phase being formed. The microhardness of AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> composites is up to 19.9 GPa (the hardness of AlMgB<sub>14</sub> ceramics obtained by a similar method without additives is 7 GPa). The three-point bending strength of AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> composite materials is 309 MPa.



**Keywords:** composite ceramics, AlMgB<sub>14</sub>–TiB<sub>2</sub> system, structural-phase state, physical and mechanical properties

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-72-83

#### ACKNOWLEDGMENTS

The studies were carried out using the equipment of the Tomsk Regional Center for Collective Use of the National Research Tomsk State University. Grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No 075-15-2021-693 (No 13.TsKP.21.0012). The studies using X-ray diffraction methods were carried out with the support of the Tomsk State University Development Program (Priority 2030).

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No 19-79-10042, <https://rscf.ru/project/22-79-41025/>

#### REFERENCES

1. Cook, B.A., et al., A new class of ultra-hard materials based on AlMgB<sub>14</sub>, *Scr. Mater. Elsevier BV*, 2000, V. 42, No 6, pp. 597–602.
2. Chen, J. et al., Tribological study on a novel wear-resistant AlMgB<sub>14</sub>-Si composite, *Ceram. Int.*, 2017, V. 43, No 15, pp. 12362–12371.
3. Jiang, J., Synthesis and mechanical properties of AlMgB<sub>14</sub>-Al composite, *J. Alloys Compd. Elsevier*, 2020. V. 818, p. 152910.
4. Yumei, Z., et al., Synthesis and characterization of AlMgB<sub>14</sub> hot pressed under different environments, *Sci. Sintering. National Library of Serbia*, 2017, V. 49, No 3, pp. 311–317.
5. Nikitin, P.Y., et al., AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> composite materials obtained by self-propagating high-temperature synthesis and spark plasma sintering, *Ceram. Int.*, 2020., V. 46, No 14, pp. 22733–22737.
6. Nikitin, P.Y., Matveev, A.E., Zhukov, I.A., Energy-effective AlMgB<sub>14</sub> production by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) using the chemical furnace as a source of heat energy, *Ceram. Int. Elsevier BV*, 2021, V. 47, No 15, pp. 21698–21704.
7. Nikitin, P.Y., et al., Phase content, structural and thermodynamic properties of AlMgB<sub>14</sub>, obtained by SHS using the chemical furnace, *Proceedings of the International Conference “Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology”*, AIP Publishing, 2022.
8. Nikitin, P., et al., On the structure and properties of AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> composites obtained from SHS powders by spark plasma sintering, *Materials (Basel). MDPI AG*, 2021, V. 14, No 19, p. 5521.
9. Zhou, Y.M., et al., Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered AlMgB<sub>14</sub> and AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub>, *Ceram. Int. Elsevier BV*, 2018, V. 44, No 7, pp. 8591–8598.
10. Matkovich, V.I., Economy, J., Structure of MgAlB<sub>14</sub> and a brief critique of structural relationships in higher borides, *Acta Crystallogr. B. International Union of Crystallography (IUCr)*, 1970, V. 26, No 5, pp. 616–621.
11. Higdon, C., et al., Friction and wear mechanisms in AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> nanocoatings, *Wear*, 2011, V. 271, No 9, pp. 2111–2115.
12. Cook, B.A., et al., Analysis of wear mechanisms in low-friction AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> coatings, *Surf. Coat. Technol.*, 2010, V. 205, No 7, pp. 2296–2301.
13. Qu, J., et al., Tribological Characteristics of AlMgB<sub>14</sub> and Nanocomposite AlMgB<sub>14</sub>-TiB<sub>2</sub> Superhard Coatings, *STLE/ASME 2008 International Joint Tribology Conference, ASMEDC*, 2008.
14. Zhou, Y.M., et al., A study on ultra-hard AlMgB<sub>14</sub> modified by TiB<sub>2</sub> and Ni<sub>3</sub>Al, *Mater. Sci. For. Trans Tech Publications, Ltd.*, 2016, V. 848, pp. 607–612.
15. Ahmed, A., et al., Mechanical properties and scratch test studies of new ultra-hard AlMgB<sub>14</sub> modified by TiB<sub>2</sub>, *Tribol. Int.*, 2006, V. 39, No 2, pp. 129–137.
16. Tkachev, D., et al., Structure and flexural strength of the hot-pressed AlMgB<sub>14</sub> ceramic, *Phys. Scr. IOP Publishing*, 2023, V. 98, No 2, p. 025703.
17. Zhukov, I.A., et al., The use of intermetallic Al<sub>x</sub>Mg<sub>y</sub> powder to obtain AlMgB<sub>14</sub>-based materials, *Mater. Today Commun. Elsevier BV*, 2020, V. 22, No 100848, p. 100848.

18. Tkachev, D., Nikitin, P., Zhukov, I., Vorozhtsov, A., Marchenko, E., Verkhoshansky, Y., Belchikov, I., Structure and flexural strength of the hot-pressed AlMgB<sub>14</sub> ceramic, *Physica Scripta*, 2023, V. 98, No 2, pp. 025703. URL: <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acaeaa>

UDC 621.793.7:621.9.048.7

## STUDY OF COATINGS OF THE Ni–Ti–(SiC, WC, B<sub>4</sub>C) SYSTEM APPLIED TO THE SURFACE OF TITANIUM ALLOY PLATES USING COLD GAS DYNAMIC SPRAYING AND LASER PROCESSING

D.A. GERASHCHENKOV, Dr Sc. (Eng), A.M. MAKAROV, Cand Sc. (Eng), E.Yu. GERASHCHENKOVA, R.Yu. BYSTROV, E.N.BARKOVSKAJA, L.V. MUKHAMEDZYANOVA, E.A.POPOVA, V.N.KLIMOV

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received March 27, 2024

Revised April 10, 2024

Accepted April 12, 2024

**Abstract**— The technology of applying composite intermetallic coatings of the Ni–Ti system reinforced with carbides based on powders (SiC, WC, B<sub>4</sub>C) on the surface of titanium alloy plates with the sequential use of the CGDN method and laser processing is considered. The technological parameters of the laser-thermal processing, ensuring the production of composite coatings of the Ni–Ti–(SiC, WC, B<sub>4</sub>C) system of high hardness, are determined.

**Keywords:** intermetallic coatings, laser-thermal processing, powder materials, structure, properties

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-84-92

### ACKNOWLEDGMENTS

*The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No 21-73-30019.*

### REFERENCES

1. Lyashenko, B.A., Podchernyaeva, I.A., Konevtsov, L.A., Kozyr, A.V., Kovalenko, S.V., Kamin-sky, A.V., *Materialogiya pokrytij titanovykh splavov metodami fizikokhimii i elektroiskrovogo legirovaniya. Chast 1: Pokrytiya metodami fizikokhimii* [Material Science of Titanium Alloy Coatings by Physical Chemistry and Electrospark Alloying Methods. Part 1: Coatings by Physical Chemistry Methods], Khabarovsk: Izd-vo Tikhookean. gos. univer., 2019.
2. Chekalova, E., Zhuravlev, A., Improving the durability of titanium alloy products through a combined hardening technology, *Materials Today: Proceedings*, 2021, V. 38, P. 4, pp. 1804–1809.
3. Dong, B., Guo, X., Zhang, K., Zhang, Y., Li, Z., Wang, W., Cai, C., Combined effect of laser texturing and carburizing on the bonding strength of DLC coatings deposited on medical titanium alloy // *Surface and Coatings Technology*, 2022, V. 429, p. 127951.
4. Melyukov, V.V., Chirkov, A.M., Lazerno-plazmennye tekhnologii obrabotki poverkhnosti [Laser-plasma surface treatment technologies], *Beam technologies. Laser application. Proc. of the Fifth Intern. Conf.*, 2006, pp. 236–240.
5. Gerashchenkov, D.A., Makarov, A.M., Gerashchenkova, E.Yu., Vasiliev, A.F., Poluchenie funktsionalnogo intermetallidnogo pokrytiya Ni-Ti putem kombinatsii tekhnology geterofaznogo perenosa i lazernoi obrabotki [Obtaining a functional Ni-Ti intermetallic coating by combining heterophase transfer and laser processing technologies], *Voprosy materialovedeniya*, 2018, No 3 (95), pp. 102–110.
6. Orishich, A., Malikov, A., Fomin, V., Golyshev, A., Kosarev, V., Ryashin, N., Filippov, A., Creation of heterogeneous metal-ceramic structures based on Ti, Ni and WC, B<sub>4</sub>C by combined method of laser cladding and cold gas-dynamic spraying, *Procedia CIRP*, 2018, V. 74, pp. 268–271.
7. Khatake, P., Taluja, R., Kumar, M.S., Reddy, M.M., Al-Ataby, F.H., Sood, S., Sonia, P., Cold spray coating: A review of material systems and future perspectives, *Materials Today: Proceedings*, 2023.

8. Raoelison, R.N., Xie, Y., Sapanathan, T., Planche, M.P., Kromer, R., Costil, S., Langlade, C., Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date, *Additive Manufacturing*, 2018, V. 19, pp. 134–159.

9. Ocelík, V., De Hosson, J.T.M., Thick Metallic Coatings Produced by Coaxial and Side Laser Cladding: Processing and Properties, *Advances in Laser Materials Processing (Second edition)*, Woodhead Publishing, 2018, pp. 413–459.

10. Hu, D., Liu, Y., Chen, H., Wang, M., Microstructure and wear resistance of Ni-based tungsten carbide coating by laser cladding on tunnel boring machine cutter ring, *Surface and Coatings Technology*, 2020, V. 404, p. 26432.

11. Soboleva, N.N., Nikolaeva, E.P., Makarov, A.V., Malygina, I.Yu., Vliyanie dobavki karbida khroma na strukturu i abrazivnyuyu iznosostoikost NiCrBSi pokrytiya, sformirovannogo lazernoj naplavkoi [The effect of chromium carbide additive on the structure and abrasive wear resistance of NiCrBSi coating formed by laser surfacing], *Vektor nauki TGU*, 2020, No 1 (51), pp. 68–76.

12. Gerashchenkov, D.A., Makarov, A.M., Gerashchenkova, E.Yu., Vasiliev, A.F., Poluchenie funktsionalnogo intermetallidnogo pokrytiya Ni-Ti putem kombinatsii tekhnology geterofaznogo perenosa i lazernoi obrabotki [Obtaining a functional Ni-Ti intermetallic coating by combining heterophase transfer and laser processing technologies], *Voprosy materialovedeniya*, 2018, No 3 (95), pp. 102–110.

