

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ «ПРОМЕТЕЙ»  
имени И.В. ГОРЫНИНА  
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



XXIII КОНФЕРЕНЦИЯ  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ  
*«Новые материалы и технологии»*

23–25 июня 2026 г.



ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Санкт-Петербург  
2026 г.

Организаторы конференции:

**НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»**

**Организационный комитет:**

Председатель оргкомитета: генеральный директор  
**д. т. н. Антипов В.В.**

Ответственный секретарь: Орлова Г.М.

**Члены**

оргкомитета:	Бобкова Т.И.	к. т. н.
	Глибенко О.В.	к. т. н.
	Гошкодеря М.Е.	к. т. н.
	Ильин А.В.	д. т. н., доцент
	Кудрявцев А.С.	д. т. н.
	Кузнецов П.А.	д. т. н.
	Леонов В.П.	д. т. н., с. н. с.
	Лишевич И.В.	к. т. н.
	Петров С.Н.	д. т. н.
	Садкин К.Е.	к. т. н.
	Фомина О.В.	д. т. н.

**Место проведения:**

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»  
ул. Шпалерная, дом 49, Санкт-Петербург

**Контакты:**

Отдел подготовки научных кадров  
тел. (812) 274-13-17  
e-mail: OPNK-Prometey@crism.ru

## ОГЛАВЛЕНИЕ

*Анисимов Д.М., Петров С.Н.*

Методические подходы к проведению длительных изотермических выдержек для физического моделирования отжига крупногабаритных поковок ..... 9

*Ахматнабиев М.Ф., Дьяченко С.В., Маруева А.Д.*

Влияние геометрии и материала на вибропоглощающие свойства ячеистых структур ТППМЭ ..... 10

*Бараков Д.Р., Чечель Е.Г., Филин В.Ю.*

К вопросу определения предельной деформационной способности судостроительной стали ..... 11

*Беликова Ю.А., Цеменко А.В., Петров С.Н.*

Оценка эффективности алюминиевых покрытий на жаропрочном сплаве 45X25H35СБ в условиях высокотемпературного науглероживания и окисления ..... 12

*Богомолов П.И.*

Экспериментальная оценка теплофизических характеристик углеродных волокон, применяемых для тепловой защиты конструкций летательных аппаратов ..... 13

*Васильев В.В., Левагин Е.Ю., Храбров А.С.*

Термическая обработка труб переменного сечения с использованием токов промышленной частоты ..... 15

*Васильев М.И., Куртева К.Ю., Яковлева Е.А.*

Оценка склонности низкоуглеродистой бейнитной стали к деформационному старению резонансным методом ..... 16

*Васильев Н.В., Богданов С.П., Христюк Н.А.*

Химико-термическая обработка для получения карбида титана на поверхности стали ..... 17

*Власов И.И., Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Мазалова Т.А., Соловьева А.А.*

Особенности формирования структуры и физико-механических свойств энтропийного сплава на базе системы NiCoCr, полученного методами литья и аддитивных технологий ..... 18

*Галибин А.О., Храбров А.С.*

Установка для индукционной термообработки труб переменного сечения токами промышленной частоты ..... 19

*Глебова М.А., Марков М.А., Беляков А.Н., Чекуряев А.Г.*

Высокотемпературная керамика в конструкции элементов накаливания ..... 20

***Гришин И.А.***

Влияние химического состава и режимов термической обработки на механические свойства листового проката из судостроительных хладостойких марок сталей E40 и E500 ..... 21

***Дубов В.В., Коваль О.Ю., Белоусова В.Д., Сайфутяров Р.Р., Коржик М.В.***

Получение и исследование керамических сцинтилляционных материалов на основе многокомпонентных соединений структурного типа граната ..... 22

***Дульнев К.В., Севальнев Г.С., Обливанцев К.Д.***

Оптимизация термической обработки и исследование структуры и свойств холоднокатаных тонкостенных труб из высокопрочной азотсодержащей коррозионностойкой стали ..... 24

***Жужгина Т. А., Скутин В. С.***

Влияние режимов дуговой сварки и термообработки на структуру и свойства ЗТВ сварных соединений 9–12% хромистой мартенситной стали ..... 25

***Журавлева О.А., Власова А.Ю., Никулина Е.А., Гребенкина Н.А., Воейкова Т.А.***

Биоцидные металлсодержащие наночастицы и хелат меди для создания противообрастающих покрытий ..... 26

***Забавичев С.С.***

Разработка методики многоцикловых испытаний на машине резонансного типа и определение предела усталости для металла поковок из высокопрочной стали ..... 27

***Завьялова П.С., Отпущенников Л.А., Зеленина Е.В.***

Структура и люминесценция цирконий-оксидных люминофоров, синтезированных микроволновым способом ..... 28

***Калиенко М.С., Лаврова Т.А., Ледер М.О., Волков А.В., Плаксина Е.А., Михайлов В.А., Гребенчиков А.С.***

Низколегированные высокотехнологичные сплавы титана в сравнении с циркониевыми сплавами ..... 29

***Капинос В.В.***

Исследование причин снижения прочности холоднодеформированных особотонкостенных труб из титановых сплавов ПТ-1М и ВТ1-0 ..... 30

***Капитанова А.С.***

Влияние режимов термической обработки крупногабаритных полуфабрикатов из титанового псевдо- $\alpha$ -сплава на механические свойства и циклическую усталость ..... 31

***Карпенко К.К., Петров С.Н., Михайлов М.С.***

Анализ эволюции вторичных фаз стали 07X12НМФБ при длительном тепловом старении с применением машинного обучения..... 32

***Климов В.С., Севальнев Г.С.***

Структурные преобразования в коррозионностойкой жаропрочной стали мартенситного класса системы Fe-Cr-Ni-W и жаропрочного сплава системы Ni-Fe-Cr-Mo при ремонте ответственных изделий сложной формы, полученных методом прямого лазерного выращивания ..... 33

***Козюра Ю.А.***

Исследование влияния термомагнитной обработки на магнитные и резонансные характеристики аморфной ленты сплава АМАГ-254 ..... 34

***Колмогоров А.Ю., Торопыгина Е.В., Богданова П.А., Сорокин О.Ю.***

Предварительно напряженный керамический композиционный материал на основе карбида кремния..... 35

***Копылова А.Д., Дюскина Д.А., Николаев А.Н.***

Исследование структурных и трибологических характеристик материалов на основе карбида кремния..... 36

***Куклин И.Э., Барашев Н.Р., Хлебников Н.А., Капитанкин И.Н.***

Исследование коррозионной стойкости композитного покрытия Ni-SiC в расплаве FLiNaK..... 37

***Куртева К.Ю., Яковлева Е.А.***

Оценка состояния аустенита методами EBSD-анализа для выявления взаимосвязи структуры и свойств высокопрочной бейнитной стали ..... 38

***Лазаренко Н.К.***

Пути улучшения качества слитков из жаропрочного сплава ВЖ718..... 39

***Макаров И.Н.***

Исследование зависимости структуры и свойств деформированного порошкового сплава марки ПХ25Ю6 от размера атритированных порошков сплава ..... 40

***Мезенцев М.А., Мыктыбеков Б., Пальчиков Д.С., Синицын А.В., Демчишин А.В.***

Экспериментальные исследования и испытания на прочность конструкционных композиционных материалов и покрытий..... 41

***Михайлова Е.Э., Охапкин К.А., Кудрявцев А.С.***

Влияние технологии обработки аустенитной стали на процессы окисления в потоке свинцового теплоносителя..... 43

***Можайко А.А.***

Численное и экспериментальное исследование лазерной обработки алюминиевых и никелевых покрытий на стальной подложке ..... 44

***Нестерова Е.Д., Бобкова Т.И.***

Оценка механических свойств и износостойкости микроплазменных покрытий системы AlNiCoFeCr с добавками TiB<sub>2</sub> методом наноиндентирования ... 45

***Нечаев А.А., Старцев В.О., Павлов М.Р.***

Исследование старения стеклопластика ВПС-53/Т-25 при длительных климатических воздействиях ..... 46

***Новиков А.С., Севальнев Г.С., Крылов С.А., Дружнов М.А., Севальнева Т.Г.***

Исследование структуры и свойств образцов из углеродистой подшипниковой стали ШХ15, полученных методом селективного лазерного сплавления ..... 47

***Новоскольцев Н.С.***

Повышение однородности структуры и свойств толстолистового проката из хладостойких судостроительных сталей за счет управления процессами рекристаллизации в  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фазах ..... 48

***Обливанцев К.Д., Севальнев Г.С.***

Особенности формирования износостойкого покрытия из высокоазотистой стали ..... 49

***Орехов О.Д.***

Влияние способа изготовления штамповок из титанового сплава 5ВА на их структуру и свойства ..... 50

***Павлова М.В.***

Исследование процесса лазерной обработки керамических подложек с тонкопленочным покрытием ..... 51

***Панфилова А.П., Артамонов Е.А., Матвиенко Ж.В.***

Влияние низкомолекулярного каучука и инициатора отверждения на прочностные свойства сферопластика на основе наполненной терморективной смолы ..... 52

***Пастух Е.С., Севостьянов Н.В.***

Исследование триботехнических свойств металломатричных и керамических композиционных материалов ..... 54

***Полотнянников К.С., Светличный В.М., Ваганов Г.В., Попова Е.Н., Ивановка Е.М., Юдин В.Е.***

Пористые композиционные материалы на основе полиимидов ..... 55

**Поляков Д.Д.**

Применение гибридного метода на базе программы обработки изображений Fiji/ImageJ и сверточных нейросетей для автоматизации анализа дефектов микроструктуры ..... 56

**Пушница А.С., Венедиктова М.А., Котельникова Д.Д., Куршев Е.В., Лонский С.Л.**

Самоклеящийся огнезащитный материал для защиты потенциально пожароопасных зон авиационной техники ..... 57

**Румынский И.И.**

Особенности изготовления элементов корпусно-механических частей в подводных технических средствах из полимерных композиционных материалов ..... 58

**Севальнёв Г.С., Дульнев К.В., Севальнёва Т.Г.**

Структурно-фазовый состав и параметры диффузионных слоев в высокоазотистых конструкционных сталях после вакуумной цементации и термической обработки ..... 60

**Снятков И.В., Сняtkова А.В., Зеленина Е.В.**

Исследование взаимосвязи структурных и спектрально-яркостных характеристик радиоломинофоров на основе сульфида цинка ..... 61

**Степичев Е.С., Геращенко Д.А., Кузнецов П.А.**

Исследование структуры и трибологических характеристик металлокерамики на основе карбида титана для ножевого инструмента ..... 62

**Суворова Е.С., Гордеева Я.В., Эльдяева Г.Б., Ткачук А.И., Коваленко А.В.**

Исследование совместного влияния органического ингибитора коррозии и производных силана на свойства эпоксидных композиций и сферопластиков на их основе ..... 63

**Углуц Т.В., Мендагалиев Р.В., Климова-Корсмик О.Г.**

Влияние режима изготовления и термической обработки на структуру и свойства коррозионностойкой дуплексной стали 03X22H6M2, изготовленной методом ПЛВ ..... 65

**Фомин Г.Б., Морозовская И.А.**

Оптимизация технологии наплавки и разработка состава однородного антикоррозионного покрытия для оборудования судовых АЭУ ..... 66

**Харисова К.И., Кудрявцева А.Н., Загора А.Г., Долгова Е.В., Клименко О.Н., Гуняева А.Г.**

Особенности создания эпоксидного связующего для полимерных молние-защитных пленочных покрытий ..... 67

<b><i>Циренникова Е.И., Никулин В.Е., Алифиренко Е.А.</i></b>	
Исследование фазовых превращений в сварном соединении, полученном методом СТП, из высокопрочного термически упрочняемого сплава системы Al-Zn-Mg.....	68
<b><i>Черчиев Р.О., Лаврентьев А.А.</i></b>	
Анализ масштабного фактора при испытании на трещиностойкость методами численного моделирования.....	69
<b><i>Чечель Е.Г., Бараков Д.Р., Филин В.Ю.</i></b>	
К уточнению оценок сопротивления вязкому и хрупкому разрушению проката судостроительных и трубных сталей.....	70
<b><i>Чугунов Е.М.</i></b>	
Разработка технологии электронно-лучевой наплавки проволокой из титановых сплавов марок ТС6 и СПТ-2.....	71
<b><i>Шабунина С.С., Дмитриева А.В., Степанов Н.Д.</i></b>	
Структура и свойства никелевого жаропрочного сплава Наупес 230, полученного методом прямого лазерного выращивания.....	72
<b><i>Широкая Я.И., Титова А.Д., Гаранина И.М.</i></b>	
Исследование однородности распределения легирующих элементов в компактированном титановом псевдо- $\beta$ -сплаве.....	73
<b><i>Шнайдер С.Р.</i></b>	
Исследование причин нестабильности свойств мартенситностареющей стали.....	74
<b><i>Шошева А.Л., Ахмадиева К.Р., Долгова Е.В.</i></b>	
Разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области термостойких связующих и клеев для высокотемпературных ПКМ.....	75
<b><i>Щербак П.В., Трубин Д.А.</i></b>	
Эрозионностойкие керамические материалы на основе гексагонального нитрида бора для электроразрядных камер стационарных плазменных двигателей нового поколения.....	77

# МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПРОВЕДЕНИЮ ДЛИТЕЛЬНЫХ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ВЫДЕРЖЕК ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТЖИГА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОКОВОК

*Анисимов Д.М., д. т. н. Петров С.Н.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

При назначении режимов термической обработки крупногабаритных стальных деталей необходима информация о кинетике распада аустенита, которая может быть получена на основе количественного анализа фазового состава. Физическое моделирование медленного непрерывного охлаждения и изотермического отжига с фиксацией фазовых превращений по дилатации позволяет получить количественную оценку по кинетике распада аустенита.