13. Gerashchenkov, D.A., Ivanovsky, A.A., Makarov, A.M., Evdokimov, S.Yu., Sozdanie i issledovanie intermetallidnogo pokrytiya sistemy Ni-Ti, armirovannogo karbidom volframa dlya povysheniya iznosostoikosti titanovogo splava [Creation and research of an intermetallic coating of the Ni-Ti system reinforced with tungsten carbide to increase the wear resistance of a titanium alloy], *Voprosy materialovedeniya*, 2022, No 4 (112), pp. 50–61.

14. Gerashchenkov, D.A., Udalov, Yu.P., Raschet i issledovanie fazovogo sostava kompozitsionnogo intermetallidnogo sloya, sintezirovannogo na poverkhnosti titanovogo splava VT6 iz poroshkov Cu-SiC i Al-SiC pri lazernoi obrabotke [Calculation and investigation of the phase composition of the composite intermetallic layer synthesized on the surface of titanium alloy VT6 from Cu-SiC and Al-SiC powders during laser processing], *Voprosy materialovedeniya*, 2023, V. 113, No 1, pp. 62–71.

UDC 621.793.3:621.357:620.193.27

## EFFECTS OF MOLYBDENUM AND COBALT ALLOYING ON CORROSION RESISTANCE OF ELECTROCHEMICAL COATINGS BASED ON THE Ni–W SYSTEM

A.V. KRASIKOV, Cand Sc. (Chem), M.V. MERKULOVA, N.V. YAKOVLEVA,  
L.V. MUKHAMEDZYANOVA

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received December 12, 2023

Revised January 9, 2024

Accepted January 11, 2024

**Abstract**—The paper studies coatings of the Ni–W system alloyed with molybdenum and cobalt obtained by electrodeposition. The effect of the concentration of salts of the alloying element in the electrolyte on the chemical composition of the coatings was studied under various synthesis conditions. All the obtained coatings are nanocrystalline or amorphous solid solutions of tungsten, molybdenum or cobalt in nickel with a FCC crystal lattice. Polarization measurements made it possible to establish that the most resistant to corrosion in a 3.5% NaCl solution is a coating containing 35% W and 8% Mo.

**Keywords:** electrochemical coatings, molybdenum and cobalt alloying, corrosion resistance

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-93-101

## REFERENCES

1. Galikova, Z., Chovantsova, M., Danielik, V., Properties of Ni–W alloy coatings on steel substrate, *Chemical Papers*, 2006, V. 60 (5), pp. 353–359.

2. Cesiulis, H., Budreika, A., Hydrogen Evolution and Corrosion of W and Mo Alloys with Co and Ni, *Physicochemical Mechanics of Materials*, 2010, No 8, pp 808–814.

3. Obradovic, M., Stevanovic, J., Despic, A., Stevanovic, R., Stoch, J., Characterization and corrosion properties of electrodeposited Ni–W alloys, *J. Serb. Chem. Soc.*, 2001, No 66 (11–12), pp. 899–912.
4. Chianpairot, A., Lothongkum, G., Schuh, Ch. A., Boonyongmaneerat, Yu., Corrosion of nanocrystalline Ni–W alloys in alkaline and acidic 3.5 wt. % NaCl solutions, *Corrosion Science*, 2011, V. 53, pp. 1066–1071.
5. Staffani, C.P., Dini, W.J., Groza, J.R., Palazoglu, A., Electrodeposition and corrosion resistance of Ni–W–B coatings, *Journal of materials engineering and performance*, 1997, V. 6 (4), pp. 413–416.
6. Krolkowski, A., Plonska, E., Ostrowski, A., Donten, M., Stojek, Z., Effects of Compositional and Structural Features on Corrosion Behavior of Nickel-Tungsten Alloys, *J. Solid State Electrochem.*, 2009, V. 13, pp. 263–275.
7. Oliveira, J.A.M., Almeida, A.F, Campos, A.R.N., Prasad, S., Alves, J.J.N., Santana, R.A.C., Effect of current density, temperature and bath pH on properties of Ni–W–Co alloys obtained by electrodeposition, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, V. 853, p. 157104.
8. Farzanekh, M.A., Raeissi, K., Golozar, M.A., Effect of current density on deposition process and properties of nanocrystalline Ni–Co–W alloy coatings, *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, V. 489, pp. 488–492.
9. Krasikov, V.L., Berkman, E.A., Aleksandrova, G.S., Varypaev, V.N., Kataliticheski aktivny katod na osnove splava molibden – nikel dlya gidronnykh batarei [Catalytically active cathode based on molybdenum – nickel alloy for hydronic batteries], *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost. Ser. Khimicheskie i fizicheskie istochniki toka*, 1997, No 2, pp. 8–9.
10. Yamasaki, T., Tomohira, R., Ogino, Y., Schloßmacher, P., Ehrlich, Y., Formation of ductile amorphous & nanocrystalline Ni–W alloys by electrodeposition, *Plating & Surface Finishing*, 2000, No 87, pp. 148–152.
11. Bobanova, Zh., Dikusar, A.I., Cesiulis, H., Celis, J.-P., Prosycevas, I., Micromechanical and Tribological Properties of Nanocrystalline Coatings of Iron-Tungsten Alloys Electrodeposited from Citrate-Ammonia Solutions, *Russ. J. Electrochem.*, 2009, V. 45, No 8, pp. 895–901.
12. Vyacheslavov, P.M., *Elektroliticheskoe osazhdenie splavov* [Electrolytic deposition of alloys], Leningrad: Mashinostroenie, 1986.
13. Stasov, A.A., Pasechnik, S.Ya., Elektroosazhdenie nikelmolibdenovykh pokryty iz pirofosfatnogo elektrolita [Electrodeposition of nickel-molybdenum coatings from pyrophosphate electrolyte], *Izv. vuzov. Khimiya i khimicheskie tekhnologii*, 1973, V. 16, No 4, pp. 600–603.
14. Podlaha, E.J., Landolt, D., Induced Codepositon. I: An Experimental Investigation of Ni–Mo Alloys, *J. Electrochem. Soc.*, 1996, V. 143, No 3, pp. 885–892.
15. Beltowska-Lehman, E., Bigos, A., Indyka, P., Kot, M., Electrodeposition and characterisation of nanocrystalline Ni–Mo coatings, *Surf Coatings Technol.*, 2012, V. 211, pp. 67–71.
16. Pavlova, N.V., *Elektroosazhdenie splava Ni-Mo iz elektrolitov, soderzhashchikh molibden v razlichnykh stepenyakh okisleniya* [Electrodeposition of Ni-Mo alloy from electrolytes containing molybdenum in various degrees of oxidation], Thesis for the dissertation, Moscow: Izd. tsentr RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2009.
17. Krasikov, A.V., Merkulova, M.V., Markov, M.A., Bykova, A.D., Tungsten-rich Ni–W coatings, electrodeposited from concentrated electrolyte for complex geometry parts protection, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, No 1758 (1), p. 012019.
18. Krasikov, A.V., Markov, M.A., Bykova, A.D., Kastsova, A.G., Kravchenko, I.N., Galinovsky, A.L., Electrochemical synthesis of amorphous layers from a nonequilibrium Co–W alloy as a precursor for nanocomposite coating formation, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2022, V. 2022, No 6, pp. 666–673.
19. Krasikov, A.V., Krasikov, V.L., Mekhanizm elektroosazhdeniya splava nikel-volfram iz pirofosfatnogo elektrolita [Mechanism of electrodeposition of nickel-tungsten alloy from pyrophosphate electrolyte], *Izv. SPbGTI (TU)*, 2016, No 36 (62), pp. 12–23.

UDC 669.053.4:669.295'71'297

## FORMATION OF STRUCTURAL-PHASE STATE OF Ti–Al MATERIALS WITH Hf-ADDITIVES OBTAINED BY HYDRIDE TECHNOLOGY

N.I. KARAKCHIEVA<sup>1,2</sup>, Cand. Sc. (Chem.), Yu.A. ABZAEV<sup>3</sup>, Dr Sc. (Phys.-Math.), I.V. AMELICHKIN<sup>1</sup>, I.A. ZHUKOV<sup>1</sup>, Dr Sc. (Eng.), V.V. LOSKUTOV<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Phys.-Math.), A.S. KNYAZEV<sup>1</sup>, Dr Sc. (Chem.), V.I. SACHKOV<sup>1</sup>, Dr Sc. (Chem.), I.A. KURZINA<sup>1</sup>, Dr Sc. (Phys.-Math.)

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University, 36 Lenin Ave, 634050 Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Mari State University”, 1 Lenin Sq, 424000 Yoshkar-Ola, Mari El Republic, Russian Federation

<sup>3</sup> Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering”, 2 Solyanaya Square, 634003 Tomsk, Russian Federation

Received March 29, 2024

Revised April 24, 2024

Accepted May 3, 2024

**Abstract**—The paper describes the structural and phase composition of TiHf<sub>50</sub>, AlHf<sub>50</sub>, TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub> composite materials obtained by the “hydride” technology. A three-component phase diagram for Ti–Al–Hf at 1150°C is constructed. The structural state of TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub> alloys was predicted based on reference lattices found in the USPEX code with the VASP interface; quantum-chemical calculations of the TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub> energy were additionally performed in the CASTEP code. It is shown that solid solutions dominate in the TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub> alloy sample, in which the main elements dominate: Al<sub>10</sub> – Ti<sub>9</sub>Al<sub>23</sub> – Ti<sub>8</sub>. Hf atoms can be introduced into the interstitial sites [-0.257 0.042 0.2545] (St-Hf-27), [0.0053 -0.0120 -0.0765] (St-Hf-143), [0.5 0.5 0.5] (St-Hf). The introduction of hafnium into the specified lattice sites does not violate the stabilizing effect in the TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub> systems. It is shown that the maximum microhardness value (4.9 GPa) was obtained when testing the TiHf<sub>50</sub> sample (for comparison: for the TiAl<sub>50</sub> system – 1.2 GPa, for the TiAl<sub>49</sub>Hf<sub>2</sub> system – 2.2 GPa).

**Keywords:** hydride technology, Ti–Al, hafnium, hafnium hydride, titanium hydride, aluminum

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-102-111

### ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out within the framework of the state assignment for the provision of public services (performance of work) No 075-01252-22-03 dated 26.10.2022.

### REFERENCES

1. Gilev, I.O., Shubin, A.B., Kotenkov, P.V., Termodinamicheskie kharakteristiki rasplavov binarnoi sistemy Al–Hf [Thermodynamic characteristics of melts of the Al–Hf binary system], *Raspilavy*, 2021, No 1, pp. 46–54.
2. Bai, X., Li, Y., Xiao, B., Rao, Y., Liang, H., He, L., Feng, J., Structural, mechanical, electronic properties of refractory Hf–Al intermetallics from SCAN meta-GGA density functional calculations, *Materials Chemistry and Physics*, 2020, No 254, p. 123423. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123423.
3. Skachkov, V.M., Yatsenko, S.P., Pasechnik, L.A., Sabirzyanov, N.A., Poluchenie ligatur Al–Sc, Al–Y, Al–Zr, Al–Hf v rasplave soli i posleduyushchee ikh obogashchenie [Preparation of Al–Sc, Al–Y, Al–Zr, Al–Hf ligatures in molten salts and their subsequent enrichment], *Trudy Kolskogo nauchnogo centra RAN*, 2018, V. 9, No 2–1, pp. 443–448. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.443-448.
4. Yukhvid, V.I., Andreev, D.E., Sanin, V.N., Sachkova, N.V., Energeticheskoe stimulirovanie avtovolnovogo sinteza alyuminidov gafniya [Energy stimulation of autowave synthesis of hafnium aluminides], *Khimicheskaya fizika*, 2017, V. 36, No 9, pp. 40–44. DOI: 10.7868/S0207401X17090163.
5. Zhou, Y.L., Niinomi, M., Akahori, T., Dynamic Young’s Modulus and Mechanical Properties of Ti–Hf Alloys, *Materials Transactions*, 2004, V. 45, No 5, pp. 1549–1554.
6. Aleksanyan, A.G., Mailyan, D.G., Dolukhanyan, S.K., Shekhtman, V.Sh., Ter-Galstyan, O.P., Sintez gidridov i poluchenie splavov v sisteme Ti–Hf–H [Synthesis of hydrides and production of alloys in the Ti–Hf–H system], *AEE*, No 9.
7. Sato, H., Kikuchi, M., Komatsu, M., Okuno, O., Okabe, T., Mechanical properties of cast Ti–Hf alloys, *Journal of Biomedical Materials Research. Part B: Applied Biomaterials*, 2005, V. 72, No 2, pp. 362–367. DOI: 10.1002/jbm.b.30169.

8. Khlebnikova, Yu.V., Rodionov, D.P., Egorova, L.Yu., Suaridze, T.R., Kristallograficheskie osobennosti struktury  $\alpha$ -fazy gafniya i splavov gafny – titan [Crystallographic features of the structure of the  $\alpha$ -phase of hafnium and hafnium–titanium alloys], *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2019, V. 89, No 1. DOI 10.21883/JTF.2019.01.46968.86-18.
9. Kosmachev, P.V., Abzaev, Yu.A., Vlasov, V.A., Quantitative phase analysis of plasma-treated high-silica materials, *Russian Physics Journal*, 2018, V. 61, No 2.
10. Oganov, A.R., Lyakhov, A.O., Valle, M., How Evolutionary Crystal Structure Prediction Works and Why, *Acc. Chem. Res.*, 2011, V. 44, No 3, pp. 227–237.
11. Oganov, A.R., Glass, C.W., Crystal structure prediction using ab initio evolutionary techniques: Principles and applications, *The Journal of chemical physics*, 2006, V. 124, No 24.
12. Azhazha, R.V., Kovtun, K.V., Malykhin, S.V., Merisov, B.A., Pugachev, A.T., Reshetnyak, E.N., Hadzhaj, G.Ya., Nakoplenie vodoroda v gafnii: struktura i elektrosoprotivlenie [Hydrogen accumulation in hafnium: structure and electrical resistance], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2008, V. 105, No 2, pp. 201–205.
13. Chen, S., Chen, Z., Wang, J., et al., Insight into the effect of Ti substitutions on the static oxidation behavior of (Hf, Ti)C at 2500°C, *Advanced Powder Materials*, 2008, V. 3, No 2, p. 100168. DOI: 10.1016/j.apmate.2023.100168.
14. Khlebnikova, Yu.V., Rodionov, D.P., Suaridze, T.R., Egorova, L.Yu., Kazantsev, V.A., Nikolaeva, N.V., EBSD-analiz struktury litykh i zakalennykh splavov gafny – titan [EBSD-analysis of the structure of cast and hardened hafnium–titanium alloys], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2018, V. 119, No 9, pp. 913–922. DOI 10.1134/S0015323018090073.
15. COD [Electronic resource]: *Crystallography Open Database*. URL: <https://www.crystallography.net/cod/search.html> (reference date: 28.03. 2024).
16. OQMD [Electronic resource]: *The Open Quantum Materials Database*. URL: <https://oqmd.org/materials/composition> (reference date 28.03.2024).
17. Belgibaeva, A., Abzaev, Yu., Karakchieva, N., Erkasov, R., Sachkov, V., Kurzina, I., The Structural and Phase State of the TiAl System Alloyed with Rare-Earth Metals of the Controlled Composition Synthesized by the “Hydride Technology”, *Metals*, 2020, V. 10, p. 859. DOI: 10.3390/met10070859.
18. Patent RF 2012128394/02: *Vysokotemperaturny gafnysoderzhashchy splav na osnove titana* [High-temperature hafnium-containing titanium-based alloy], Popova, E.A., Kotenkov, P.V., Pastukhov, E.A., Bodrova, L.E., 2006.

UDC 669.053.4:669.295'71'296

#### **FORMATION OF STRUCTURAL-PHASE STATE OF Ti–Al MATERIALS WITH Zr-ADDITIVES OBTAINED BY HYDRIDE TECHNOLOGY**

N.I. KARAKCHIEVA<sup>1,2</sup>, Cand. Sc. (Chem), Yu.A. ABZAEV<sup>3</sup>, Dr Sc. (Phys-Math), I.V. AMELICHKIN<sup>1</sup>, I.A. ZHUKOV<sup>1</sup>, Dr Sc. (Eng), A.S. KNYAZEVA<sup>1</sup>, Dr Sc. (Chem), V.I. SACHKOV<sup>1</sup>, Dr Sc. (Chem), I.A. KURZINA<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Phys-Math)

<sup>1</sup> *National Research Tomsk State University, 36 Lenin Ave, 634050 Tomsk, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Mari State University”, 1 Lenin Sq, 424000 Yoshkar-Ola, Mari El Republic, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering”, 2 Solyanaya Square, 634003 Tomsk, Russian Federation*

Received March 29, 2024

Revised April 24, 2024

Accepted May 3, 2024

**Abstract**—The structural and phase composition of TiZr<sub>50</sub>, AlZr<sub>50</sub>, TiAl<sub>49</sub>Zr<sub>2</sub> composite materials obtained by the hydride technology was investigated. A model three-component phase diagram was constructed for Ti–Al–Zr at a temperature of 1150°C. The structural state of TiAl<sub>49</sub>Zr<sub>2</sub> alloys was predicted based on reference lattices (USPEX code with VASP interface), quantum-chemical calculations of the energy of TiAl<sub>49</sub>Zr<sub>2</sub> were carried out in the CASTEP code. Solid solutions dominate in TiAl<sub>49</sub>Zr<sub>2</sub>, in the composition of which the

main elements are predominant:  $\text{Al}_{10}\text{--Ti}_9\text{Al}_{23}\text{--Ti}_8$ . Zr atoms can be introduced into the interstitial sites  $[-0.257\ 0.042\ 0.2545]$  (St–Zr–27),  $[0.0053\text{--}0.0120\text{--}0.0765]$  (St–Zr–143),  $[-0.3251\text{--}0.3983\ 0.4880]$  (St–Zr–75). The introduction of Zr into the specified lattice sites does not violate the stabilizing effect in the  $\text{TiAl}_{49}\text{Zr}_2$  systems. All reference lattices are stable. In the  $\text{TiAl}_{49}\text{Zr}_2$  alloy, the main phases are  $\text{Al}_{10}\text{Ti}_9\text{Zr}$ ,  $\text{Al}_{23}\text{Ti}_8\text{Zr}$ , the contributions of which to the theoretical intensity are 78.57 and 21.43%. In the  $\text{AlZr}_{50}$  sample, the phases  $\text{ZrAl}$ ,  $\text{Zr}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{ZrAl}_2$ .

**Keywords:** hydride technology, zirconium, zirconium hydride, titanium hydride, aluminum

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-112-121

#### ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of state assignment No FSWM-2020-0028, the Development Program of Tomsk State University (Priority-2030).