С использованием дилатометров DIL 805 и «DIL 402 Expedis Supreme» проведена серия дилатометрических испытаний малых образцов стали Cr-Ni-Mo-V композиции по температурно-временным режимам, моделирующим процессы нагрева и охлаждения крупногабаритных заготовок. При исследовании микроструктуры установлено, что при выдержке в течение 30–50 часов в интервале температур 650–700 °С при протекании диффузионного превращения на модельных образцах малого размера происходит значительное обезуглероживание приповерхностного слоя (до 2 мм). Обеднение поверхности по углероду снижает устойчивость аустенита, при этом фазовое превращение начинается при более высокой температуре в области образования феррита, что существенно влияет на количественную оценку фазовых превращений, приводимому по дилатации. Для минимизации этого процесса, не позволяющего переносить результаты, полученные на малых образцах, на крупногабаритные стальные детали, проведен поиск барьерных покрытий, подавляющих диффузию углерода из приповерхностных слоев исследуемой стали в условиях длительного отжига. Опробованы защитные покрытия палладия, никеля, высокотемпературного лака и герметика, алюминия. Проведена оценка барьерного эффекта защитных покрытий по глубине обезуглероженного слоя и содержанию углерода, определяемого методом абсорбционной ИК-спектроскопии, как в приповерхностном слое, так и во всем объеме малого образца. Установлено, что покрытия из Ni, высокотемпературного лака и герметика не обеспечивают защиту от обезуглероживания. Покрытие из Pd, химически нанесенного на поверхность модельных образцов, снижает глубину обезуглероженного слоя с 2,0 мм. до 0,3–1,0 мм. Покрытие алюминия, нанесенного на поверхность образца методом газотранспортного иодидного переноса, толщиной около 100 мкм обеспечило наилучшую защиту поверхностного слоя от обезуглероживания. Данное покрытие позволило снизить глубину поверхностного обезуглероженного слоя с 2 мм до 0,1–0,15 мм, что не оказывает значимого влияния на дилатацию образца диаметром 9 мм и результаты количественной оценки фазовых превращений. Совместное использование предварительной аустенитизации заготовки до 1200 °С с последующей закалкой, вырезкой из заготовки образцов диаметром 9 мм и длиной 20 мм с нанесением алюминиевого покрытия обеспечит адекватную количественную оценку фазового превращения по дилатации при длительном изотермическом отжиге.

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ И МАТЕРИАЛА НА ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ЯЧЕИСТЫХ СТРУКТУР ТППМЭ

*Ахматнабиев М.Ф.<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. Дьяченко С.В.<sup>1</sup>, Маруева А.Д.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра – Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова*

*<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)*

Ячеистые структуры с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ) используются для поглощения различных видов энергии: механической, звуковой, тепловой, электромагнитной и пр. [1–2]. В данной работе проведено исследование вибропоглощающих свойств ячеистых структур с размером ячейки 5 и 10 мм. В качестве объектов исследования выбраны структуры с геометрией ТППМЭ («Гироид», «Примитив», «Алмаз»), изготовленные из термопластичного полиуретана (TPU) и полилактида (PLA) методом FDM печати.

Для определения вибропоглощающих свойств ячеистых структур в исследовании применялся метод Оберста.

Анализ экспериментальных данных показал, что влияние размера ячейки на приведённый коэффициент потерь  $\eta_{np}$  носит принципиально различный характер для материалов PLA и TPU.

Из полученных экспериментальных данных следует, что для образцов из TPU при увеличении  $\phi$ , вне зависимости от геометрии структуры, растёт и  $\eta_{np}$ , соответственно при уменьшении размера ячейки возрастают вибропоглощающие свойства образцов. Наибольшее вибропоглощение наблюдается в образцах с геометрией «Алмаз». Вероятно, полученные результаты связаны с увеличением фазы полимера, обладающего выраженными вязкоупругими свойствами. При этом, поглощение энергии происходит преимущественно за счёт внутреннего трения полимерных цепей.

Для PLA, напротив, характерно стеклообразное поведение с ограниченной способностью к вязкоупругому рассеянию энергии и основной вклад начинает вносить макроскопическая деформируемость всей конструкции.

Для образцов из PLA заметно, что при увеличении размера ячейки, вибропоглощение увеличивается. Это связано с тем, что увеличение размера ячейки приводит к снижению эффективной жёсткости ячеистой структуры и росту амплитуды её глобальных деформаций при вибрационном воздействии. Это способствует увеличению уровня внутренних напряжений и, как следствие, росту диссипации энергии на уровне всей системы, что выражается в увеличении  $\eta_{np}$ .

Получены зависимости коэффициента потерь от модуля упругости структур из разных материалов.

[1] Сысоев Е.И., Сычев М.М., Шафигуллин Л.Н., Дьяченко С.В. Акустический журнал. 2024. Т. 70, № 5. С. 765-777.

[2] Arsentev M.Yu., Sysoev E.I., Vorobyov S.A. [et al.]. Composite Structures. 2025. Vol. 363. P. 119097.

## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ

***Бараков Д.Р., Чечель Е.Г., д.т.н. Филин В.Ю.***

*НИИ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»  
г. Санкт-Петербург*

Холодное формообразование листовых деталей корпусных конструкций является неотъемлемым технологическим процессом в судостроении, что обуславливает необходимость оценки предельной деформационной способности сталей. Действующие нормативные положения ГОСТ Р 72479-2025 [1] регламентируют минимально допустимые радиусы гибки при одноосном нагружении, а также максимальную интенсивность пластических деформаций  $\epsilon_i$  на поверхности при сложном деформировании. Однако вопрос о соответствии этих требований реальному ресурсу металла остается недостаточно исследованным.

В работе исследуется низколегированная сталь E420 толщиной 12 мм. Сначала выполняли конечно-элементный анализ в ANSYS Mechanical APDL одноосной гибки на минимальный и предельный радиусы с определением интенсивности пластической деформации ( $\epsilon_i$ ). Расчетные значения  $\epsilon_i$  на растягиваемой поверхности составили 0,052 и 0,108, соответственно. Из этого исходит, что при допусках по таблице 16 [1] минимальном и предельном значениях  $\epsilon$ , 0,06 и 0,119 заложен запас около 10 % на соответствующий радиус гiba по таблице 15 [1].

Экспериментальная верификация оценки предельных деформаций материала проведена на дисковом образце диаметром 440 мм толщиной 11,8 мм. Максимально достигнутая деформация при прогибе образца на 120 мм составила 35 %.

Построена МКЭ-модель испытания. Достигнуто удовлетворительное совпадение радиальной и окружной компонент деформации при учете коэффициента трения, равного 0,25. Разрушение основного металла зафиксировано при  $\epsilon_i > 0,6$ , оно зародилось на исходном поверхностном дефекте, расположенном в зоне максимальных расчётных значений  $\epsilon_r$ , примерно в 25 мм от центра образца. Таким образом, запас деформационной способности основного металла значительно выше по сравнению с требованиями ГОСТ.

Ранее выполненный расчет операции гидроразжима показал, что  $\epsilon_i$  достигает 0,14. Установлено, что для основного металла такой уровень деформаций не критичен, однако для сварных соединений может оказаться опасным.

Выполнена экспериментальная оценка влияния скорости деформирования  $\dot{\epsilon}'$  на поведение судостроительных сталей разных категорий прочности при трёхточечном изгибе образцов DWTT. При статическом изгибе  $\dot{\epsilon}'$  имеет порядок 0,006 1/с, при ударном – 860 1/с. Получен пренебрежимо малый динамический эффект, что позволяет использовать результаты статических экспериментов при анализе сопротивления эксплуатационному нагружению.

Таким образом, существующие нормы обладают значительным консерватизмом в отношении основного металла – судостроительной стали. В развитие работы запланированы испытания дисков из стали трёх уровней прочности (основного металла и сварных соединений), а также исследование эволюции микроструктуры, твёрдости и механических свойств деформированного металла для построения уточнённых моделей вязкого разрушения, учитывающих образование первичных и вторичных пор и возможные процессы перекристаллизации.

[1] ГОСТ Р 72479-2025. Детали корпусов судов и других стальных сварных конструкций, 2025, 142 с.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ 45X25H35СБ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ И ОКИСЛЕНИЯ

*Беликова Ю.А., к. т. н. Цеменко А.В., д. т. н. Петров С.Н.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»  
г. Санкт-Петербург*

Современное развитие нефтехимической отрасли и процессов переработки углеводородов неразрывно связано с повышением рабочих температур в реакционных печах. Эта тенденция обусловлена необходимостью интенсификации процессов переработки сырья, увеличением скорости и наращиванием объемов целевого продукта. Однако ужесточение температурных режимов приводит к ускорению поверхностных диффузионных процессов, карбидообразованию и потере защитных оксидных слоёв. В связи с этим, актуальной задачей является разработка и оценка эффективности диффузионных барьерных покрытий для защиты от науглероживания и высокотемпературного окисления широко применяемого жаропрочного сплава 45X25H35СБ.

Исследовано две группы образцов из сплава 45X25H35СБ: без покрытия и с алюминиевым покрытием, нанесённым методом иодидного переноса (шихта: 2% Al+98% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+I<sub>2</sub>). Образцы подвергали цементации в атмосфере бутана и окислению в печи при температуре 1000 °С. Структуру поперечных шлифов изучали методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии.

Показано, что в процессе алитирования на поверхности сплава формируется сплошная диффузионная пленка на основе алюминидов никеля и железа суммарной толщиной порядка 10 мкм.

После высокотемпературного науглероживания в образцах без покрытия и с покрытием наблюдается зона активного формирования дисперсных карбидов хрома Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Установлено, что алюминиевое покрытие существенно снижает глубину проникновения углерода: в образце с покрытием зона карбидообразования почти в полтора раза меньше по сравнению с непокрытым. Выявлены закономерности морфологии карбидных частиц по глубине: вблизи поверхности преобладают скруглённые вытянутые формы, а с удалением от неё частицы приобретают выраженную огранку. В образце без покрытия переход к огранённым формам происходит глубже, чем в образце с покрытием, что свидетельствует о влиянии покрытия на кинетику роста и морфологию карбидов. Оценка профилей распределения легирующих элементов по глубине показала, что в образцах без покрытия твердый раствор в приповерхностных слоях значительно обеднён хромом в результате связывания его в карбиды (содержание падает до 5–7 мас. %). Алюминиевое покрытие замедляет этот процесс: содержание хрома вблизи поверхности остается примерно вдвое выше, при этом на небольшой глубине достигается исходный уровень легирования.

Высокотемпературное окисление в образцах без покрытия приводит к разлегированию приповерхностных слоев твердого раствора. Установлено снижение содержания хрома в матрице на глубину до 10–15 мкм, что обусловлено формированием оксидной пленки Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на поверхности образца. В образцах с алюминиевым покрытием областей обеднения по хромю не наблюдается, что подтверждает барьерную эффективность диффузионного алюминиевого слоя в условиях окислительной среды.

Таким образом, алюминиевое покрытие эффективно снижает глубину диффузии углерода при науглероживании, а также препятствует критическому обеднению аустенитного твердого раствора по хромю в процессе высокотемпературного окисления при температуре 1000 °С.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Богомолов П.И.*

*АО «ЦНИИМ», г. Санкт-Петербург*

Углеродные волокна в настоящий момент широко применяются в различных отраслях промышленности. В частности, углеродные волокна, имеющие низкий коэффициент теплопроводности могут применяться в теплозащитных покрытиях ворсовой структуры, используемых в поворотных узлах двигателей летательных аппаратов [1].

В связи с тем, что детальная информация о теплофизических характеристиках производимых в настоящее время углеродных волокон практически отсутствует, целью настоящей работы было экспериментальное определение их теплофизических характеристик, а также оценка теплопроводности ворсовых теплозащитных покрытий на их основе. В качестве объектов исследования были выбраны низкомолекулярные волокна на основе вискозы марки Урал и среднемолекулярные волокна на основе полиакрилонитрила марки УМТ. Для проведения теплофизических измерений изготавливались образцы из однонаправленных пучков волокон, не пропитанных связующим, что позволило провести измерения в температурном интервале от 25 до 500 °С. В работе проводились измерения коэффициента температуропроводности, удельной теплоемкости и истинной плотности, а коэффициент теплопроводности вычислялся по известному соотношению. Истинная плотность волокна определялась пикнометрическим методом. Измерения коэффициента температуропроводности и удельной теплоемкости определялись методом лазерной вспышки [2,3].

При проведении подготовки волокон было выявлено наличие адсорбированной влаги на поверхности волокон Урал Н-12 и Н-15, что, предположительно, связано с наличием открытых пор на их поверхности. С целью количественной оценки порового пространства волокон Урал Н-12 и Н-15 определялся удельный объем пор эксикаторным методом по адсорбции бензола [4]. Результаты измерения показали, что пористость волокон Урал Н-12 и Н-15 составляет 24,5 и 6,1 % соответственно. С учетом того, что поры размером менее 20 нм, являются структурной составляющей филамента, то для определения коэффициента теплопроводности использовались значения кажущейся плотности. Истинная плотность волокон марки Урал составила от 1,37 до 1,73 г/см<sup>3</sup>, а для волокон марки УМТ – 1,76 г/см<sup>3</sup>.

Значения удельной теплоемкости для всех волокон марки Урал оказались близкими во всем исследованном температурном диапазоне. Удельная теплоемкость углеродных волокон УМТ-40 и УМТ-42S оказалась одинаковой, и существенно более высокой по сравнению с волокнами на основе вискозы. При комнатной температуре значения удельной теплоемкости волокон Урал составили от 0,47 до 0,58 кДж/(кг·К), а для УМТ – 0,65 кДж/(кг·К).

Коэффициент теплопроводности волокон марки УМТ существенно выше, чем волокон марки Урал. Показано, что теплопроводность УВ на основе вискозы увеличивается с повышением конечной температуры термообработки. Для всех марок волокон в диапазоне температур от 25 до 300 °С наблюдается быстрый рост коэффициента теплопроводности с повышением температуры; при дальнейшем повышении температуры рост замедляется. При комнатной температуре значения коэффициента теплопроводности для волокон Урал составили от 1,2 до 4,2 Вт/(м·К), а для УМТ – 11,0 Вт/(м·К).

На основании полученных экспериментальных данных оценивалась эффективная теплопроводность ворсовых теплозащитных покрытий [5]. Показано, что все волокна обеспечивают низкий коэффициент теплопроводности ворсового покрытия. Однако волокна на основе вискозы имеют преимущество перед волокнами на основе полиакрилонитрила. При этом уменьшение теплового сопротивления ворсового теплозащитного покрытия может быть достигнуто за счет изменения угла наклона ворса относительно основы и увеличения его толщины.

1. Нилов А.С., Галинская О.О., Краснов В.И. Композиционные материалы: история, классификация, опыт применения: учебное пособие. Санкт-Петербург: издательство БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2023. 127 с.

2. ГОСТ 15139 — 69. Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы) (СТ СЭВ 891— 78). М.: Издательство стандартов. 1988.

3. Лощинин Ю.В., Фоломейкин Ю.И., Пахомкин С.И. Исследование теплоемкости металлических материалов с покрытием методом лазерной вспышки // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. №9. С. 40–44. URL: <https://www.zldm.ru/jour/article/view/129>

4. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия. 1984. 592 с.

5. Березко С.Н., Заричняк Ю.П., Корнев П.А., Соколов А.Н. Моделирование структуры и расчет теплопроводности ворсовых композиционных материалов // Инженерно-физический журнал. 1994. Том 67. № 3-4. С. 287-294.

## ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТРУБ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОКОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

*к.т.н., доцент Васильев В.В., Левагин Е.Ю., Храбров А.С.  
АО «Центральный научно-исследовательский институт материалов  
имени Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург.*

Условия эксплуатации газодинамических импульсных устройств (ГИУ) характеризуются рабочими циклами краткосрочных изменений давления и температуры величиной свыше 450 МПа и 1000 °С соответственно, что обуславливает высокие требования к механическим свойствам заготовок при их производстве. Технология их изготовления предусматривает проведение упрочняющей термообработки для формирования высоких механических свойств и характеристик согласно нормативной документации, а также необходимой структуры металла.

Эффективный выпуск трубных заготовок для ГИУ требует оптимального выбора способа термического упрочнения, оборудования для его реализации и подбор оптимального режима. В результате проведения операции, должны быть получены требуемые механические свойства, а также металл должен иметь изотропную структуру и симметричные напряжения относительно оси заготовки.

Применение индукционного нагрева для термической обработки металла наиболее оптимальный вариант решение этой задачи. Благодаря конструкции установки и принципа нагрева достигается наиболее рациональный расход электроэнергии при минимуме потерь тепла. Этот метод наиболее распространен для поверхностной обработки деталей машин на установках токов высокой частоты (ТВЧ). Однако при использовании токов промышленной частоты (ТПЧ) он может использоваться для объемной термообработки. Отличие использования определенной частотности обусловлено способностью проникновения тока в металлах.

Задача выполняемой работы состояла в подборе режима термической обработки – закалки и отпуска, на вводимой в эксплуатацию новой установке ТПЧ, при котором механические свойства трубных заготовок для ГИУ, в соответствии с требованиями нормативной документации, достигались при однократном выполнении операции закалки.

Выполненные испытания показали, что механические свойства заготовок полностью удовлетворяют требованиям нормативной документации.

# ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ БЕЙНИТНОЙ СТАЛИ К ДЕФОРМАЦИОННОМУ СТАРЕНИЮ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

*Васильев М.И., Куртева К.Ю., к. т. н. Яковлева Е.А.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

В процессе изготовления корпусных конструкций необходимыми операциями являются правка, гибка и сварка, поэтому изучение влияния деформационного старения на механические свойства стали до сих пор имеет первостепенное значение. Особый вклад в эту область внес академик И.В. Горынин. Его фундаментальные работы по изучению влияния больших степеней холодной деформации на структурные изменения в стали марок Ст3 и АК-25 заложили основу для современных методов анализа деформационного старения в судостроительных сталях [1].

В настоящей работе рассмотрены современные методы изучения деформационного старения, в том числе резонансным методом, проведена сравнительная оценка этих методов.

В качестве материала для исследований была выбрана низкоуглеродистая сталь с пределом текучести 460 МПа с ферритно-бейнитной структурой, изготовленная по технологии ТМО которая согласно [2] может проявлять склонность к деформационному старению. Старение проводили по ГОСТ 7268 с разными степенями деформации: 3, 5 и 7 %. После старения проводили испытания на ударный изгиб, растяжение, определяли динамический модуль упругости резонансным методом, и оценивали содержание углерода методом рентгеноспектрального анализа.

Показано, что исследуемая сталь проявляет незначительную склонность к деформационному старению, определяемую по изменению значений работы удара, однако, согласно диаграммам растяжения, старение с деформацией 5 % привело к увеличению временного сопротивления на ~13 %, а предела текучести на ~39 %, по сравнению с состоянием поставки и снижению относительного равномерного удлинения до 0 %, что свидетельствует об исчерпании способности к пластической деформации. Полученные данные свидетельствуют о необходимости исследования кинетики протекания процесса деформационного старения, что возможно с помощью резонансного метода.

При степени деформации 3 % изменение модуля Юнга ( $\delta_E$ ) составляет минус 0,095. При этом при дальнейшем увеличении степени деформации до 5 % и 7 % происходит увеличение величины  $\delta_E$  до минус 0,066 и минус 0,048 соответственно. Данный эффект объясняется закреплением дислокаций: формированием атмосфер Коттрелла, а затем мелких карбидов, что приводит к снижению содержания углерода в твердом растворе. Снижение содержания углерода в твердом растворе приводит и частично к увеличению модуля Юнга и, соответственно, резонансной частоты.

Проведенные исследования методом РСА подтверждают полученные данные.

1. Горынин И.В. «Исследование влияния наклепа и последующего отпуска на физико-механические свойства низкоуглеродистой стали». Диссертация, арх. ЦНИИ-48, инв. № 4726, 1956

2. Яковлева Е.А. Прогнозирование склонности к деформационному старению ферритно-перлитных, ферритно-бейнитных и бейнитно-мартенситных судостроительных сталей: дис. канд. техн. наук: 05.16.01 / Яковлева Екатерина Александровна. – Санкт-Петербург, 2021. – 226 с.

## ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА ТИТАНА НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ

*Васильев Н.В., Богданов С.П., Христюк Н.А.*

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет), г. Санкт-Петербург*

Ответственные детали изделий тяжелой промышленности должны выдерживать высокие нагрузки. Из этого вытекает необходимость обеспечения высокой твердости поверхности таких деталей. На примере химико-термической обработки стали 34ХН1МА в данной работе рассмотрены возможности легирования поверхности титаном, а также комбинированные методы насыщения стали углеродом, с последующим насыщением титаном. Работы по хромированию с использованием йодного транспорта [1] заложили основу для использования йода как альтернативу хлориду аммония для титанирования.

Экспериментальные исследования проводились с продолжительностью 1, 4 и 6 часов при температурах 800, 900 и 1000 °С, после чего измерялась твердость поверхности образцов, а также изменение их массы, отнесенное к единице площади. Фазовый состав поверхностного слоя анализировался методом рентгеновской дифракции.

Проведенные замеры массы показывают, что при данном виде насыщения поверхности титаном происходят два процесса [2], противонаправленные друг другу: осаждение титана на поверхность стальной пластины с образованием карбидов титана и угар металла с поверхности пластины. Анализ данных показывает преобладание процесса уноса при выдержке в 1 час, усиливающееся до 4 часов. При более длительной выдержке (6 часов) слой карбида титана предположительно начинает блокировать унос железа с поверхности, поэтому убыль массы сменяется на её прирост. Полученные значения твердости поверхности позволяют говорить о линейном увеличении твердости с ростом температуры. При 800 °С твердость составляет 6,7 ГПа, при 900 °С – 7,3 ГПа, а при 1000 °С – 9,5 ГПа, однако полученные значения твердости поверхности далеки от описанных в литературных источниках 30ГПа[3], следовательно в материале наблюдается недостаток углерода для образования достаточного количества карбида титана. Решить эту проблему предложено при помощи проведения цементации с последующим титанированием. В опытах, проведенных при 900 °С и 4 часах выдержки в печи, такой комбинированный подход позволил поднять значения поверхностной твердости до 18,9 ГПа при использовании хлорида аммония в качестве катализатора и 22,8 ГПа при использовании йода.

1. Богданов С.П. Использование йодного транспорта для диффузионного хромирования стали / С.П. Богданов, Н.А. Христюк // Сталь – 2017, № 1, С. 67-72.

2. Христюк Н.А. Эффект взаимного переноса железа и хрома при формировании покрытий йодным транспортом / Н.А. Христюк, С.П. Богданов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2019. № 1(763). С. 37-44.

3. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник / Г. В. Борисенко, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошнин и др. // Москва: Металлургия – 1981, С. 213–215

# ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА НА БАЗЕ СИСТЕМЫ NiCoCr, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДАМИ ЛИТЬЯ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*к.т.н. Власов И.И., к.т.н. Севальнев Г.С., к.т.н. Севальнева Т.Г.,  
Мазалова Т.А., Соловьева А.А.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва*

Большинство современных конструкционных сплавов базируются на основном матричном элементе, в который добавляются дополнительные легирующие элементы с разной степенью растворимости и механизмом взаимодействия с основным элементом, повышающие уровень физико-механических характеристик [1, 2]. Помимо легирования твёрдого раствора легирующие элементы способны образовывать избыточные фазы, такие как карбиды, нитриды, интерметаллиды и т.д.

Работа посвящена исследованию многокомпонентного высокоэнтропийного сплава (ВЭС) системы NiCoCrWNbAlTiCrRe, полученного методами вакуумной индукционной выплавки и селективного лазерного сплавления (СЛС), как перспективной альтернативы никелевым жаропрочным суперсплавам для деталей силовых установок ракетно-космической техники.

На основании термодинамических расчётов выбран состав с высокой энтропией смешения (18,3 Дж/(моль·К)). Исследованы структура и фазовый состав сплава в литом состоянии: установлено формирование твёрдого раствора на основе никеля с избыточными фазами (Nb,Ti)C и (Cr,W)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Определены параметры горячей пластической деформации и режимы термической обработки.

Показано, что термическая обработка по-разному влияет на свойства литых и синтезированных образцов: для литого состояния она повышает прочность, а для синтезированных – снижает, что связано с различиями в степени энтропии смешения и морфологии избыточных фаз. Выявлен механизм деформационного упрочнения: с увеличением скорости деформации  $\sigma_B$  возрастает с 640 до 690 МПа. Установлено, что термическая обработка для гомогенизации твёрдого раствора снижает интенсивность изнашивания на 74%.

Разработаны режимы газовой атомизации и СЛС, обеспечивающие пористость менее 0,01%. Синтезированные образцы в плоскости XY достигают  $\sigma_B = 1180$  МПа при  $\delta_5 = 33,5\%$  и демонстрируют наилучшую жаростойкость. Для каждого состояния определены параметры модели Джонсона-Кука.

Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering: A. 2004. Vol. 375–377. P. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.

Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // Entropy. 2014. Vol. 16. No. 9. P. 4749–4768.

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ТРУБ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ТОКАМИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

*Галибин А.О., Храбров А.С.*

*АО «Центральный научно-исследовательский институт материалов имени Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург*

Перспективным технологическим процессом упрочняющей термической обработки (далее – термообработки) толстостенных трубных заготовок переменного сечения длиной до 12000 мм с толщиной стенки до 90 мм (например, толстостенных бурильных труб), является обработка на установках индукционного нагрева токами промышленной частоты 50 Гц.

Преимущества этого метода, в сравнении с термообработкой при использовании шахтных печей, заключаются в следующем:

– исключается необходимость применения правки заготовок вследствие симметричности эпюры остаточных напряжений и их низкого уровня, что весьма желательно, сокращаются цикл и себестоимость обработки;

– бездеформационная термическая обработка, обеспечение высоких требований по прямолинейности оси трубы (в пределах 0–1,5 мм) позволяет сократить припуски на обработку, значительно сэкономить металл на исходной заготовке;

– сокращённый временной цикл обработки в целом.

Основная задача работы состояла в создании конструкции установки индукционного нагрева обеспечивающей режим термообработки (закалка и отпуск), в результате выполнения которого формировались механические свойства заготовки в соответствии с требованиями конструкторской документации.