#### REFERENCES

1. Ogorodov, D.V., Popov, D.A., Trapeznikov, A.V., Sposoby polucheniya ligatury Al–Zr [Methods for obtaining the Al–Zr ligature]: review, *Trudy VIAM*, 2015, No 11.
2. Lakshman, S.V., Gibbins, J.D., Wainwright, E.R., Weihs, T.P., The effect of chemical composition and milling conditions on composite microstructure and ignition thresholds of AlZr ball milled powders, *Powder Technology*, 2019, V. 343, pp. 87–94. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.012.
3. Muradyan, G.N., Dolukhanyan, S.K., Aleksanyan, A.G., et al., Zakonomernosti i mekhanizm formirovaniya alyuminidov v sisteme  $\text{TiH}_2\text{--ZrH}_2\text{--Al}$  v gidridnom tsikle [Patterns and mechanism of formation of aluminides in the  $\text{TiH}_2\text{--ZrH}_2\text{--Al}$  system in the hydride cycle], *Khimicheskaya fizika*, 2019, V. 38, No 1, pp. 38–48. DOI: 10.1134/S0207401X19010102.
4. Zhao, Q., Ueno, T., Wakabayashi, N., A review in titanium-zirconium binary alloy for use in dental implants: Is there an ideal Ti–Zr composing ratio, *Japanese Dental Science Review*, 2023, V. 59, pp. 28–37. DOI: 10.1016/j.jdsr.2023.01.002.
5. Cui, W., Liu, Y., Fatigue behavior of  $\text{Ti}_{50}\text{Zr}$  alloy for dental implant application, *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, V. 793, pp. 212–219. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.04.165.
6. Kosmachev, P.V. Abzaev, Yu.A., Vlasov, V.A., Quantitative phase analysis of plasma-treated high-silica materials, *Russian Physics Journal*, 2018, V. 61, No 2.
7. Oganov, A.R., Glass, C.W., Crystal structure prediction using ab initio evolutionary techniques: Principles and applications, *The Journal of chemical physics*, 2006, V. 124, No 24.
8. Oganov, A.R., Lyakhov, A.O., Valle, M., How Evolutionary Crystal Structure Prediction Works and Why, *Acc. Chem. Res.*, 2011, V. 44, No 3, pp. 227–237.
9. Lyakishev, N.P., *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem* [Diagrams of the state of double metal systems]: reference book, N. P. Lyakishev (Ed.), Moscow: Mashinostroenie, 1996, V. 1, Part 1.
10. Lyakishev, N.P., *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem* [Diagrams of the state of double metal systems]: reference book, N. P. Lyakishev (Ed.), Moscow: Mashinostroenie, 2000, V. 3, Part 2.
11. Trubitsyn, V.Yu., Dolgusheva, E.B., Raschet fazovoj diagrammy splava TiZr i issledovanie tendentsii k rassloeniyu omega-fazy [Calculation of the phase diagram of the TiZr alloy and investigation of the tendency to stratification of the omega phase], *Fizika tverdogo tela*, 2011, V. 53, No 2, pp. 209–214.
12. COD [Electronic resource]: *Crystallography Open Database*. URL: <https://www.crystallography.net/cod/search.html> (reference date: 28.03. 2024).
13. OQMD [Electronic resource]: *The Open Quantum Materials Database*. URL: <https://oqmd.org/materials/composition> (reference date 28.03. 2024).
14. Belgibaeva, A., Abzaev, Y., Karakchieva, N., et al., The structural and phase state of the tial system alloyed with rare-earth metals of the controlled composition synthesized by the “hydride technology”, *Metals*, 2020, V. 10, No 7, pp. 1–17. DOI: 10.3390/met10070859.
15. Karakchieva, N.I., Abzaev, Yu.A., Knyazev, A.S., et al., Fazovy sostav kompozitsionnykh materialov Ti–Al–Me (Me=Sc, Y, Dy, Ho, Ta), poluchennykh “gidridnoi tekhnologiej” [Phase composition of Ti–Al–

## GIBSON – ASHBY EQUATION FOR CELLULAR MATERIALS BASED ON TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACES

V.Ya. SHEVCHENKO<sup>1,2</sup>, Acad. RAS, A.S. ORYSHCHENKO<sup>1</sup>, Corr. member RAS, S.V. BALABANOV<sup>2</sup>, M.M. SYCHEV<sup>1,2</sup>, E.A. PAVLOVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)

<sup>2</sup> Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry, Russian Academy of Sciences, 2 Makarov Emb., 199034 St Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> St Petersburg State Technological Institute (Technical University), 24/26 Moskovsky Ave, 190013 St Petersburg, Russian Federation

Received April 22, 2024

Revised May 5, 2024

Accepted May 8, 2024

**Abstract**—The paper presents experimental data on the physical and mechanical properties of cellular materials with the geometry of triply periodic minimal surfaces (TPMS). It has been established that the dependence of the strength and Young’s modulus on the relative density of materials with the TPMS geometry corresponds to the Gibson – Ashby equation with a fairly high accuracy. Such materials are superior in mechanical properties to classical cellular materials and have high isotropy of mechanical properties.

**Keywords:** cellular materials, Gibson – Ashby equation, mechanical properties

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-122-132

### ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No 20-73-10171 “New generation energy-absorbing materials based on gradient cellular structures”.

### REFERENCES

1. Shevchenko, V.Ya., Kovalchuk, M.V., Oryshchenko, A.S., Sintez novogo klassa materialov s reguljarnoi (periodicheskoj) vzaimosvyazannoi mikrostrukturoj [Synthesis of a new class of materials with a regular (periodic) interconnected microstructure], *Fizika i khimiya stekla*, 2020, V. 46, No 1, pp. 3–11. DOI: 10.31857/S0132665120010187.
2. Shevchenko, V.Ya., Kovalchuk, M.V., Oryshchenko, A.S., Perevislov, S.N., New chemical technologies based on Turing reaction – diffusion processes, *Doklady: Chemistry*, 2021, V. 496, No 2, pp. 28–31.
3. Shevchenko, V.Ya., Perevislov, S.N., Ugolkov, V.L., Physicochemical interaction processes in the carbon (diamond) – silicon system, *Glass Physics and Chemistry*, 2021, V. 47, No 3, pp. 197–208.
4. Shevchenko, V.Ya., Sychev, M.M., Lapshin, A.E., et al., Ceramic Materials with the Triply Periodic Minimal Surface for Constructions Functioning under Conditions of Extreme Loads, *Glass Phys. Chem.*, 2017, V. 43, pp. 605–607. URL: <https://doi.org/10.1134/S1087659617060153>.
5. Shevchenko, V.Ya., Sychev, M.M., Lapshin, A.E., et al., Polymer Structures with the Topology of Triply Periodic Minimal Surfaces, *Glass Phys Chem.*, 2017, V. 43, pp. 608–610. URL: <https://doi.org/10.1134/S1087659617060177>.
6. Balabanov, S., Makogon, A., Sychov, M., Evstratov, A., Regazzi, A., Lopez-Cuesta, J., 3D-Printing and Mechanical Properties of Polyamide Products with Schwartz Primitive Topology, *Technical Physics*, 2020, V. 65, pp. 211–215. URL: <https://doi.org/10.1134/S1063784220020036>.
7. Maskery, I., Sturm, L., Aremu, A.O., Panesar, A., Williams, C.B., Tuck, C.J., Wildman, R.D., Ashcroft, I.A., Hague, R.J., Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing, *Polymer*, 2018, V. 152, pp. 62–71. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.11.049>.



8. Han Lu, Che Shunai, An Overview of Materials with Triply Periodic Minimal Surfaces and Related Geometry: From Biological Structures to Self-Assembled Systems, *Advanced Materials*, 2018, V. 30. URL: <https://doi.org/1705708>. 10.1002/adma.201705708.
9. Xiacong Tian, Kun Zhou, 3D printing of cellular materials for advanced electrochemical energy storage and conversion, *Nanoscale*, 2020, V. 12, pp. 7416–7432. URL: <https://doi.org/10.1039/D0NR00291G>.
10. Alomarah, A., Ruan, D., Masood, S., Gao, Z., Compressive properties of a novel additively manufactured 3D auxetic structure, *Smart Materials and Structures*, 2019, V. 28. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab0dd6>.
11. Yuchu Qin, Qunfen Qi, Paul, J., Scott Xiangqian Jiang. Status, comparison, and future of the representations of additive manufacturing data, *Computer-Aided Design*, 2019, V. 111, pp.44–64. ISSN 0010-4485, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.02.004>.
12. *Polymer Data Handbook*, Oxford University Press, 1999.
13. Engelberg, I., Kohn, J., Physico-mechanical properties of degradable polymers used in medical applications: a comparative study, *Biomaterials*, 1991, V. 12(3), pp. 292–304.
14. Dinh, Thi & Trang, Pham & Nguyen, Thom & Thu Phuong, Nguyen & Pham, Thi Nam & Trang, Nguyen & Seo-Park, Jun & Hoang, Thai. Effects of Porogen on Structure and Properties of Poly Lactic Acid/Hydroxyapatite Nanocomposites (PLA/HAp), *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2016, No. 16, pp. 9450-9459. DOI: 10.1166/jnn.2016.12032.
15. Ziomkovskaya, P.E., Gryaznov, A.O., Opređenje modulya uprugosti ABS i PLA-plastikov, ispolzuemykh v tekhnologiyakh 3D-pechati [Determination of the elastic modulus of ABS and PLA plastics used in 3D printing technologies], Kozubsky, A.M., *Nauchnye issledovaniya i razrabotki studentov: materialy IV Mezhdunar. studench. nauch.-prakt. konf.*, Cheboksary: Interaktiv plus, 2016, pp. 166–169.
16. Arsentiev, M.Yu., Balabanov, S.V., Sychev, M.M., Dolgin, D.S., Crystalline Design of Cellular Materials, *Glass Physics and Chemistry*, 2020, V. 46, No. 6, pp. 638–641.
17. GOST 4651-2014 (ISO 604:2002): *Plastmassy. Metod ispytaniya na szhatie*, Standartinform, 2014.
18. Gibson, L.J., Ashby, M.F., The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1982, V. 382, No 1782, The Royal Society, pp. 43–59. URL: <http://www.jstor.org/stable/2397268>.
19. Abou-Ali, A.M., Lee, D.-W., Abu Al-Rub, R.K., On the Effect of Lattice Topology on Mechanical Properties of SLS Additively Manufactured Sheet-, Ligament-, and Strut-Based Polymeric Metamaterials, *Polymers*, 2022, V. 14, Is. 21, p. 4583. URL: <https://doi.org/10.3390/polym14214583>.
20. Ghaemi Khiavi, S., Mohammad Sadeghi, B., Divandari, M., Effect of topology on strength and energy absorption of PA12 non-auxetic strut-based lattice structures, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, October, pp. 1595–1613. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.116>.
21. Zhonggang, W., Jiefu, L., David, H., Mechanical behaviors of inclined cell honeycomb structure subjected to compression, *Composites, Part B: Engineering*, 2017, V. 110, pp. 307–314. ISSN 1359-8368. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.062>.

UDC 666.792.5:534.2

## ON THE ANALYSIS OF PHYSICAL PROPERTIES OF THERMAL INTERFACES BASED ON HEXAGONAL BORON NITRIDE AND COPPER

D.A. PROKHOROV<sup>1,2</sup>, S.M. ZUEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadskogo Ave, 119454, Moscow, Russian Federation. E-mail: [prohorovdmikhail97@yandex.ru](mailto:prohorovdmikhail97@yandex.ru)

<sup>2</sup> Federal State Unitary Enterprise “NAMI”, 2 St Avtomotornaya 125438, Moscow. E-mail: [sergei\\_zuev@mail.ru](mailto:sergei_zuev@mail.ru)

Received April 22, 2024

Revised April 26, 2024

Accepted May 3, 2024

**Abstract**—The physical properties (thermal and thermal diffusivity) of thermal interfaces based on powdered boron nitride with a hexagonal crystal lattice (h-BN) and copper with a cubic crystal lattice (Cu) for cooling the electronic component base of micro- and nanoelectronics are studied. The physical properties are determined by the flash method. The prospects of using pressed hexagonal boron nitride powder as a thermal interface without using a binder are described. A comparison with the physical properties of other thermal interfaces that are widely used at present is made.

**Keywords:** thermal interface, hexagonal boron nitride, copper, integrated circuit cooling

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-133-144

#### ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out using the equipment of the Center for Collective Use (CCU) of the Russian Technological University (RTU MIREA) with the support of the Ministry of Education and Science of Russia.

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No 23-29-00079, <https://rscf.ru/project/23-29-00079>.

#### REFERENCES

1. Donghua, L., Xiaosong, Ch., Yaping, Y., et al., Conformal hexagonal-boron nitride dielectric interface for tungsten diselenide devices with improved mobility and thermal dissipation, *Nature Communications*, 2019, No 10, Art. 1188.
2. Sarkarat, M., Lanagan, M., Ghosh, D., Lottes, A., Budd, K., Rajagopalan, R., Improved thermal conductivity and AC dielectric breakdown strength of silicone rubber/BN composites, *Composites. Part C: Open Access*, Elsevier Ltd., 2020, V. 2, Art. 100023.
3. Solozhenko, V.L., Lazarenko, A.G., Petitet, J.-P., Kanaev, A.V., Bandgap energy of graphite-like hexagonal boron nitride, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2001, No 62.
4. Yu, S., Kaviany, M., Electrical, thermal, and species transport properties of liquid eutectic Ga-In and Ga-In-Sn from first principles, *The Journal of Chemical Physics*, AIP Publishing LLC, 2014, V. 140, pp. 1–8.
5. Martin, R.L., Kok, J.F., Wind-invariant saltation heights imply linear scaling of aeolian saltation flux with shear stress, *Science Advances*, 2017, V. 3, Is. 6.
6. Zuev, S.M., Prokhorov, D.A., Investigation of the Characteristics of a Graphene-Based Thermal Interface for Cooling Integrated Circuits, *Protection of metals and physical chemistry of surfaces*, 2023, V. 59, No 2, pp. 1–8.
7. Landau, L.D., Lifshits, E.M., *Gidrodinamika* [Hydrodynamics], Moscow: Nauka, 1986.
8. Rid, R., Shervud, T., *Svoistva gazov i zhidkostei (opredelenie i korrelyatsiya)* [Properties of gases and liquids (definition and correlation)], Leningrad: Khimiya, 1971.
9. *Svidetelstvo ob utverzhenii tipa sredstv izmerenii No 82575-21: Opisanie tipa sredstva izmerenii. Difraktometri rentgenovskie modeli DRON-8N i DRON-8T* [Description of the type of measuring instrument. Diffractometers X-ray models DRON-8H and DRON-8T], VNIIM im. D.I. Mendeleeva, 2023.
10. Alam, K., Open air X-ray diffractometer for crystallography, compression, contraction, and structural phase transitions with variable temperature capabilities, *Methods X*, 2024, V. 12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102703>.
11. *Svidetelstvo ob utverzhenii tipa sredstv izmereniy, No 57491-14: Opisanie tipa sredstva izmereniy. Izmeriteli teplofizicheskikh parametrov modifikatsii LFA 467 HyperFlash* [Description of the type of measuring instrument. Thermophysical parameters of the measuring instrument LFA 467 HyperFlash modification], VNIIM im. D.I. Mendeleeva, 2022.
12. Bachmann, J., Gleis, E., Schmölder, S., Fruhmant, G., Hinrichsen, O., Photo-DSC method for liquid samples used in vat photopolymerization, *Analytica Chimica Acta*, 2021, V. 1153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338268>.
13. *Svidetelstvo ob utverzhenii tipa sredstv izmerenij No 54912-13: Opisanie tipa sredstva izmerenij. Kalorimetri diferencialnye skaniruyushchie modifikacij DSC 200 F3, DSC 204 F1, DSC 204 HP, DSC 404 C, DSC 404 F1, DSC 404 F3* [Description of the type of measuring instrument. Differential scanning calorimeters of the DSC 200 F3, DSC 204 F1, DSC 204 HP, DSC 404 C, DSC 404 F1, DSC 404 F3 modifications], VNIIM im. D.I. Mendeleeva, 2023.

14. Sakthi Balan, G., Mohana Krishnan, A., Saravanavel, S., Ravichandran, M., Investigation of hardness characteristics of waste plastics and egg shell powder reinforced polymer composite by stirring route, *Materials Today: Proceedings*, 2020, V. 33(7), pp. 4090–4093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.545>.

15. Prokhorov, D.A., Zuev, S.M., Issledovanie harakteristik termointerfejsa na osnove grafena dlya ohlazhdeniya integral'nyh mikroskhem [Investigation of the characteristics of a graphene-based thermal interface for cooling integrated circuits], *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*, 2023, V.59, No 2, pp. 167–174.

16. Zuev, S.M., Kretushev, A.V., Issledovanie mikrostruktury lyuminoforov dlya lazernykh osvetitel'nykh ustroystv [Investigation of the microstructure of phosphors for laser lighting devices], *Optika i spektroskopiya*, 2023, V. 131, Is. 3, pp. 370–379.

UDC 678.686

## COMPARISON OF COMPOSITION, PROPERTIES AND MODIFYING EFFECT IN EPOXY COMPOSITIONS OF NATURAL AND SYNTHETIC DIOPSIDE-CONTAINING FILLERS

K.R. GABDULKHAEV, A.R. VALEEVA, I.D. TVERDOV, E.M. GOTTLIEB, Dr Sc (Eng)

*Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx St, 420015 Kazan, Russian Federation*

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI  
10 Karl Marx St, 420111 Kazan, Russian Federation*

*Analytical Research Center, NanoAnalytics Complex Laboratory 50/26 Peterburgskaya St,  
420107 Kazan, Russian Federation*

Received February 5, 2024

Revised March 21, 2024

Accepted April 12, 2024

**Abstract**—Diopside is one of the key components in various construction materials and can also be used as a filler for epoxy compositions. However, due to the complexity and labor intensity of developing domestic deposits of this calcium magnesium silicate, it is rational to synthesize diopside based on rice husk ash and dolomite and compare its phase composition and properties with diopside concentrate mined in nature.

It has been established that the synthesized calcium-magnesium silicate, compared to the natural mineral, contains 10 times more diopside, has a 3 times smaller pore volume and an almost 5 times smaller average particle size, i.e. they differ significantly in both phase and granulometric composition, as well as in porosity.

At the same time, both natural and synthetic diopside-containing fillers increase the hardness, wear resistance and viability of epoxy compositions. A filler synthesized on the basis of rice husk ash is more effective in terms of increasing the performance characteristics of epoxy materials.

**Keywords:** epoxy compositions, phase composition, porosity, hardness, wear resistance, viability, natural and synthetic diopside-containing fillers

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-145-152

## REFERENCES

1. Safonova, T.V., Vereshchagin, V.I., Bayandina, E.V., Stroitel'naya keramika na osnove kompozitsii nizko- i sredneplastichnogo glinistogo i diopsidovogo syriya [Construction ceramics based on compositions of low- and medium-plastic clay and diopside raw materials], *Vestnik TGASU*, 2012, No 2, pp. 154–162.

2. Vereshchagin, V.K., Menshikova, A.E., et al., Keramicheskie materialy na osnove diopsida [Ceramic materials based on diopside], *Steklo i keramika*, 2010, No 11, pp. 13–16.

3. Vereshchagin, V.I., Buruchenko, A.E., Menshikova, V.K., Bezusadochny oblitsovochny keramicheskyy material na osnove diopsidovogo syriya [Non-shrink ceramic cladding material based on diopside raw materials], *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, No 1 (1).

4. Tverdov, I.D., Gotlib, E.M., Ncumu, R.Sh., Yamaleeva, E.S., Diopsid kak napolnitel epoksidnykh polimerov [Diopside as a filler of epoxy polymers], *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik*, 2023, No 4, pp. 11–15.

5. Kozik, V.V., Borodina, I.A., Borilo, L.P., Slizhov, Yu.G., Issledovanie materialov na osnove poliefirnoi smoly i diopsida [Research of materials based on polyester resin and diopside], *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2004, V. 47, No 1, pp. 112–115.
6. Adesakin, A.O., Ajayi, O.O., et al., Characterization and Evaluation of Mechanical Properties of Dolomite as Filler in Polymers, *Chem. Mater. Res.*, 2013, No 3, pp. 36–40.
7. Srinath, P.A., Azeem, P.V., et al., A novel cost-effective approach to fabricate diopside bio ceramics, *Advanced powder technology*, 2021, V. 32, No 3, pp. 875–884.
8. Colombo, P., Mera, G., Riedel, R., Sorarù, G.D., Polymer-Derived Ceramics: 40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, 2010, No 93 (7), pp. 1805–1837.
9. Kryzhanovsky, V.K., et al., Izuchenie vliyaniya vysokodispersnykh i nanorazmernykh neorganicheskikh dobavok na strukturno-fizicheskie kharakteristiki epoksidnykh matrits i svoistva triboplastikov [To study the effect of highly dispersed and nanoscale inorganic additives on the structural and physical characteristics of epoxy matrices and properties of triboplastics], *Voprosy materialovedeniya*, 2009, V. 57, No 1, pp. 66–76.
10. Minakova, T.S., *Adsorbtsionnye protsessy na poverkhnosti tverdykh tel* [Adsorption processes on the surface of solids study guide], Tomsk: Izd-vo Tomskogo universiteta, 2007.
11. Nizina, T.A., Sokolova, J.A., et al., Filled epoxy composites based on polyfraction microcalcite, *Magazine of Civil Engineering*, 2018, No 83 (7), pp. 83–91.
12. Arefieva, O.D., Pirogovskaya, P.D., et al., *Kislотно-основные свойства аморфного диоксида кремния из соломы и шелухи риса* [Acid-base properties of amorphous silicon dioxide from straw and rice husk], *Khimiya rastitelnogo syriya*, 2021, No 1, pp. 327–335.
13. Liou, T.-H., Liou, Y.H., Utilization of Rice Husk Ash in the Preparation of Graphene-Oxide-Based Mesoporous Nanocomposites with Excellent Adsorption Performance, *Materials*, 2021, No 14 (5).
14. Startsev, O.V., Efimov, V.A., Klimaticheskaya stoikost i povrezhdaemost polimernykh kompozitsionnykh materialov, problemy i puti resheniya [Climatic resistance and damage resistance of polymer composite materials, problems and solutions], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, No 5, pp. 412–423.
15. Gotlib, E.M., Nha Phuong, H.T., et al., Study of the chemical, climatic and thermal resistance of epoxy coatings filled with natural and synthetic wollastonite, *Key Engineering Materials*, 2021, V. 899, pp. 317–325.