В результате выполнения работы были решены задачи проектирования как отдельных узлов установки (станины, бабки передней и бабки задней, кареток закалки и отпуска и др.), так и систем автоматического управления, электроснабжения и водоподготовки, установки в целом.

Согласно разработанному проекту в сжатые сроки установка для индукционной термообработки была изготовлена и смонтирована, проведены приёмо-сдаточные испытания и отработана технология термообработки двух типов трубных заготовок.

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КЕРАМИКА В КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ НАКАЛИВАНИЯ

*Глебова М.А., д. т. н. Марков М.А., к. т. н. Беляков А.Н., Чекуряев А.Г.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Разработка отечественных свечей накаливания для малогабаритных турбореактивных двигателей (ТРД) является актуальной задачей в связи с необходимостью импортозамещения и повышения надёжности запуска двигателей в экстремальных условиях. Керамические свечи накаливания должны обеспечивать быстрый разогрев до 900 °С, выдерживать многократные циклы запуска и работать при напряжении 6–7 В с ограничением по току и мощности.

Цель работы – экспериментально проверить работоспособность керамической свечи накаливания, изготовленной по предлагаемой конструкции и технологии, применительно к условиям малогабаритного ТРД.

Элемент накаливания выполнен по схеме «токопроводящее тело – изолированный электрод – нагревательный наконечник». Наконечник имеет повышенное удельное сопротивление, что обеспечивает локальный нагрев. Изготовление свечей проведено методом горячего шликерного литья в разборные формы. Для наконечника использовали порошок SiC двух фракций с добавкой сажи; для тела – смесь SiC с TiB<sub>2</sub> (70/30 мас. %), для изоляции электрода – шликер на основе нитрида кремния. После удаления связки спекание проводили в вакууме при 1550 °С в течение 15 минут.

Изготовлены опытные образцы свечей накаливания. Испытания включали несколько циклов «нагрев до рабочего режима (60 с) – выключение» с контролем температуры тепловизором и пирометром. В результате установлено, что температура на концевике достигает 900 °С при напряжении 6–7 В, потребляемая мощность не превышает 60 Вт, пиковый ток – не более 20 А. Все циклы пройдены без снижения температуры и видимых разрушений. Таким образом, предложенная конструкция и технология горячего шликерного литья обеспечивают получение керамических свечей накаливания, полностью удовлетворяющих техническим требованиям к элементам накаливания малогабаритных турбореактивных двигателей.

[1] Материаловедение. Техническая керамика в машиностроении: учебник для вузов / А. П. Гаршин. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 296 с.

[2] Марков М. А., Беляков А. Н., Дюскина Д. А., Чекуряев А. Г., Бькова А. Д., Перевислов С. Н., Каштанов А. Д. «Способы формирования сложнопольных изделий из жаростойких керамических материалов на основе карбида кремния» //«Стекло и керамика». 2023. Т. 96, № 7. С. 17–24.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 21-73-30019-П).*

# ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ МАРОК СТАЛЕЙ E40 И E500

*Гришин И.А.*

*Филиал «АЭМ-технологии» «АЭМ-Спецсталь», г. Санкт-Петербург*

В условиях современной стратегии развития по освоению Арктического шельфа и Крайнего севера перед судостроительной отраслью стоят важные задачи, направленные на создание ледокольного флота и судов ледового класса (газовозов, танкеров), в связи с этим важно обладать статистикой и уже готовыми решения по оптимизации производственных процессов для изготовления материалов, в частности толстолистого проката из хладостойких марок сталей E40 и E500.

При производстве толстолистого проката толщиной 70 и 80 мм из марок сталей E40 и E500 специалисты завода «АЭМ-Спецсталь» компании «АЭМ-технологии» столкнулись с проблемой по нестабильности получаемых механических свойств.

В связи с этим было решено провести работу целью которой является проведение комплексной оценки результатов испытаний и исследований листового проката E40 и E500 в рамках собственного производства и разработка рекомендаций по химическому составу и режимам термической обработки изготавливаемого проката.

В рамках работы проводился анализ результатов механических испытаний, дилатометрических и металлографских исследований, проводилась оценка получаемых механических свойств и микроструктуры получаемых заготовок в зависимости от применяемого режима термической обработки.

В ходе работы установлены критические точки для сталей марок

E40 ( $A_{c1} = 712 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $A_{c3} = 834 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и E500 ( $A_{c1} = 704 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $A_{c3} = 839 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Определены оптимальные температуры для термической обработки E40 и E500. Установлено, что оптимальная микроструктура для получения заданных механических свойств ферритно-бейнитная для E40 и бейнитная с различной морфологией для E500. Определена зависимость углеродного эквивалента, на получение стабильных механических свойств для данных марок сталей.

По результатам работ сделаны выводы, что для получения стабильных механических свойств необходимо контролировать получаемый химический состав по причине установленных рамок по углеродному эквиваленту для данных марок сталей, а также учитывать скорость охлаждения и микроструктуру при разработке режима термической обработки.

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТРУКТУРНОГО ТИПА ГРАНАТА

к. х. н. Дубов В.В.<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. Коваль О.Ю.<sup>1</sup>, Белоусова В.Д.<sup>1,2</sup>,  
к. х. н. Сайфутяров Р.Р.<sup>1</sup>, д. ф.-м. н., профессор Коржик М.В.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

<sup>3</sup> Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, г. Минск, Белоруссия

Соединения структурного типа граната перспективны для применения в качестве сцинтилляторов благодаря высокому световому выходу (десятки тысяч фот./МэВ), быстрой кинетике высвечивания (десятки нс) и значительной плотности (свыше 6 г/см<sup>3</sup> для некоторых составов) [1]. Данные материалы могут быть изготовлены в форме прозрачной керамики, которая обладает рядом преимуществ перед монокристаллами: сниженной температурой получения, более простой механической обработкой. Переход от двойных систем (YAG, LuAG) к более сложным (GAGG, GYAGG и другим) – разупорядочение состава – позволяет улучшить сцинтилляционные свойства и даёт возможность гибко управлять ими [2, 3].

В данной работе получали и исследовали керамику состава  $(\text{Gd}, \text{Y}, \text{Lu})_3(\text{Al}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$  с различным соотношением компонентов, активированную ионами  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  (GYLAGG:Ce,Mg). Синтез оксидных порошков проводили методом совместного осаждения из азотнокислых раствором с последующей обработкой осадка при температурах более 800 °С. Порошки измельчали в планетарной мельнице, подвергали одноосному прессованию и спеканию в атмосфере кислорода при температурах свыше 1700 °С. Полученные прозрачные керамические образцы шлифовали и полировали, а затем исследовали их функциональные характеристики. Результаты оценки сцинтилляционных свойств показали, что частичное замещение Gd на Y и Lu в базовом составе  $\text{Gd}_3(\text{Al}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  позволяет увеличить световой выход сцинтилляций с ~30000 до ~40000 фот./МэВ. Со-активация ионами  $\text{Mg}^{2+}$  способствует ускорению кинетики с ~80 до ~55 нс за счёт сокращения медленных компонент.

Альтернативным направлением развития разупорядоченных систем выступает получение силикатных гранатов. Их преимуществом является невысокая температура плавления (менее 1600 °С), что важно для удешевления производства материала. В рамках данной работы получали соединения  $\text{Lu}_2\text{CaMg}_2(\text{SiO}_4)_3:\text{RE}$  с различными активаторами (RE = Ce, Tb, Pr). Синтез осуществляли модифицированным золь-гель методом: в золь  $\text{SiO}_2$  вносили необходимые количества порошков, содержащих Lu, Ca, Mg, и активатор в виде

раствора нитрата. Полученную смесь переводили в гель при нагревании, сушили до постоянной массы, подвергали обработке при температурах свыше 900 °С и измельчению в планетарной мельнице. В докладе будут представлены результаты первичных исследований полученных материалов: фазовый состав, микроструктура и люминесцентные свойства.

1. Gektin A., Korzhik M. Inorganic scintillators for detector systems / Springer, 2017. – P.20-77
2. Retivov V., Dubov V., Komendo I. et al. Compositionally Disordered Crystalline Compounds for Next Generation of Radiation Detectors // Nanomaterials. 2022. Vol. 12, № 23. P. 4295.
3. Chewpraditkul W. et al. Luminescence properties and scintillation response in Ce<sup>3+</sup>-doped Y<sub>2</sub>Gd<sub>1</sub>Al<sub>5</sub> xGa<sub>x</sub>O<sub>12</sub> (x = 2, 3, 4) single crystals // Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 116, № 8. P. 083505.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-73-30014, <https://rscf.ru/project/25-73-30014/>. Аналитические исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП «Исследовательский химико-аналитический центр НИЦ «Курчатовский институт».*

# ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ

*Дульнев К.В., к.т.н. Севальнев Г.С., Обливанцев К.Д.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва*

С развитием машиностроения и авиастроения повышаются требования, предъявляемые к изделиям авиационной техники. Это связано с увеличением эксплуатационных нагрузок на силовые конструкции летательных аппаратов и отдельные узлы и агрегаты. Создание новых высокопрочных материалов, повышающих долговечность и надежность машин, а также отработка технологий изготовления различных полуфабрикатов из них является одной из важнейших задач современного материаловедения.

С целью снижения массогабаритных характеристик в авиационной отрасли, ракетно-космической технике и машиностроении, наибольший интерес представляют холоднокатаные тонкостенные трубы, из высокопрочных мартенситных, мартенситно-аустенитных и мартенситностареющих коррозионностойких сталей, способных работать в агрессивных средах в тяжелонагруженном состоянии. Однако получение холоднодеформированных труб из высокопрочных сталей затруднено виду комплексного взаимодействия процессов деформационного упрочнения, формирования структурной неоднородности и ограниченной технологической пластичности материала в процессе обработки давлением.

Объектом исследования являются холоднокатаные тонкостенные бесшовные трубы из высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали мартенситного класса системы легирования Cr-Ni-Mn-Mo-V диаметрами 22,0 и 38,0 мм, с толщиной стенки 1,5 и 3,0 мм соответственно. Изготовление труб осуществляли на стане холодной прокатки.

С целью повышения пластичности, снижения прочностных характеристик и твердости для проведения холодной прокатки, проведены исследования микроструктуры, твердости и механических свойств тонкостенных труб в зависимости от температуры отпуска. По результатам исследования установлено, что минимальный предел текучести составляет ~ 990 МПа, а твердость по Виккерсу – 350 HV1.

Проведены исследования микроструктуры, твердости, механических, трибологических свойств и коррозионных свойств после упрочняющей термической обработки. Получены высокие показатели прочностных характеристик ( $\sigma_B > 1700$  МПа,  $\sigma_{0,2} > 1400$  МПа), а также коррозионные характеристики на уровне серийно используемой стали аустенитного класса.

# ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ 9–12% ХРОМИСТОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ

*Жужгина Т. А., к.т.н. Скутин В. С.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Проблематика сварки высокохромистых сталей мартенситного класса с 9–12 % Cr связана со склонностью к разупрочнению на участке зоны термического влияния (ЗТВ), нагреваемом до межкритического интервала температур, а также с образованием неблагоприятных структур в металле шва и на участке перегрева в ЗТВ, таких как хрупкие мартенситные составляющие и структурно свободный феррит. Перечисленные факторы могут приводить к образованию трещин в сварных соединениях и преждевременному выходу из эксплуатации оборудования высокотемпературных энергетических установок. Кроме того, необходимо учитывать проведение обязательной послесварочной термообработки с различиями в допускаемых диапазонах температур. Это может оказать критическое влияние на свойства сварного соединения стали с 9 % и 12 % Cr.

Таким образом, при разработке технологии сварки и термообработки необходимо оценивать совокупное влияние режимов сварки, температуры и длительности послесварочной термообработки на структуру и свойства сварных соединений 9–12 % хромистой мартенситной стали.

В данной работе проводится комплекс исследований, направленных на формирование оптимальной структуры металла шва и ЗТВ сварных соединений из мартенситной хромистой стали с 9 и 12 % Cr, выполняемых ручной дуговой сваркой покрытыми электродами. Рассматриваются сварные соединения, выполненные при варьировании различных технологических параметров сварки: температуры предварительного и сопутствующего подогрева в интервале от 20 °C до 500 °C; силы тока в интервале от 90 до 170 А, а также при использовании импульсного режима сварки. Указанные исследования проводятся как в исходном состоянии после сварки, так и в состоянии послесварочного отпуска.

По результатам выполненной оценки влияния температуры предварительного и сопутствующего подогрева установлено, что для получения оптимальной структуры и свойств ЗТВ необходимо предъявлять более жесткие требования к температуре подогрева. При использовании нижнего предела температур подогрева увеличивается количество и размеры неблагоприятной структуры крупнозернистого дельта-феррита в зоне перегрева.

При исследовании влияния величины сварочного тока на ЗТВ установлено, что уменьшение тока до 90 А при сварке электродом диаметром 3 мм не оказывает существенного влияния на процессы закалки в ЗТВ мартенситной стали. При использовании импульсного режима для электродов диаметром 4 мм при сварочном токе 130 и 150 А возможно снижение твердости на околошовном участке. Использование импульсного режима позволило уменьшить ширину зоны разупрочнения и переместить ее на расстоянии от 0,5 до 1,0 мм от линии сплавления.

Установлено, что допускается снижение температуры послесварочного отпуска с 760 до 740 °C мартенситной стали с 9 % Cr и увеличение длительности времени выдержки до 20 ч.

# БИОЦИДНЫЕ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИЕ НАНОЧАСТИЦЫ И ХЕЛАТ МЕДИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОТИВООБРАСТАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

*к. х. н. Журавлева О.А., Власова А.Ю., к. т. н. Никулина Е.А.,  
Гребенкина Н.А., к. б. н. Воейкова Т.А.  
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Разработка эффективных способов защиты промышленных конструкций от биообрастания, роста и накопления микробных загрязнений с минимизацией экологической нагрузки является актуальной задачей при создании противообрастающих полимерных покрытий. Перспективно создание полимерных нанокомпозитов (ПНК) с биоцидными компонентами, включающими наноматериалы с антимикробными свойствами и различные соединения меди. Для создания противообрастающих покрытий используют негидролизуемые и гидролизуемые полимерные материалы. Негидролизуемые покрытия отличаются высокой стойкостью к действию воды и обеспечивают долгосрочную защиту от коррозии, обладают химической и механической стойкостью. Гидролизуемые покрытия медленно гидролизуются, обновляя полимерные слои с постепенным высвобождением биоцидов и применяются как специальные противообрастающие материалы для судов и других подводных конструкций [1].

В работе представлены результаты получения ПНК на основе базовых мономеров акрилового ряда, негидролизуемых (БМК/НГ) и гидролизуемых (АММА/Г) полимеров, наполненных биоцидными компонентами – биогенными наночастицами <sup>1</sup>(НЧ) Ag, Ag-Se и хелатом Cu [2]. Биогенные НЧ получали микробным синтезом с последующей оценкой характеристик наноматериала. Получены различные виды препаративных форм наноматериала с длительным сроком хранения без потери антимикробных свойств при малых концентрациях наноматериала, что расширяет возможности его использования без значительного нарушения экосистем. Определены оптимальные концентрации полимеров и биоцидов в составе ПНК. Разработаны методы оценки уровня биоцидной активности исходных полимеров, индивидуальных НЧ и ПНК в различных средах, включая морскую воду. Для всех типов ПНК установлено повышение биоцидной активности в отношении ряда тест-культур микроорганизмов после внесения препаративных форм, содержащих НЧ Ag и Ag-Se, и хелат Cu.

Показана возможность использования биогенных НЧ Ag-Se для повышения биоцидной активности коммерческих лакокрасочных материалов (ЛКМ) – масляной и акриловой красок, яхтного и декоративного лаков, эмали и эпоксидного клея. Предложена методика введения сухих препаративных форм наноматериала в состав ЛКМ. Наибольший биоцидный эффект был отмечен для композитов на основе эмали, декоративного лака, акриловой краски и эпоксидного клея. Таким образом, использование биогенных НЧ как наполнителей ЛКМ представляет перспективный подход к созданию противообрастающих покрытий и может улучшить долговечность и эксплуатационные характеристики подводных конструкций и объектов промышленности.

1. Bansal H., Singh S. et al. Polymer nanocomposite films and coatings for antimicrobial and antifungal applications// Polymer nanocomposite films and coatings. – 2024. – P. 785–815
2. Zhuravliova O.A., Voeikova T.A. et al. Study of New Biocidal Complexes for Antifouling Marine Coatings // Nanobiotechnology Reports – 2024. – V. 19(3). – P. 358–365.

*Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».*

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МНОГОЦИКЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ НА МАШИНЕ РЕЗОНАНСНОГО ТИПА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА УСТАЛОСТИ ДЛЯ МЕТАЛЛА ПОКОВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ

*Забавичев С.С.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Многоцикловая усталость представляет собой процесс накопления повреждений в материале при многократном воздействии переменных напряжений, что ограничивает допустимые напряжения в элементах конструкции, например, в гребных и промежуточных судовых валах.

Для судов большого водоизмещения, таких как атомные ледоколы, материала для валопроводов являются высокопрочные стали марок 35ХН2МА, 38ХН3МФА категорий прочности свыше 600 МПа. Количество циклов нагрузки более 107, поэтому допускаемые напряжения должны быть ниже предела усталости, следовательно, его надо определить.

До настоящего времени НИЦ «Курчатовский Институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» не располагал испытательной базой для таких испытаний. Существующие методики испытаний на изгиб с вращением при количестве циклов более 106 имеют ряд недостатков:

- Реализуется только симметричный цикл нагружения;
- Отмечается масштабный эффект при изгибе.

Целью работы является определение предела усталости высокопрочной стали марки 38ХН3МФА.

Для достижения этой цели были выполнены следующие задачи:

1. Разработана методика многоцикловых испытаний, реализующих режим отнулевого растяжения. Спроектирована и изготовлена оснастка для испытаний на испытательной машине резонансного типа.

2. В качестве материала для исследования была выбрана высокопрочная сталь, используемая для изготовления крупногабаритного гребного вала. Для изготовления образцов использовалась проба, вырезанная из натурной поковки на заводе-изготовителе. Однако, вследствие ограниченного объема этого металла, использовался также имеющийся металл баллона высокого давления, изготовленного из той же стали, но имевший другой режим термической обработки. Поэтому часть образцов изготавливалась из этого металла без дополнительной термообработки, другая часть подвергалась дополнительной термической обработке по режиму, использованному для натурной поковки. На образцах с дополнительной термической обработки проведены испытания на растяжения для определения стандартных механических характеристик. Проведен металлографический анализ для обоих режимов термической обработки.

3. Осуществлен предварительный выбор режимов нагружения и проведены испытания образцов с концентратором, изготовленных из натурной заготовки гребного вала на циклической базе 106–107 циклов.

4. Проведены многоцикловые испытания из металла с дополнительной термической обработкой и без нее для определения пределов усталости на гладких образцах и образцах с концентраторами.

Результаты испытаний были сопоставлены с прогнозируемыми значениями пределов усталости гладких образцов и образцов с концентраторами, определенными по известным литературным данным. Экспериментально полученные оценки пределов усталости оказались выше, чем расчетные значения по формуле Гудмана, но ниже, чем расчетные значения по формуле Петерсона, как для гладких образцов, так и для образцов с концентраторами.

# СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЦИРКОНИЙ-ОКСИДНЫХ ЛЮМИНОФОРОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МИКРОВОЛНОВЫМ СПОСОБОМ

*Завьялова П.С., Отпущенников Л.А., к. т. н., доцент Зеленина Е.В.  
Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет), г. Санкт-Петербург*

Материал на основе диоксида циркония является перспективным для создания высокопрочных, термостойких люминофоров, применимых в области оптоэлектроники и фотоники [1]. Однако традиционный способ синтеза требует временных и энергетических затрат. Поэтому все чаще в качестве альтернативы рассматривается применение спекания микроволновым (СВЧ) излучением. Данный способ обеспечивает объемный нагрев материала, уменьшает время обработки и температуру синтеза, а также позволяет получать структуры с улучшенными целевыми характеристиками [2-3].

В данной работе рассматривается влияния методов синтеза и высокотемпературной обработки шихты на структуру и люминесцентные свойства циркониевой керамики. Объектом исследования являлись керамические материалы состава  $ZrO_2:Y^{3+}, Eu^{3+}$ . Были применены такие методы синтеза, как мокрое смешение с водой и изопропиловым спиртом и соосаждение с последующим спеканием в муфельной печи и СВЧ установках.

Исследовано влияние СВЧ поля на структуру и люминесцентные характеристики циркониевой керамики при различных способах подготовки материалов и использовании различных растворителей. На СЭМ-изображения видно, что наилучшая кристаллизация была достигнута при мокром смешении спиртом с отжигом в муфельной печи и СВЧ установке. При соосаждении в муфеле наблюдается высокая аморфность, очевидно, из-за малой температуры спекания.

При исследовании люминесцентных свойств обращает на себя внимание изменение соотношения интенсивностей полос люминесценции в спектрах возбуждения. Показано, что метод синтеза оказывает влияние на длину волны максимума возбуждения, вне зависимости от способа спекания. На полученных спектрах возбуждения видно изменения соотношения пиков возбуждения люминесценции. На спектре возбуждения при соосаждении максимум находится на 400 нм в то время, как на спектре возбуждения при мокром смешении – на 250 нм. Такое различие вероятнее всего говорит нам о различии атомного окружения катионов европия. Полученные данные расширяют понимание структуры и люминесцентных характеристик циркониевой керамики.

1. Liu D. Photoluminescence properties of  $Eu^{3+}$  doped  $ZrO_2$  with different morphologies and crystal structures / D. Liu, M. Wang, L. Gong, [et al.]. // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 864. – P. 158781.

2. Tamrakar R. K., Bisen D. P., Upadhyay K. Photoluminescence behavior of  $ZrO_2:Eu^{3+}$  with variable concentration of  $Eu^{3+}$  doped phosphor // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2015. Vol. 8. P. 11–16.

3. Lam T.K.G., Opalinska A., Chudoba T., Benkowski K., Lojkowski W., Tran K.A., Nguyenand T.B., Le Q.M. Preparation and characterization of  $ZrO_2:Er^{3+}, Yb^{3+}$  nanoparticles using a high pressure assisted soft template // Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology. 2010. V. 1. P. 025008–025013

## **НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ СПЛАВЫ ТИТАНА В СРАВНЕНИИ С ЦИРКОНИЕВЫМИ СПЛАВАМИ**

*Калиенко М.С., Лаврова Т.А., к. т. н. Ледер М.О., Волков А.В.,  
Плаксина Е.А., Михайлов В.А., Гребенщиков А.С.  
ПАО «Корпорация ВСМПО–АВИСМА», г. Верхняя Салда*

Низколегированные сплавы титана и циркония занимают разные технологические ниши в атомной энергетике. Циркониевые сплавы являются базовыми материалами для оболочек ТВЭЛов и ряда внутрикорпусных элементов благодаря малому сечению поглощения тепловых нейтронов, приемлемой коррозионной стойкости в воде и паре, высокой технологичности. Однако их оксидная пленка склонна к накоплению напряжений, растрескиванию и ускоренной деградации при аварийных температурах, особенно в паровоздушных средах.

Титановые сплавы, напротив, целесообразно рассматривать преимущественно для применения вне активной зоны и вне интенсивного нейтронного поля: в конденсаторных трубках, теплообменниках, трубопроводах морской и пресной воды, а также в элементах вторичного и вспомогательного контуров. Для таких условий главным преимуществом титана является высокая стойкость к коррозии в хлоридсодержащих средах, высокая герметичность трубных систем и снижение риска загрязнения парогенераторов хлоридами. Вместе с тем титановые трубки требуют контроля вибрации, износа, эрозии и гидридного охрупчивания.

В докладе рассмотрены механические свойства и сопротивление коррозии новых низколегированных высокотехнологичных сплавов титана марки VSTE разработки ПАО «Корпорации ВСМПО-АВИСМА». Сравнение кинетики окисления по представленным данным показывает, что при одинаковых температурах сплавы титана марки VSTE имеют существенно меньший привес и толщину оксида при окислении на воздухе, чем традиционные сплавы титана и циркония. Это указывает на более высокое сопротивление низкотемпературному газовому окислению и подтверждает перспективность титана для внезонных теплообменных узлов, где нейтронно-физические ограничения менее критичны, а коррозионная стойкость и надежность теплообменной поверхности являются определяющими.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ХОЛОДНО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ ОСОБОТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПТ-1М И ВТ1-0**

***Капинос В.В.***

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,*

*г. Санкт-Петербург*

Производство бесшовных холоднодеформированных особотонкостенных труб из титановых сплавов в полном сортаменте освоено исключительно за рубежом. При выполнении Государственного контракта НИР «Труба Ш» проведена работа по импортозамещению технологии производства на территории России высококачественных холоднодеформированных особотонкостенных труб, предназначенных для различных систем судового машиностроения и атомной энергетики.

В рамках работ на АО «ЧМЗ» по разрабатываемой технологии были изготовлены холоднодеформированные особотонкостенные трубы из титановых сплавов ПТ-1М и ВТ1-0. В связи с тем, что титановые сплавы ВТ1-0 и ПТ-1М близки по химическому составу, для оптимизации производства было решено объединить трубы из двух сплавов в одну садку при термической обработке (температура отжига 670 °С) с целью сокращения энерго- и трудозатрат.

Механические испытания образцов труб, проведенные в НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», показали неудовлетворительные результаты по прочности на образцах труб сплава ВТ1-0. Для установления причин снижения прочности проведены металлографические исследования и фрактографический анализ образцов труб. Методами оптической и растровой электронной микроскопии проведен анализ структуры и поверхности разрушения образцов, существенно отличающихся прочностью и пластичностью.

Благодаря проведенным исследованиям откорректированы режимы термических обработок для достижения требуемых технических характеристик бесшовных холоднодеформированных особотонкостенных труб из титановых сплавов ПТ-1М и ВТ1-0.

При изготовлении последующих партий труб, предприятием-изготовителем учтены рекомендации специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», которые позволили получить необходимый уровень прочности без потери пластичности.

# ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ТИТАНОВОГО ПСЕВДО- $\alpha$ -СПЛАВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЦИКЛИЧЕСКУЮ УСТАЛОСТЬ

*Капитанова А.С.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – «ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Одним из технологических факторов, оказывающих влияние на чувствительность к коррозионной среде титановых сплавов с высоким (более 5%) содержанием алюминия, является термическая обработка. Это связано с тем, что при определенных режимах термической обработки в сплаве с высоким содержанием алюминия может образовываться интерметаллидная  $\alpha_2$ -фаза ( $Ti_3Al$ ) или её предвыделения, что приводит к падению сопротивляемости циклической усталости и снижению вязкости разрушения в коррозионной среде. При изменении параметров термической обработки, таких как температуры нагрева, продолжительность выдержки и скорости охлаждения возможно избежать образование  $\alpha_2$ -фазы. Поэтому актуальной задачей является разработка персональных режимов термической обработки при производстве полуфабрикатов и сварных конструкций не приводящих к образованию охрупчивающей фазы.