UDC 621.039.531:539.422.22

## PLASTIC STRAIN EFFECT ON CLEAVAGE MICROCRACKS PROPAGATION IN PROBABALISTIC STATEMENT. Part 1. Formulation of the problem and research methods

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), V.N. FOMENKO, Cand Sc. (Eng),  
V.A. SHVETSOVA, Cand Sc. (Phys-math), F.L. SHISHKOV, E.V. YURCHENKO, Cand Sc. (Eng)

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received February 21, 2024

Revised April 16, 2024

Accepted April 22, 2024

**Abstract**—The first part considers the main physical and mechanical processes occurring under tension of round bars. The procedure is presented that allows one to describe the plastic strain effect on the critical brittle fracture stress in probabilistic statement. The main statements of Prometey model for prediction of fracture stress are also presented. The investigations are carried out for two materials: 2Cr–Ni–Mo–V steel used for WWER-1000 RPV in the thermally-embrittled state and low-alloyed low-strength steel of St3 grade taken as model material ruptured by cleavage up to plastic strain up to 50%.

**Keywords:** brittle fracture probability, local approach, microcrack propagation, plastic strain effect

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-153-168

## REFERENCES

1. Pisarenko, G.S., Krasowsky, A.J., Analysis of kinetics of quasibrittle fracture of crystalline materials, *Mechanical Behaviour of Materials. Proc. Int. Conf. Mech. Behav. Mater.*, Kyoto, 1972, V. 1, pp. 421–432.
2. Ritchie, R.O., Knott, J.F., Rice, J.R., On the relation between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel, *J. Mech. Phys. Solids*, 1973, V. 21, pp. 395–410.
3. Beremin, F.M., A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel, *Metall Trans A*, 1983, V. 14, pp. 2277–2287.
4. Mudry, F., A local approach to cleavage fracture, *Nuclear Engineering and Design*, 1987, V. 105, pp. 65–76.
5. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Local criterion for cleavage fracture: structural and mechanical approach, *J Phys. IV*, 1996, V. 6, No C6, pp. 225–234.
6. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Karzov, G.P., Brittle fracture of nuclear pressure vessel steels. I. Local criterion for cleavage fracture, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, 1997, V. 72, pp. 73–87.
7. Lefevre, W., Barbier, G., Masson, R., Rousselier, G., A modified Beremin model to simulate the warm pre-stress effect, *Nuclear Eng. and Design*, 2002, V. 216, pp. 27–42.
8. Bordet, S.R., Karstensen, A.D., Knowles, D.M., Wiesner, C.S., A new statistical local criterion for cleavage fracture in steel, *Eng. Fract. Mech.*, 2005, V. 72, pp. 435–474.
9. Pineau, A., Development of the local approach to fracture over the past 25 years: theory and applications, Carpinteri, A., Mai, Y-W., Ritchie, R. (Eds.), *Honour and Plenary Lectures Presented at the 11th International Conference on Fracture (ICF11)*, Springer, 2006, pp. 139–166.
10. Tanguy, B., Bouchet, C., Bordet, S.R., Besson, J., Pineau, A., Toward a better understanding of a cleavage in RPV-steels: Local mechanical conditions and evaluation of a nucleation enriched Weibull model and of the Beremin model over large temperature range, *EUROMECH-MECAMAT: 9th European Mechanics of Materials Conference Local Approach to Fracture*, Besson, J., Moineau, D., Steglich, D. (Eds.), Mines, 2006, pp. 129–134.
11. Meshkov, Yu.Ya., *Fizicheskie osnovy razrusheniya stalnykh konstruksiy* [The physical basis of the destruction of steel structures], Kiev: Naukova Dumka, 1981.
12. Di Fant, M., Carius, H., Carollo, G., Cleizergues, O., Le Cog, V., Mudry, F., Local approach to brittle fracture: Discussion on the effects of temperature and strain on the critical cleavage stress, *2nd Griffiths Conf. on Mechanisms of Fracture and their Structural Significance*, Sheffield, 13–15 Sept., 1995.
13. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Shvetsova, V.A., Dalneishee razvitiye modeli Prometej i metoda Unified Curve. Chast 1. Razvitiye modeli Prometej [Further development of the Prometej model and the Unified Curve method. Part 1. Development of the Prometej model], *Voprosy Materialovedeniya*, 2016, No 4 (88), pp. 120–150.
14. Ludwik, R., *Elemente der technologischen Mechanik*, Berlin, 1909.
15. Ioffe, A.F., Kirpicheva, M.V., Levitskaya, M.A., Deformatsiya i prochnost kristallov [Deformation and strength of crystals], *Zhurn. Russk. fiz.-khim. obshchestva, chast fiz.*, 1924, V. 56, pp. 489–504.
16. Davydenkov, N.N., *Dinamicheskie ispytaniya materialov* [Dynamic testing of materials], Moscow: ONTI, 1936.
17. Fridman, Ya.B., *Mekhanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals], Moscow: Oborongiz, 1952.
18. Knott, J.F., *Fundamentals of Fracture Mechanics*, London: Butterworths, 1973.
19. Hahn, G.T., Averbach, B.L., Owen, W.S., Cohen, M., Initiation of cleavage microcracks in polycrystalline iron and steel. *Fracture*, Averbach, B.L., et al. (Eds.), MIT Press Cambridge, MA, Wiley, New York, 1959, pp. 91–116.
20. Kopelman, L.A., *Soprotivlyaemost svarnykh uzlov khrupkomu razrusheniyu* [Resistance of welded joints to brittle fracture], Leningrad: Mashinostroenie, 1978.
21. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.V., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh staley: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin. Ch. 1: Strategiya, programma i metody eksperimentalnykh i raschetnykh issledovaniy [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels:

the relationship of embrittlement and fracture mechanisms with the characteristics of the origin and propagation of microcracks. Part 1: Strategy, program and methods of experimental and computational research], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 1 (117), pp.173–194.

22. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.V., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh stali: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin. Ch. 2. Kharakteristiki prochnosti i plastichnosti [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels: the relationship of embrittlement and fracture mechanisms with the characteristics of the origin and propagation of microcracks. Part 2. Strength and ductility characteristics], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 1 (117), pp. 195–209.

23. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.V., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh stali: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin. Ch. 3. Modelirovanie khрупkogo razrusheniya i analiz svyazi kharakteristik zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin s mekhanizmami okhrupchivaniya [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels: the relationship of embrittlement and fracture mechanisms with the characteristics of the origin and propagation of microcracks. Part 3. Modeling of brittle fracture and analysis of the relationship between the characteristics of the origin and propagation of microcracks with embrittlement mechanisms], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 2 (118), pp. 166–186

24. Parrot, A., Dahl, A., Forget, P., Marini, B., Evaluation of fracture toughness from instrumented Charpy impact tests for a reactor pressure vessel steel using local approach to fracture, Besson, J., Moineau, D., Steglich, D. (Eds.), *EUROMECH-MECAMAT 2006: local approach to fracture*, Mines, 2006, pp. 291–296.

25. Rybin, V.V., *Bolshie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov* [Large plastic deformations and destruction of metals], Moscow: Metallurgiya, 1986.

26. Karzov, G.P., Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., *Fiziko-mekhanicheskoe modelirovanie protsessov razrusheniya* [Physical and mechanical modeling of fracture processes], St Petersburg: Politehnika, 1993.

27. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Application of a new cleavage fracture criterion for fracture toughness prediction for RPV steels, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 2006, No 29 (9), pp. 697–713.

28. Weibull, W.A., A statistical theory of the strength of materials, *Roy Swed Inst Eng Res.*, 1939, V. 151, pp. 5–45.

UDC 621.039.531:539.422.22

## PLASTIC STRAIN EFFECT ON CLEAVAGE MICROCRACKS PROPAGATION IN PROBABALISTIC STATEMENT. Part 2. Research results

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), V.N. FOMENKO, Cand Sc. (Eng),  
V.A. SHVETSOVA, Cand Sc. (Phys-math), F.L. SHISHKOV, E.V. YURCHENKO, Cand Sc. (Eng)

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received February 21, 2024

Revised April 16, 2024

Accepted April 22, 2024

**Abstract**—The second part of the paper presents the results of uniaxial tension testing of smooth round bars of 2Cr–Ni–Mo–V steel in the thermally-embrittled state and St3 steel in the initial state. SEM examination of the fracture surfaces is carried out. The brittle fracture probability is calculated using the Prometey model presented in the first part of this article. It has been found that the plastic strain effect on the microcrack propagation probability is caused by two reasons: (1) the critical brittle fracture stress increase due to formation of new barriers for microcrack under plastic deformation, and (2) the working volume decrease due to the neck formation in tensile round bar. A unified set of parameters has been proposed to take into account the plastic strain effect on cleavage microcracks propagation probability for WWER-1000 RPV steel and low-alloyed low-strength steel.

**Keywords:** brittle fracture probability, local approach, microcrack propagation, plastic strain effect

## REFERENCES

1. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.V., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh stali: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin. Ch. 2. Kharakteristiki prochnosti i plastichnosti [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels: the relationship of embrittlement and fracture mechanisms with the characteristics of the origin and propagation of microcracks. Part 2. Characteristics of strength and ductility], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 1 (117), pp. 195–209.
2. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Application of a new cleavage fracture criterion for fracture toughness prediction for RPV steels, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 2006, No 29 (9), pp. 697–713.
3. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.V., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh stali: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin. Ch. 1. Strategiya, programma i metody eksperimentalnykh i raschetnykh issledovaniy [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels: the relationship of embrittlement and fracture mechanisms with the characteristics of the origin and propagation of microcracks. Part 1: Strategy, program and methods of experimental and computational research], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 1 (117), pp. 173–194.
4. *Fizicheskoe materialovedenie* [Physical Materials Science], Kalina, B.A. (Ed.), V. 4, Moscow: MEPhI, 2008.
5. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.V., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh stali: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin. Ch. 3. Modelirovanie khрупkogo razrusheniya i analiz svyazi kharakteristik zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin s mekhanizmami okhrupchivaniya [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels: the relationship of embrittlement and fracture mechanisms with the characteristics of the origin and propagation of microcracks. Part 3. Modeling of brittle fracture and analysis of the relationship between the characteristics of the origin and propagation of microcracks with embrittlement mechanisms], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 2 (118), pp. 166–186.