Целью работы является оценка влияния некоторых параметров термической обработки штампованной заготовки толщиной более 150 мм, изготовленной из псевдо- $\alpha$  титанового сплава системы легирования Ti-6Al-1.5V-1.5Mo, на показатели механических свойств и изменение чувствительности металла к коррозионной среде.

В качестве материала для проведения исследований выступали опытные пробы, отобранные от крупногабаритной штампованной заготовки, что позволяло максимально точно имитировать термические процессы, которые впоследствии будут проводиться на натурном изделии. Термическая обработка опытных заготовок по экспериментальным и штатному режимам с варьированием скорости охлаждения и времени выдержки выполнялась в НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей». Далее из термически обработанных заготовок были изготовлены образцы для проведения испытаний на растяжение и ударный изгиб, а также малоцикловую усталость при «мягком» нагружении на воздухе и в морской воде.

По результатам выполненных исследований можно заключить, что все исследуемые режимы термической обработки практически не оказывают влияния на уровень механических свойств. По результатам испытаний на малоцикловую усталость отмечено, что штатный режим термической обработки для снятия остаточных напряжений после штамповки, применяемый для полуфабрикатов меньшей толщины, приводит к повышению коррозионной чувствительности. Для сохранения коррозионно-усталостной прочности на высоком уровне перспективными являются режимы термической обработки с ускоренным охлаждением.

## **АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ ВТОРИЧНЫХ ФАЗ СТАЛИ 07X12НМФБ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ТЕПЛОМ СТАРЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

***Карпенко К.К., д. т. н. Петров С.Н., Михайлов М.С.**  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»  
г. Санкт-Петербург*

Актуальность работы обусловлена необходимостью контроля свойств материалов в энергетике, где термическое старение приводит к выделению вторичных фаз, вызывающих охрупчивание.

Цель исследования заключается в проведении анализа фазового состава стали 07X12НМФБ в условиях термического старения при температурах 550 °С, 600 °С и 625 °С с временем выдержки 10000 ч. и 20000 ч. с использованием методов машинного обучения.

Задачи работы:

1. Получение экспериментальных данных по фазовому и элементному составу стали 07X12НМФБ после старения.
2. Анализ экспериментальных данных о фазовом и элементном составе исследуемых образцов с использованием методов машинного обучения.

Методика включала растровую электронную микроскопию (РЭМ) с использованием системы Oxford Instruments AZtec Feature, обеспечивающей сбор данных о морфологии и элементном составе частиц. Для обработки данных применен кластерный анализ на основе гауссовых смесей, позволяющий группировать частицы без предварительной классификации.

По результатам анализа экспериментальных данных в стали 07X12НМФБ в состоянии поставки были обнаружены нитриды алюминия, карбиды ниобия и карбиды ванадия. После старения при 550 °С выявлены также G-фаза и фаза Лавеса. При 600 °С карбиды ванадия переходят в Z-фазу, G-фаза не обнаружена. При 625 °С фазовый состав не меняется, но средний размер частиц увеличивается. С увеличением выдержки с 10000 ч. до 20000 ч. растет объемная доля фазы Лавеса, G-фазы и Z-фазы, а размеры частиц снижаются.

# СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА СИСТЕМЫ Fe-Cr-Ni-W И ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Ni-Fe-Cr-Mo ПРИ РЕМОНТЕ ОТВЕТСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

*Климов В.С., к. т. н. Севальнев Г.С.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва*

На сегодняшний день развитие направления обслуживания современных ГТД (разработка и применение ремонтных технологий) в газотурбостроении весьма актуально по причине постоянно возрастающих объемов их производства и развития, а также их интенсивным внедрением в современную промышленность.

Развитие современных аддитивных технологий, в том числе для ремонта ответственных деталей ГТД, таких как лазерная порошковая наплавка или прямое лазерное выращивание (ПЛВ), открывает новые возможности для восстановления и улучшения характеристик авиационных и судовых ГТД, что позволяет повысить эффективность и надежность двигателей, а также увеличить срок их эксплуатации [1, 2].

В качестве объекта исследования использовали коррозионностойкую жаропрочную сталь мартенситного класса системы Fe-Cr-Ni-W и жаропрочный сплав системы Ni-Fe-Cr-Mo. Металлопорошковые композиции различных фракций получали методом газовой атомизации с последующей аэродинамической сепарацией порошка.

Наплавку металлопорошковой композиции (МПК) стали и жаропрочного никелевого сплава проводили на кромку лопатки, наиболее подверженную износу, из стали и жаропрочного никелевого сплава соответственно, на отечественной промышленной установке прямого лазерного выращивания с коаксиальной подачей порошка. Наплавка представляет собой послойно синтезированный материал высотой 1,5 мм и шириной до 3,0 мм в самых широких местах лопатки и менее 1,0 мм на входной и выходной кромках лопатки.

В рамках исследований проведен металлографический анализ микроструктуры методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) и рентгено-компьютерная томография (РКТ) основного материала, зоны термического влияния лазера и основного материала лопатки, а так же проведены трибологические испытания методом сухого трения скольжения. Помимо этого проведены исследования изменения микроструктуры с целью оценки степени деградации отремонтированных термообработанных лопаток и лопаток без термической обработки после 10 часов работы в компрессоре высокого давления.

1. А.С. Ермолаев. Применение лазерных технологий для изготовления и ремонта деталей и узлов газотурбинных двигателей / А.С. Ермолаев, А.М. Иванов // Авиационные материалы и технологии – 2016 - №1(40) – с.37 – 42.

2. В.Г. Климов. Особенности восстановления геометрии пера лопатки газотурбинного двигателя методом лазерной порошковой наплавки / В.Г. Климов, С.С. Жаткин, Е.Ю. Щедрин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук - 2015. –г.17 №2(4) – с.782-787.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ НА МАГНИТНЫЕ И РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМОРФНОЙ ЛЕНТЫ СПЛАВА АМАГ-254

*Козюра Ю.А.*

*НИИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Ленты аморфных магнитомягких сплавов на основе никеля и железа обладают высокими магнитоstrictionными свойствами, и поэтому могут применяться в маркерах, размещающихся вблизи подземных коммуникаций для последующего их обнаружения, и антикражных датчиках, основанных на явлении магнитомеханического резонанса. На основании изученных литературных источников [1-3] установлено, что:

– для улучшения резонансных характеристик аморфных металлических лент на основе железо-никелевых сплавов, их могут подвергать термомеханической обработке и/или термомагнитной обработке в поперечном магнитном поле для увеличения объема поперечно направленных доменов [1, 2];

– объем поперечно направленных доменов можно косвенно определить по значению максимальной магнитной проницаемости, что существенно упрощает оценку качества термомагнитной обработки [3].

Цель данной работы заключалась в исследовании влияния режимов термомагнитной обработки лент сплава АМАГ-254 на их магнитные и резонансные характеристики.

Для выполнения обозначенной цели работы, использовали электрическую камерную печь и магнитную установку для проведения термомагнитной обработки лент. Для измерения магнитных характеристик, обработанных лент, использовали установку МК-3Э. Для измерения резонансных характеристик лент создана установка по измерению резонансных характеристик в магнитомеханическом маркере. Таким образом изучено влияние основных параметров термомагнитной обработки лент сплава АМАГ-254, а именно: температуры в диапазоне 100–300 °С, времени выдержки в диапазоне 5–30 минут, величины магнитного поля в диапазоне 15–100 мТл, на их магнитные и резонансные характеристики. В результате выполнения работ установлено, что:

– при увеличении температуры и времени выдержки термомагнитной обработки уменьшается значение максимальной магнитной проницаемости, растет резонансная частота лент;

– с увеличением магнитного поля термомагнитной обработки уменьшаются магнитная проницаемость и резонансная частота лент, повышается объем поперечно направленных доменов, что положительно сказывается на уровне их сигнала.

1. Livingston J.D. // Magnetomechanical properties of amorphous metals. 1982. Metallurgy Laboratory, General Electric Corporate Research and Development, Schenectady.

2. RuHua Zhang, NianSheng Yin, Gang Wang // Properties optimization analysis of amorphous gribbons in acoustic magnetic labels. 2022. Journal of Materials Science.

3. Скулкина Н.А. // Термическая обработка и магнитные свойства быстрозакалённых магнитомягких сплавов: Учебное пособие – Екатеринбург: Изд. Уральского университета, 2020.

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫЙ КЕРАМИЧЕСКИЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

*Колмогоров А.Ю., Торопыгина Е.В.,  
Богданова П.А., к. т. н. Сорокин О.Ю.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва*

Керамические композиционные материалы (ККМ) на основе карбида кремния находят широкое применение в различных областях техники благодаря своим физико-механическим свойствам: высокая твердость и модуль упругости, низкая плотность по сравнению с металлами, высокие жаростойкость и жаропрочность, химическая инертность к коррозионно-активным и абразивосодержащим средам и т.д.

ККМ на основе SiC применяются для изготовления деталей и сборочных единиц (ДСЕ) «горячей» части современных газотурбинных двигателей (ГТД) в авиационной промышленности, оболочек ТВЭЛов в атомной энергетике и т.д. Сдерживающим фактором применения карбидокремниевых материалов в условиях воздействия вибрационных и ударных нагрузок является присущая им хрупкость. Введение армирующего наполнителя в карбидокремниевую матрицу позволяет значительно повысить энергоемкость процесса разрушения ККМ, а также изменить характер разрушения с «хрупкого» на «квазипластичный».

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан состав и низкотемпературный способ получения деталей из ККМ на основе SiC методом «теплого» формования, позволяющий применять не только дорогостоящее и дефицитное SiC волокно, но и широкую гамму других волокнистых недефицитных армирующих наполнителей, производимых на территории РФ в промышленных масштабах. Отличительной особенностью технологии изготовления ККМ также является возможность целенаправленного формирования поля внутренних напряжений в объеме монолитных крупногабаритных деталей, что позволяет еще в большей степени увеличить энергоемкость процесса разрушения ККМ. Данное обстоятельство указывает на его концептуальную схожесть с предварительно-напряженным железобетоном.

Показано, что при испытании на 3-х точечный изгиб наблюдаются различные виды микроразрушений: огибание металлической проволоки трещиной, «ветвление» трещины, вытягивание проволоки из хрупкой матрицы, «шейкообразование» при пластической деформации и разрывах проволоки и далее полная остановка трещины.

Установлено, что армированный ККМ характеризуется следующим комплексом физико-механических характеристик: предел прочности при изгибе – 220–245 МПа, плотность –  $(3,1 \pm 0,1)$  г/см<sup>3</sup>, пористость – менее 1,0 %, микротвердость – более 19 ГПа.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

*Копылова А.Д., Дюскина Д.А., к. т. н. Николаев А.Н.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
Санкт-Петербург*

Современные узлы трения (подшипники, уплотнения) всё чаще работают без смазки, при высоких температурах и в агрессивных средах [1,2]. Традиционные металлы в таких условиях быстро изнашиваются. Перспективная альтернатива – керамические композиты на основе карбида кремния с алмазным армированием, сочетающие высокую твёрдость, химическую инертность и жаропрочность [3]. Цель работы – определение трибологических характеристик сверхтвёрдой композиционной керамики алмаз – карбид кремния, полученной реакционным спеканием, в парах сухого трения с конструкционными сплавами и керамикой.

Образцы изготавливали из смеси алмазных порошков АС160 (200–250 мкм) и АСМ 28/20 (20–28 мкм) в соотношении 60/40 с добавкой фенолформальдегидной смолы. Формование – холодное одноосное прессование при 100 МПа, полимеризация при 180 °С, реакционное спекание при 1550 °С в вакууме с пропиткой расплавленным кремнием. Трибологические испытания по схеме «кольцо–кольцо»: нагрузка 1 МПа, скорость 0,076 м/с, продолжительность 1 ч, воздушная среда без смазки. Контртела – сталь Ст20, алюминиевый сплав А5, титановый сплав ВТ6, реакционно-спекенный SiC и аналогичный композит.

Коэффициент трения пары алмаз – карбид кремния со сталью составил 0,65, с титановым сплавом – 0,46, с алюминиевым – 0,43. Массовый износ металлических контртел: 0,289 г/ч (сталь), 0,254 г/ч (титан), 0,670 г/ч (алюминий). На поверхности трения наблюдаются задиры и царапины, образуется абразивный намол частиц. В паре с реакционно-спекенным карбидом кремния коэффициент трения максимален ( $\mu = 0,81$ ) при минимальном износе контртела – фактически происходит его шлифование. Наилучшие антифрикционные свойства ( $\mu = 0,05$ ) зафиксированы для пары трения аналогичных материалов алмаз – карбид кремния при практически нулевом взаимном массовом износе. Высокая твердость композита алмаз – карбид кремния обеспечивает его износостойкость, но в паре с металлами он проявляет абразивное действие. Для эффективной работы без смазки оптимально использование пар трения из одинаковой алмазной керамики, где реализуется межплоскостное контактное взаимодействие по граням крупных алмазных частиц и образование твердой углеродной смазки.

1. Алисин, В. В. Циркониевые керамические материалы триботехнического назначения / В. В. Алисин // Развитие науки и образования: монография. Том Выпуск 4. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2019. – С. 5-16
2. Новые материалы / Под ред. Ю.С. Карабасова. – М.: Мисис, 2002. – 736 с.
3. Шевченко В. Я. Микроструктура и свойства композиционных материалов алмаз – карбид кремния / Шевченко В. Я., Перевислов С. Н. // Новые огнеупоры, - 2021. - № 9. С. 48-54

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 21-73-30019-П)*

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОМПОЗИТНОГО ПОКРЫТИЯ NI-SiC В РАСПЛАВЕ FLiNAK

*Куклин И.Э., Барашев Н.Р., к. х. н., доцент Хлебников Н.А.,  
Капитанкин И.Н.*

*Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург*

В 2000 году был утверждён перечень реакторных технологий IV поколения, куда в том числе вошли жидкосолевые реакторы (ЖСР). Отсутствие высокого давления в активной зоне исключает масштабные аварии с разрывом корпуса, а естественная физика расплава солей позволяет реактору саморегулироваться и не перегреваться. В современных концепциях ЖСР в качестве рабочей среды рассматривают хлоридные и фторидные расплавленные соли, при этом в большинстве версий в качестве несущей соли выбрана система LiF–BeF<sub>2</sub> (FLiBe) [1]. В настоящее время большинство исследований направлено на изучение солевой системы FLiNaK: она менее токсична, чем FLiBe, а также характеризуется более высокой растворимостью актинидов, что повышает производительность реактора и снижает интегральную загрузку плутония [2]. Однако, высокая коррозионная активность FLiNaK создаёт существенные проблемы для ее активного использования в ЖСР. Оптимальным вариантом решения данной проблемы является нанесение коррозионностойких защитных покрытий. Подобный метод позволяет одновременно сохранить механические свойства конструкционного материала и повысить его коррозионную стойкость.

В данной работе представлены результаты коррозионного испытания покрытия на основе плакированного никелем карбида кремния, нанесенного методом высокоскоростного газопламенного напыления.

В качестве порошкового материала использовали плакированный никелем (54 масс. %) карбид кремния со средним размером частиц порядка  $D_{50} = 35$  мкм. Покрытие наносили на образцы из стали 12X18H10T размером 18×10×10 мм методом высокоскоростного газопламенного напылением с использованием пистолета PD-1000. В качестве горючего газа применяли пропан (чистота 96%) и в качестве газа-окислителя кислород (чистоты 99,95%). Для ускорения частиц до сверхзвуковой скорости в горелку подавали сжатый воздух.

Предварительный анализ микроструктурных и фазовых данных показал: покрытие формируется сплошным и сравнительно плотным; адгезия покрытия к подложке удовлетворительная ( $\geq 50$  Мпа); толщина покрытия находится в требуемом диапазоне (около 70–80 мкм); небольшая доля оксидной фазы (<2 %) не является критичной, но должна учитываться при дальнейшем планировании экспериментов.

Коррозионные испытания покрытия проводили путем помещения образца в тигель с солевой смесью представляющую собой безводные фториды лития, натрия и калия (чистота не менее 99 масс. %, Aldrich, ACS), а затем тигель помещали в реторту и выдерживали 100 часов при температуре 650 °С.

По результатам коррозионных испытаний установлено, что покрытие системы Ni-SiC сохраняет целостность и не демонстрирует признаков разрушения. Скорость коррозии составила менее 30 мкм в год, что является удовлетворительным результатом.

1. Chan H.L., Romanovskaia E., Qiu J., и др. Insights on the corrosion thermodynamics of chromium in molten LiF-NaF-KF eutectic salts // npj Mater Degrad, 2022, Vol. 6, Article 46. <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00251-3>

2. Noori-kalkhoran O., Litskevich D., et al. On the Employment of a Chloride or Fluoride Salt Fuel System in Advanced Molten Salt Reactors, Part I: Thermophysical Properties and Core Criticality // Energies, 2022, 15, 8865. <https://doi.org/10.3390/en15238865>

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 25-23-00715).*

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АУСТЕНИТА МЕТОДАМИ EBSD-АНАЛИЗА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНОЙ БЕЙНИТНОЙ СТАЛИ

*Куртёва К.Ю., к. т. н. Яковлева Е.А.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»  
Санкт-Петербург*

В 50-е годы прошлого столетия под руководством И.В. Горынина был успешно реализован проект Правительства страны по разработке новой корпусной стали для сварных конструкций глубоководной техники. За короткие сроки был разработан химический состав хромоникельмолибденовой низкоуглеродистой стали, что позволило совместить в одном материале противоречивые друг другу свойства – высокую прочность и хорошую свариваемость без подогрева. Впоследствии были созданы отечественные материалы нового класса – высокопрочные корпусные стали, в том числе серия сталей АБ для атомных ледоколов, ледостойких платформ и других проектов для арктического шельфа. Именно изучение связей структуры после закалки и отпуска стали с механическими свойствами при различных вариантах легирования являлось основным инструментом для выбора химического состава. Тем не менее, практика производства свидетельствует о том, что существующих знаний в области формирования структуры и механических свойств высокопрочной судостроительной стали недостаточно, и возможность управления структурой за счет варьирования технологических параметров далеко не исчерпаны, поскольку частым случаем является несоответствие механических свойств и характеристик работоспособности стали нормативным требованиям.

Целью работы является установление закономерностей формирования структуры хромоникельмолибденовой низкоуглеродистой стали в зависимости от состояния аустенита перед фазовым превращением на основе комплексных экспериментальных исследований.

На основе данных EBSD-анализа установлено, что независимо от режимов производства аустенит перед превращением находится в деформированном (наклепанном) состоянии, что оценивали по текстуре стали. Степень наклепа аустенита оказывает влияние на морфологию бейнита в превращенной структуре.

С помощью спектров сопряжений ориентационных соотношений в совокупности со структурой определена морфология бейнита, формирующегося в зависимости от степени наклепа аустенита перед превращением, а также по толщине листовых прокатов с различной температурой вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$ .

Установлено, что увеличение наклепа аустенита приводит к увеличению доли бейнита гранулярной морфологии, что снижает прочностные свойства листового проката. Тогда как на значения температуры  $T_{кб}$  оказывает влияние морфология бейнита и однородность структуры по толщине проката: на поверхности проката с более высокой температурой  $T_{кб}$  формируется бейнит реечной морфологии, а в середине по толщине – преимущественно гранулярной. Снижение температуры вязко-хрупкого перехода обусловлено формированием бейнита реечной морфологии по всей толщине проката.

По результатам исследований были даны рекомендации по корректировке режимов производства листового проката из высокопрочной бейнитно-мартенситной стали на металлургических предприятиях.

## ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЛИТКОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖ718

*Лазаренко Н.К.*

*АО «СМК» г.Ступино Московская обл., аспирант ДонНТУ, г. Донецк*

В настоящей работе рассмотрены приемы повышения качества кованных прутков из жаропрочного железоникелевого сплава марки ВЖ718. Данный сплав используется в качестве материала для лопаток ответственных деталей в газотурбинном двигателе ПД-8. В настоящее время проводятся работы по созданию российского самолета SJ-100, оснащенного данным двигателем, поэтому актуальность работы высока.

Сплав отличается высокими значениями длительной, кратковременной прочности и пластичности в широком диапазоне температур от 20 до 650 °С. В состав сплава входят алюминий и титан, что способствует образованию упрочняющей интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы, а также ниобий, который образует стабильную  $\delta$ -фазу и нестабильную  $\gamma''$ -фазу ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ). Помимо указанных элементов, в составе также имеются молибден, вольфрам, углерод и хром. Сплав производят триплекс процессом (выплавка электрода на вакуумной индукционной печи ВИП, переплав полученного электрода на электрошлаковой печи ЭШП, и заключительный переплав слитка на вакуумной дуговой печи ВДП) с последующей ковкой слитка в пруток диаметром 220 мм.

Основной проблемой при производстве прутков из данного сплава является дефект «белое пятно», образующийся при ВДП и обнаруживаемый в прутках методом ультразвукового контроля (УЗК). При пластической деформации, зона вокруг «белого пятна» расслаивается, образуя пустоты, трещины и прочие дефекты структуры. ЭШП и ВДП слитков сопровождаются отклонениями по основным параметрам (массовая скорость, сопротивление, ток, капельные замыкания).

Для снижения вероятности получения дефектов были приняты корректирующие действия: проведена опытная работа по ковке расходуемого электрода ВИП с последующим ЭШП и ВДП; снижены скорости переплава ЭШП (на 10% от стандартной) и ВДП (на 9% от стандартной). Эти решения были направлены на увеличение плотности расходуемого электрода (снижение вторичных усадочных раковин для стабилизации режимов ЭШП и ВДП) и снижение ликвации за счет снижения глубины жидкой ванны.

После проведения переплава по новой технологической схеме были получены стабильные графики переплавов на ЭШП и ВДП, при этом среднее количество индикаций при УЗК снизилось с 8,10 единиц на пруток до 5,22 единиц на пруток. Дальнейшие исследования будут направлены на поиск дополнительных факторов влияния и оптимизации технологии с целью полного избавления от дефектов.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ДЕФОРМИРОВАННОГО ПОРОШКОВОГО СПЛАВА МАРКИ ПХ25Ю6 ОТ РАЗМЕРА АТТРИТИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ СПЛАВА

*Макаров И.Н.*

*ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина», г. Москва*

Порошковые сплавы системы Fe-Cr-Al являются перспективными конструкционными жаростойкими материалами, которые находят применение в различных отраслях техники для работы в окислительных средах при повышенных температурах. Интерес к ним возрос последние два десятилетия, в том числе они были предложены для использования в атомной энергетике в рамках программы толерантного топлива, как альтернатива аустенитным жаростойким сталям в ряде узлов. Содержание алюминия более трёх процентов активизирует образование самозалечивающейся оксидной плёнки  $Al_2O_3$ . Оксид обеспечивает высокую жаростойкость материала в окислительной среде в интервале от 800 °С вплоть до температуры плавления без необходимости нанесения защитных покрытий. Конструкционная прочность порошкового материала сохраняется при температурах выше 1000 °С. Известно, что ферритные (ОЦК) сплавы железа имеют большую стойкость к радиационному распуханию, чем аустенитные (ГЦК), на стойкость к распуханию также благоприятно сказывается легирование хромом, что позволяет рассматривать сплав как радиационно-стойкий.

Целью данной работы являлась оценка влияния размера порошка после атритирования на структуру и механические свойства получаемого деформированного полуфабриката состава (масс.%) Fe-21%Cr-6%Al. Исходный порошок сплава получали методом гидридно-кальциевого восстановления с последующей обработкой в атриторе. Для проведения сравнительного анализа структуры и свойств экструдированные полуфабрикаты в виде прутков  $\varnothing 30$  мм изготавливали из порошковых смесей фракционного состава 10–63 мкм, 63–100 мкм и 100–400 мкм. В атритированных порошковых смесях различного фракционного состава методами рентгеновской дифрактометрии определяли значения микронапряжений кристаллической решётки порошков. Полученные значения микронапряжений для порошков разного размера практически не отличаются. Деформированные полуфабрикаты имеют практически одинаковую микроструктуру, представляющую собой сильно вытянутые в направлении деформации зёрна феррита микронной толщины с признаками рекристаллизации. В структуре присутствуют редкие крупные частично рекристаллизованные зёрна протяжённостью в сотни микрон, которых больше всего в структуре прутков изготовленных их порошков фракции 100–400 мкм. Механические свойства полуфабрикатов из различных порошков при комнатной температуре находятся на одном уровне; предел прочности составляет 910, 901 и 885 Н/мм<sup>2</sup> соответственно для мелкой, средней и крупной фракции, предел текучести 717, 719 и 718 Н/мм<sup>2</sup>, относительное удлинение 18,5, 18,5 и 20,5 %. При 1000 °С предел прочности составляет 56, 51 и 48 Н/мм<sup>2</sup>, предел текучести 50, 45 и 39 Н/мм<sup>2</sup>, относительное удлинение 26, 27 и 30 % соответственно.

Таким образом, в работе показано, что порошки различной фракции при длительной высокоэнергетической обработке в атриторе практически не различаются по степени накопленной деформации. Полученные из них полуфабрикаты после экструзии имеют практически одинаковую микроструктуру, а их свойства находятся на одном уровне. Небольшие различия в свойствах и присутствие крупных зёрен в структуре связаны с наличием слабдеформированного порошка из застойных зон атритора.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

*Мезенцев М.А., к. т. н. Мыктыбеков Б., Пальчиков Д.С.,*

*Синицын А.В., Демчишин А.В.*

*ГНЦ ФАУ «Центральный институт авиационного  
моторостроения им. П.И. Баранова», г. Москва,*

Для перспективных деталей и узлов горячего тракта газогенератора авиационного двигателя предъявляются высокие требования к конструкции и характеристикам материалов, которые должны обеспечивать следующие параметры: рабочая температура до 1500 °С, стойкость к высоким перепадам температур, возникающим при нагреве и охлаждении двигателя, статическая кратковременная прочность 250–300 МПа при температуре более 1000 °С, высокий коэффициент теплопроводности, высокие характеристики ударной вязкости и большое сопротивление развитию трещин. Конструкция должна компенсировать различные температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) в местах крепления узлов с ответными металлическими деталями.