UDC 669.715:620.193.013

## EFFECT OF LANTHANUM, CERIUM, PRASEODYMIUM ON CORROSION-ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF ALUMINUM CONDUCTOR ALLOY AlTi0.1, IN NaCl ELECTROLYTE

I.N. GANIEV<sup>1</sup>, Dr Sc. (Chem), A.Dzh. AMIROV<sup>1</sup>, Dzh. Kh. DZHAILOEV<sup>1</sup>, Cand Sc. (Eng),  
F.Sh. ZOKIROV<sup>2</sup>, Cand Sc. (Eng), I.T. AMONZODA, Dr Sc. (Eng)

<sup>1</sup>Tajik Technical University named after M.S. Osimi, 10 Academician Radzhabov Ave,  
734042, Dushanbe, Republic of Tajikistan. E-mail: [ganievisatullo48@mail.ru](mailto:ganievisatullo48@mail.ru)

<sup>2</sup>Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin, National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2 Aini St, 734063 Dushanbe, Republic of Tajikistan

Received February 20, 2024

Revised April 11, 2024

Accepted April 11, 2024

**Abstract**—The article presents the results of studying the effect of lanthanum, cerium and praseodymium additives (0–1.0 wt.%) as structure modifiers on the anodic behavior of the aluminum conductive alloy AlTi0.1 in the NaCl electrolyte medium. The studies were carried out using the potentiostatic method with a potential scan rate of 2 mV/s. It was found that over time, the free corrosion potential of the alloys shifts to the positive side and acquires a positive value with an increase in the modifier concentration (lanthanum, cerium, praseodymium) in the aluminum conductive alloy. The addition of lanthanum to the aluminum conductive alloy AlTi0.1 by 12–23%, cerium by 20–30% and praseodymium by 25–35% increases its corrosion resistance. An increase in the corrosion rate of the alloys with an increase in the NaCl concentration in the solution, regardless of their composition, was noted. An increase in the concentration of chloride ion in the NaCl electrolyte leads to a decrease in the potentials of free corrosion, repassivation and pitting of alloys.

**Keywords:** aluminum alloy AlTi0.1, lanthanum, cerium, praseodymium, potentiostatic method, corrosion-electrochemical behavior, steady-state potential, corrosion potential, corrosion rate, NaCl electrolyte

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-187-195

## REFERENCES

1. Arzamasov, B.N., Makarova, V.I., Mukhin, G.G., et al., *Materialovedenie* [Materials Science], Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 2003.
2. Semenov, A.P., Antifriktsionnye materialy: opyt primeneniya i perspektivy [Antifriction materials: application experience and prospects], *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh*, 2007, No 12, pp. 21–36.
3. Snitovskiy, Yu.P., Vliyanie sostava legiruyushchikh elementov na fiziko-mekhanicheskie svoystva alyuminiya [The effect of the composition of alloying elements on the physical and mechanical properties of aluminum], *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No 4 (67), pp. 68–76. URL: <https://doi.org/10.18822/byusu20220468-76>.
4. Korotkova, N.O., Belov, N.A., Avksentieva, N.N., Aksenov, A.A., Vliyanie dobavki kaltsiya na fazovy sostav i fiziko-mekhanicheskie svoystva provodnikovogo splava Al–0,5%Fe–0,2%Si–0,2%Zr–0,1%Sc [The effect of calcium additives on the phase composition and physico-mechanical properties of a conductive alloy Al–0.5%Fe–0.2%Si–0.2%Zr–0.1%Sc], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2020, No 121 (1), pp. 105–112. URL: <https://doi.org/10.31857/S001532302001009X>.
5. Belov, N.A., Alabin, A.N., Prokhorov, A.Yu., Vliyanie dobavki tsirkoniya na prochnost i elektrosoprotivlenie kholodnokatanykh alyuminiyevykh listov [The effect of zirconium additives on the strength and electrical resistance of cold-rolled aluminum sheets], *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2009, No 4, pp. 42–47.
6. Duan, Yu., Xu, G.F., Zhou, L., Xiao, D., Achieving high superplasticity of a traditional thermal mechanical processed non-superplastic Al–Zn–Mg alloy sheet by low Sc additions, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, No 638, pp. 364–373. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.03.090>.
7. Belov, N.A., Alabin, A.N., Teleulova, A.R., Comparative analysis of alloying additives as applied to the production of heat-resistant aluminum-base wire, *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, No 9, pp. 455–459. URL: <https://doi.org/10.1007/s11041-012-9415-5>.
8. Bely, D.I., Alyuminiyevye splavy dlya tokoprovodyashchikh zhil kabelnykh izdelii [Aluminum alloys for conductive conductors of cable products], *Kabeli i provoda*, 2012, No 1, pp. 8–15.
9. Chao, R.Z., Guan, X.H., Guan, R.G., Tie, D., Lian, C., Wang, X., Effect of Zr and Sc on mechanical properties and electrical conductivities of Al wires, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, No 24, pp. 3164–3169. URL: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63456-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63456-7).
10. Nazarov Sh., Rossi, S., Bison, P., Pezzato, L., Kalliari, I., Ganiev, I., Vliyanie dobavki redkozemelnykh elementov na svoystva splavov Al–Li [The effect of the addition of rare earth elements on the properties of Al–Li alloys], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2019, V. 120, No 4, pp. 433–441.
11. Altman, M.B., et al., *Promyshlennyye alyuminiyevye splavy* [Industrial aluminum alloys], Moscow: Metallurgiya, 1984.
12. Bely, D.I., Alyuminiyevye splavy dlya tokoprovodyashchikh zhil kabelnykh izdelii [Aluminum alloys for conductive conductors of cable products], *Kabeli i provoda*, 2012, No 1, pp. 8–15.
13. Chao, R.Z., Guan, X.H., Guan, R.G., Tie, D., Lian, C., Wang, X., Effect of Zr and Sc on mechanical properties and electrical conductivities of Al wires, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, No 24, pp. 3164–3169.
14. Fallah, V., Langelier, B., Ofori-Opoku, N., Raesinia, B., Provatas, N., Esmaeili, S., Cluster evolution mechanisms during aging in Al–Mg–Si alloys, *Acta Materialia*, 2016, No 103, pp. 290–300.
15. Duyunova, V.A., Trapeznikov, A.V., Leonov, A.A., Koreneva, E.A., Modifitsirovanie liteinykh alyuminiyevykh splavov [Modification of cast aluminum alloys]: review, *Trudy VIAM*, 2023, No 4 (122), pp. 14–26.
16. Grigorieva, I.O., Dresvyannikov, A.F., Khramova, A.V., Mikhailishin, I.O., Vliyanie anionov na elektrokhimicheskoe povedenie alyuminiya v rastvorakh solei [The effect of anions on the electrochemical behavior of aluminum in salt solutions], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2018, No 21 (7), pp. 46–50.



17. Umarova, T.M., Ganiev, I.N., *Korroziya dvoynykh alyuminievykh splavov v neitralnykh sredakh* [Corrosion of double aluminum alloys in neutral environments], Dushanbe: Donish, 2017.
18. Nikolsky, K.K., *Zashchita ot korrozii metallicheskih kabelei* [Corrosion protection of metal cables], Moscow: Svyaz, 1970.
19. Freiman, L.I., Makarov, V.A., Bryksin, I.E., *Potentsiostaticheskie metody v korrozionnykh issledovaniyakh i elektrokhimicheskoi zashchite* [Potentiostatic methods in corrosion research and electrochemical protection], Leningrad: Khimiya, 1972.
20. Ganiev, I.N., Rakhmatulloeva, G.M., Zokirov, F.Sh., Eshov, B.B., The effect of sodium additives on the anodic behavior of AlTi0.1 aluminum conductor alloy in a medium of NaCl electrolyte, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2023, No 59 (4), pp. 451–455. URL: <https://doi.org/10.1134/S2070205123700727>.
21. Ganiev, I.N., Faizulloev, R.Dzh., Zokirov, F.Sh., Vliyanie kaltsiya na anodnoe povedenie alyuminievogo provodnikovogo splava AlTi0.1 v srede elektrolita NaCl [The effect of calcium on the anodic behavior of aluminum conductor alloy AlTi0.1 in a NaCl electrolyte environment], *Izvestiya SPbGTI (TU)*, 2021, No 58 (84), pp. 33–37. URL: <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2021-58-84-33-37>
22. Ganiev, I.N., Zokirov, F.Sh., Amirov, A.Dzh., Vliyanie lantana na anodnoe povedenie alyuminievogo provodnikovogo splava AlTi0.1 v srede elektrolita NaCl [The effect of lanthanum on the anodic behavior of the aluminum conductor alloy AlTi0.1 in a NaCl electrolyte environment], *Vestnik PNIPU*, 2023, No 3, pp. 66–78. URL: <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2023.3.05>.
23. Petry, O.A., *Ekvivalent elektrokhimicheskoy. Kratkaya khimicheskaya entsiklopediya* [Electrochemical equivalent. A brief chemical Encyclopedia], I.L. Knunyanc (Ed.), 1967, V. 5, Moscow: Sov. Entsiklopediya.

UDC 669.295:620.197

#### EFFECT OF RUTHENIUM MICROADDITIVES ON THE STRUCTURE AND CORROSION RESISTANCE OF ALPHA, PSEUDO-ALPHA TITANIUM ALLOYS

V.P. LEONOV, Dr Sc (Eng), Yu.Yu. MALINKINA, Cand. Sc (Eng), O.A. STAVITSKY, Cand. Sc (Eng), P.I. MALASHEV, O.N. PARMENOVA, Yu.M. MARKOVA

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received March 28, 2024

Revised May 27, 2024

Accepted May 29, 2024

**Abstract**—The paper examines electrochemical studies of forgings made of  $\alpha$ , pseudo- $\alpha$  titanium alloys of industrial compositions and with the addition of ruthenium. Comparative dependences of the current density on time were constructed at various potentials in 3.5% NaCl for titanium alloys of industrial composition and with the addition of ruthenium. The breakdown potential of the titanium alloys under study was determined. Microstructural studies of titanium alloys of various compositions were carried out after determining the breakdown potential.

**Keywords:** titanium alloys, ruthenium, polarization, forgings, breakdown potential

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-196-209

#### ACKNOWLEDGMENTS

*Experimental studies were carried out on the equipment of the Center for collective use of scientific equipment “Composition, structure, properties of structural and functional materials” of the National Research Center “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural Materials “Prometey” with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education – agreement No 13.TsKP.21.0014 (075-11-2021-068). Unique identification number – RF----2296.61321X0014.*

#### REFERENCES

1. Oryshchenko, A.S., Kuzmin, Yu.L., Troshchenko, V.N., Medyanik, T.E., Podshivalov, A.V., Stavitsky, O.A., *Dolgovremennaya elektrokhimicheskaya zashchita ot korrozionno-erozionnykh razrusheniy v nedokuemykh morskikh sooruzheniy dlya neftegazodobychi na shelfe Arkticheskikh morei* [Long-term electrochemical protection against corrosion and erosion damage in the underfloor of offshore structures for oil

and gas production on the shelf of the Arctic seas], *Praktika protivokorroziionnoj zashchity*, 2013, No 2 (68), pp. 56–68.

2. Kalinin, G.Yu., Stavickij, O.A., Zashchita ot korrozii korpusov sudov i morskoi tekhniki [Corrosion protection of ship hulls and marine equipment], *Novy oboronny zakaz. Strategii*, 2018, No 6, pp. 60–62.

3. Nikolaev, G.I., Kuzmin, Yu.L., Lishevich, I.V., Stavitsky, O.A., et al., Etapy sozdaniya sistem katodnoi zashchity ot korrozii korpusov atomnykh ledokolov i arkticheskikh morskikh sooruzheny [Stages of creation of cathodic corrosion protection systems for nuclear icebreaker hulls and Arctic offshore structures], *Voprosy Materialovedeniya*, 2021, No 3 (107), pp. 150–162

4. Mikhailov, B.N., Nemykina, O.V., Korroziionnoe povedenie titana v khloridno-gidroksidnykh rastvorakh proizvodstva khloro i kaustika [Corrosion behavior of titanium in chloride-hydroxide solutions of chlorine and caustic production], *Polzunovskij vestnik*, 2008, No 3, pp. 256–257.

5. Povarova, L.V., Kashcheeva, E.A., Bibikov, N.N., Issledovanie anodnoi polarizatsii titana v morskoi vode [Investigation of the anodic polarization of titanium in seawater], *Trudy CNIITS*, 1973, V. 156, pp. 53–59.

6. Tomashov, N.D., *Titan i korroziionnostoikie splavy na ego osnove* [Titanium and corrosion-resistant alloys based on it], Moscow: Metallurgiya, 1985.

7. Hua, F., Mon, K., Pasupathi, P., Gordon, G., Corrosion of TI Grade 7 and other TI alloys in nuclear waste repository environments: a review, *NACE International CORROSION*, 2004, No 04689, 2004.

8. Chechulin, B.B., Parogeneratory – borba za resurs [Steam generators – the struggle for a resource], *Po puti sozdaniya*, I.V. Gorynin (Ed.), St Petersburg: TsNII KM “Prometey”, 2009, V. 1.

9. Scherbinin, V.F., Leonov, V.P., Malinkina, Yu.Yu., Increase in corrosion resistance of titanium alloy in concentrated aqueous solutions of chlorides at high temperatures, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2013, V. 4, Is. 6, pp. 537–541.

10. Leonov, V.P., Chudakov, E.V., Rtishcheva, L.P., Malinkina, Yu.Yu., Tryaev, P.V., Mikhailov, A.S., Pryakhin, D.A., Issledovanie vliyaniya ruteniya na korroziionnye svoistva deformirovannykh polufabrikatov iz titanovykh splavov dlya perspektivnoi grazhdanskoi morskoi tekhniki [Investigation of the effect of ruthenium on the corrosion properties of deformed semi-finished products made of titanium alloys for advanced civil marine equipment], *Titan*, 2016, No 3 (53), pp. 19–28.

11. GOST 19807–91: *Titan i splavy titanovye deformiruemye. Marki* [Deformable titanium and titanium alloys. Grades], Moscow: Izdatelstvo standartov, 2011.

12. Leonov, V.P., Chudakov, E.V., Malinkina, Yu.Yu., The influence of micro additives of Ru on the structure, corrosive- mechanical strength and fractography of destruction of pseudo- $\alpha$ -Ti alloys, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, V. 8, No 4, pp. 556–565.

13. Leonov, V.P., Chudakov, E.V., Tretyakova, N.V., Malinkina, Yu.Yu., Petrov, S.N., Tsemenko, A.V., Vasilieva, E.A., Research of the peculiarities of ruthenium distribution in titanium  $\alpha$ -, pseudo- $\alpha$ - and pseudo- $\beta$ -alloys and its effects on corrosion resistance, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2021, V. 12, No 6, pp. 1450–1458.

UDC 621.039.54:669.296

## ESTIMATION OF HYDRIDES STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF IRRADIATED E110 ALLOY AFTER THERMOMECHANICAL TESTS IMITATING DRY STORAGE CONDITIONS

O. O. ZABUSOV<sup>1,2</sup>, Cand Sc. (Phys-math), A. V. UGRYUMOV<sup>3</sup>, Cand Sc. (Eng),  
M. M. GREKHOV<sup>3</sup>, Cand Sc. (Phys-math), D. A. MALTSEV<sup>1</sup>, Cand Sc. (Eng), A. A. SHISHKIN<sup>3</sup>,  
R. A. KURSKIY<sup>1</sup>, A. V. ROZHKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Center “Kurchatov Institute”, 1 Kurchatov Sq, 123182 Moscow, Russian Federation.  
E-mail: [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

<sup>2</sup> National Research Nuclear University “MEPhI”, 31 Kashirskoe Hw, 115409 Moscow, Russian Federation. E-mail: [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

<sup>3</sup> Joint-Stock Company “TVEL”, 49 Kashirskoe Hw, 115409 Moscow, Russian Federation. E-mail: [info@tvel.ru](mailto:info@tvel.ru)

Received April 15, 2024

Revised May 17, 2024

**Abstract**—Safety assurance of spent nuclear fuel dry storage requires reliable prediction of mechanical properties of fuel element cladding depending on structural changes at all stages of nuclear fuel handling. In this work investigations of hydrides structure in irradiated fuel element cladding made of E110 alloy have been conducted in irradiated state as well as after tests simulating dry storage conditions. Using the program code, the coefficients that best correlate with mechanical properties have been found.

**Keywords:** fuel element cladding, zirconium alloys, E110, zirconium hydrides, mechanical properties, dry storage.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-119-3-210-220

#### ACKNOWLEDGMENTS

*The work was performed under the order of JSC TVEL using the experimental base of the research complex of material science protective chambers of NRC “Kurchatov Institute”.*

#### REFERENCES

1. Kalinkin, V.I., Anisimov, O.P., Razmashkin, N.V., Tikhonov, N.S., Simanovsky, V.M., Khranenie OYaT – obyazatelnoe uslovie razvitiya atomnoi energetiki [Spent nuclear fuel storage as a necessary condition of nuclear energy development], *PROAtom*, 2006. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?file=article&name=News&sid=770> (reference date 15/01/2024).
2. Kalinkin, V.I., Kritsky, V.G., Tokarenko, A.I., Tikhonov, N.S., Razmashkin, N.V., Serova, A.L., *Storage of spent nuclear fuel of commercial reactors* [Khranenie otrabotavshogo yadernogo topliva energeticheskikh reaktorov], St Petersburg: VNIPIET, 2009.
3. Ruiz-Hervias J., Simbruner K., Cristobal-Beneyto M., Perez-Gallego D., Zencker U. Failure mechanisms in unirradiated ZIRLO® cladding with radial hydrides, *J. Nucl. Mater.*, 2021, V. 544, Art. 152668.
4. Konarski, P., Cozzo, C., Khvostov, G., Ferroukhi, H., Spent nuclear fuel in dry storage conditions – current trends in fuel performance modeling, *J. Nucl. Mater.*, 2021, V. 555, Art. 153138.
5. Simon, P.C.A., Frank, C., Chen, L.Q., Daymond, M.R., Tonks, M.R., Motta, A.T., Quantifying the effect of hydride microstructure on zirconium alloys embrittlement using image analysis, *J. Nucl. Mater.*, 2021, V. 547, Art. 152817.
6. Kobylansky, G., Mazaev, A., Zvir, E., Eremin, S., Chertopyatov, E., Obukhov, A., The effect of long-term annealing simulating the parameters of dry storage of VVER-1000 fuel rods on the mechanical properties of E110 alloy shells in the longitudinal direction [Vliyanie dlitelnogo otzhiga, modeliruyushchego parametry sukhogo khraneniya tvelov VVER-1000, na mekhanicheskie svoystva obolochek iz splava E110 v prodolnom napravlenii], *Phys. Chem. Mater. Treat.*, 2021, No 4, pp. 42–49.
7. Motta, A.T., Capolungo, L., Chen, L.Q., Cinbiz, M.N., Daymond, M.R., Koss, D.A., Lacroix, E., Pastore, G., Simon, P.C.A., Tonks, M.R., Wirth, B.D., Zikry, M.A., Hydrogen in zirconium alloys: a review, *J. Nucl. Mater.*, 2019, V. 518, pp. 440–460.
8. Kursky, R.A., Safonov, D.V., Zabusov, O.O., Frolov, A.S., Maltsev, D.A., Rozhkov, A.V., Shishkin, A.A., Evolyutsiya struktury gidridov v obluchennom splave E110 pri termomekhanicheskikh ispytaniyakh, imitiruyushchikh zakriticheskie (predelnye) rezhimy sukhogo khraneniya [Evolution of the hydride structure in irradiated E110 alloy in the process of thermomechanical treatment simulating supercritical dry storage conditions], *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2023, No 1, pp. 108–120
9. Kursky, R.A., Rozhkov, A.V., Zabusov, O.O., Maltsev, D.A., Skundin, M.A., Bandura, A.P., Vasilieva, E.A., Shishkin, A.A., Vliyanie termomekhanicheskogo vozdeystviya na strukturu gidridov v obluchennykh obolocheknykh trubakh iz splava E110 v usloviyakh dlitelnogo sukhogo khraneniya otrabotavshogo yadernogo topliva [Influence of thermomechanical exposure on the structure of hydrides in irradiated E110 alloy cladding pipes under the conditions of long-term dry storage of spent nuclear fuel], *Voprosy Materialovedeniya*, 2022, V. 1 (109), pp. 199–214.