Для определения некоторого перечня приведенных выше характеристик перспективных конструкционных материалов и конструкций авиационного двигателя требуется проведения большого объема экспериментальных исследований. При этом требуется постоянное развитие различных видов экспериментальных исследований, средств измерений, обеспечивающих и удовлетворяющих требования квалификационным испытаниям материалов и деталей.

Понимание механического поведения композиционных материалов (КМ) при нагружении, знание характеристик физических свойств конструкционных материалов, таких как модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона, является основой для применения их в качестве конструкционных материалов. Хотя композиционные материалы анизотропны по своей природе, во многих случаях их свойства предполагаются однородными с точки зрения макромеханики и в расчет принимаются усредненные механические свойства, что приводит к их неэффективному применению. В случае рассмотрения трансверсально-изотропной структуры КМ (направления в плоскости изотропии, и нормальное направление к плоскости изотропии или трансверсальное направление) описание линейной связи между напряжениями и деформациями трансверсально-изотропного композиционного материала при плоском напряженном состоянии необходимо иметь шесть упругих постоянных. Наиболее трудно реализуемым и практически невыполнимым, является определение упругих и прочностных свойств КМ в направлении толщины КМ (трансверсальное направление). Для определе-

ния упругих и прочностных характеристик в этом направлении невозможно изготовить длинные стандартные образцы, в связи с чем необходимо другое исполнение образцов.

Разработанный образец (патент № 2798326, РФ, 2023 г.) из слоистых композиционных материалов для испытаний на растяжение в направлении толщины представляет собой пластину, включающую захватные части и расположенную между ними рабочую часть. С помощью данного образца могут быть определены упругие и прочностные характеристики слоистого композиционного материала, в том числе при повышенной температуре.

Разработан метод определения предела прочности при растяжении керамических и композиционных материалов, в котором нагрев образца до заданной температуры с определенной скоростью выполняется при помощи инфракрасных нагревательных элементов (патент № 2794108, РФ, 2023 г.).

В результате работы:

– разработан образец из слоистых композиционных материалов для испытаний на растяжение в направлении толщины и выпущен патент № 2798326, РФ, 2023 г.;

– разработан метод определения предела прочности при растяжении керамических и композиционных материалов и выпущен патент № 2794108, РФ, 2023 г.

1. Мыктыбеков Б., Луппов А.А., Мезенцев М.А., Пальчиков Д.С., Афанасьев Д.В. Патент № 2798326, РФ. Образец из слоистых композиционных материалов для испытаний на растяжение в направлении толщины образца, заявитель ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» 20.12.2022.

2. Мыктыбеков Б., Луппов А.А., Мезенцев М.А., Пальчиков Д.С. Патент № 2794108, РФ. Способ определения предела прочности при растяжении керамических и композиционных материалов, заявитель ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» 07.10.2022.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ НА ПРОЦЕССЫ ОКИСЛЕНИЯ В ПОТОКЕ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

***Михайлова Е.Э., к. т. н. Охапкин К.А., д. т. н. Кудрявцев А.С.**  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Актуальность исследования связана с разработкой перспективных реакторных установок (РУ) со свинцовым теплоносителем. При изготовлении парогенераторов теплообменные трубы из стали марки 03X18H13C2AM2BФР (ЭП302М-Ш) подвергают холодной деформации, а элементы РУ из стали марки 10X15H11C3Б-Ш (ЭП302-Ш) – сварке и механической обработке. Указанные выше технологии обработки изменяют структуру поверхностных слоев аустенитной стали, что может оказывать влияние на процессы окисления в свинцовом теплоносителе.

Целью настоящей работы является оценка влияния технологии обработки аустенитной стали на процессы окисления в потоке свинцового теплоносителя.

Коррозионная стойкость конструкционных материалов при взаимодействии со свинцовым теплоносителем определяется утонением элемента конструкции вследствие окисления. Поскольку измерение исходной толщины на образцах в виде гибов и сварных соединений невозможно, глубина окисления оценивалась по толщине внутреннего слоя оксидной пленки. Эта методика измерений была верифицирована при помощи статистической обработки, которая подтвердила удовлетворительную точность определения средних значений утонения по толщине внутреннего слоя оксидной пленки.

Влияние механической обработки на глубину окисления исследовано на образцах из стали марки ЭП302-Ш с различной шероховатостью поверхности ( $Ra$  от 0,73 до 3,16 мкм). После выдержки в потоке свинцового теплоносителя при температуре 550 °С продолжительностью до 28504 ч показано, что с увеличением шероховатости глубина окисления уменьшается.

Исследование особенностей процессов окисления металла шва и зоны термического влияния проведено на образцах сварного соединения стали марки ЭП302-Ш после выдержки в потоке свинцового теплоносителя при температуре 550 °С продолжительностью до 28504 ч. Установлено, что глубина окисления зоны термического влияния и металла шва не превышает глубину окисления основного металла.

Процессы окисления в зонах растягивающих и сжимающих напряжений изогнутой трубы из стали марки ЭП302М-Ш в сравнении с прямолинейным участком исследовались после выдержки в потоке свинцового теплоносителя при температуре 550 °С продолжительностью 19757 ч. Глубина окисления на прямолинейном участке в среднем выше, чем в зонах растягивающих и сжимающих напряжений. При этом статистический анализ показал, что выборки значений глубины окисления не принадлежат одной генеральной совокупности.

Таким образом, интенсивность процессов окисления поверхностных слоев аустенитной стали не возрастает (по сравнению с исходным состоянием) вследствие влияния холодной деформации, механической обработки и сварки в рамках исследованных диапазонов характеристик.)

# ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ И НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКЕ

*Можайко А.А.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,*

*г. Санкт-Петербург, Россия*

Среди различных методов модификации поверхности значительный интерес вызывает лазерная обработка поверхности [1]. Лазерная обработка поверхности улучшает механические и химические свойства материала, такие как адгезия, микротвердость и коррозионная стойкость за счет микроструктурных изменений в зоне воздействия лазера.

Для прогнозирования процесса лазерной обработки можно использовать численное моделирование. Численные модели, особенно если они подтверждены экспериментальными измерениями, могут использоваться как простой и дешевый способ прогнозирования микроструктуры, химических и механических свойств [2].

В работе проведено экспериментальное и численное исследование процессов лазерной обработки предварительно нанесённых методом холодного газодинамического напыления покрытий из алюминия и никеля на стальных подложках. Актуальность работы обусловлена необходимостью получения на поверхности конструкционных материалов тонких легированных слоёв с управляемым химическим составом и глубиной проплавления. Основной целью исследования является выявление зависимости глубины ванны расплава (толщины слоя, в котором происходит перемешивание компонентов) от параметров лазера, а также сравнительная оценка эффективности волоконного и модульного диодного лазеров для решения задач поверхностного легирования.

Для моделирования тепловых эффектов используется программное обеспечение Comsol Multiphysics 5.4. и трехмерный метод конечных элементов.

В качестве источников нагрева использовались два типа лазеров: иттербиевый волоконный лазер с длиной волны 1064 нм, мощностью 180 Вт и диаметром пятна 100 мкм (для обработки алюминия), а также модульный диодный лазер с длиной волны 800 нм, мощностью 1680 Вт и возможностью изменения конфигурации пятна (для обработки никеля). Моделирование трёхмерных тепловых полей выполнялось для скоростей сканирования от 100 до 800 мм/с (алюминий) и от 7,5 до 15 мм/с (никель) при варьировании толщины прекурсорного слоя от 20 до 180 мкм для алюминия и 70–140 мкм для никеля. На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

– построена модель, с помощью которой можно получить распределение температур в любой момент времени в течение всего процесса лазерной обработки во всем объеме образца;

– для покрытий из алюминия при скорости 100 мм/с, мощности 180 Вт, толщине покрытия 20 и 40 мкм произошло полное перемешивание компонентов покрытия и подложки. Показана возможность управлять химическим составом получаемого покрытия за счет изменения глубины и, соответственно, состава ванны расплава;

– при лазерной обработке диодными модулями толщина обрабатываемого слоя достигает порядка 500 мкм, а ширина обрабатываемой поверхности порядка 5 мм, что существенно повышает производительность: при сравнимых условиях обработка диодным лазером требует в 2–2,5 раза меньше времени, чем волоконным.

[1] G. Fribourg, A. Deschamps, Y. Bréchet, G. Mylonas, G. Labeas, U. Heckenberger, M. Perez, Microstructure modifications induced by a laser surface treatment in an AA7449 aluminium alloy, *Materials Science and Engineering* 528 (2011) 2736–2747.

[2] M. J. Ansari, D.-S. Nguyen, H. S. Park. Investigation of SLM Process in Terms of Temperature Distribution and Melting Pool Size: Modeling and Experimental Approaches, *Materials* 12 (2019) 1272.

# ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МИКРОПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ $\text{AlNiCoFeCr}$ С ДОБАВКАМИ $\text{TiB}_2$ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ

*Нестерова Е.Д., к. т. н. Бобкова Т.И.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Наноиндентирование является одним из наиболее точных инструментов локального механического анализа, позволяя определять твердость, модуль упругости, сопротивление ползучести и износу в микро- и нанобъемах. Метод базируется на непрерывной регистрации диаграммы «нагрузка–глубина внедрения» ( $P-h$ ) с разрешением по нагрузке порядка наноньютонов и по глубине – долей нанометра, что принципиально отличает его от классических методик (Бринелль, Виккерс), оперирующих геометрией остаточного отпечатка. Особую актуальность метод приобретает при характеристике многокомпонентных покрытий, в том числе высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) с керамическими добавками, где структурная неоднородность предъявляет высокие требования к локальности измерений [1].

Количественный анализ  $P-h$ -диаграмм выполнен по методу Оливера-Фарра, трактуящему участок разгрузки как чисто упругий контакт, что дает возможность рассчитать нанотвердость  $H$  и приведенный модуль упругости  $E$  без прямого измерения отпечатка. Для комплексной оценки износостойкости применялось трибостерирование индентором Берковича, перемещаемым по квадратной траектории с варьируемой пространственной ориентацией. Движение гранью вперед инициирует механизм микрорезания со сдвиговой деформацией и образованием стружки; движение ребром вперед – пластическое выдавливание материала с образованием навалов по краям канавки; боковое движение реализует смешанный режим изнашивания. Таким образом, воспроизводятся абразивный и деформационный механизмы, что повышает диагностическую ценность испытаний. Склонность к ползучести оценивали по дополнительному приращению глубины при ступенчатом нагружении и выдержке при постоянной нагрузке; параметром служила скорость вдавливания в единицу времени [2].

В работе представлены данные по исследованию нанотвердости, модуля упругости, показателям упругого восстановления и пластической деформации, износостойкости и ползучести покрытий высокоэнтропийной системы  $\text{AlNiCoFeCr}$  с добавлением керамических компонентов  $\text{TiB}_2$ .

1. Chudoba T., Richter F. Investigation of creep behaviour under load during indentation experiments and its influence on hardness and modulus results // Surface and Coatings Technology. 2001. Т. 148. № 2–3. С. 191–198.

2. Lee H., Lee H., Pharr G. M. Novel analysis for nanoindentation size effect using strain gradient plasticity // Scripta Materialia. 2005. Т. 53. № 10. С. 1135–1139.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда №21-73-30019-П.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАРЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКА ВПС-53/Т-25 ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

*Нечаев А.А., д. т. н. Старцев В.О., к. х. н. Павлов М.Р.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва*

В работе исследовано старение стеклопластика ВПС 53/Т-25 при экспонировании в условиях умеренного климата в Московском центре климатических испытаний ВИАМ (МЦКИ) и в умеренно теплом климате в Геленджикском центре климатических испытаний (ГЦКИ) в течение 24 месяца. Дополнительно проводили лабораторные ускоренные климатические испытания (УКИ), имитирующие процессы натурального климатического старения в течение 7 лет, по двум режимам (УКИ 1 и УКИ 2). УКИ включали в себя воздействие повышенной влажности, отрицательной температуры, солнечного излучения и перепады температур. Ключевым отличием между указанными режимами являлось увеличение плотности потока солнечного излучения в режиме УКИ 2, а также различия в последовательности воздействия ультрафиолетового излучения и влажности. В частности, в режиме УКИ 2 одновременно проводилось воздействие повышенной влажности и солнечного излучения, что позволило исследовать синергетический эффект данных факторов на материал. [1].

Для оценки изменения эксплуатационных свойств были проведены испытания на трехточечный изгиб в состоянии свободном от влаги и сразу после экспонирования, определены теплофизические характеристики материала на приборе ДМА. Оценка поверхности материала проводилась методом профилометрии, а также было проанализировано влияние старения на диффузионные характеристики стеклопластика [2].

Испытания на изгиб демонстрируют негативное влияние влаги на механические характеристики за счет пластификации матрицы. Результаты теплофизических испытаний показывают снижение температуры стеклования после натурального старения на 9–13% и после ускоренного старения на 14–16%. Поверхность материала стала менее однородной, параметры рельефа поверхности выросли как после натурального, так и после ускоренного старения, что свидетельствует о деструкции поверхностного слоя материала. Коэффициент диффузии влаги после старения в МЦКИ и ГЦКИ увеличился в 2 раза, а после имитации по режимам УКИ 1 и УКИ 2 показатель увеличился в 3–4 раза.

1. Старцев Валерий Олегович, Старцев Олег Владимирович, Павлов Михаил Рашитович, Нечаев Александр Андреевич Прочность и влагостойкость стеклопластика ВПС-53/Т-25 на начальной стадии натурального и ускоренного старения // Труды ВИАМ. 2025. №3 (145).

2. Каблов Е.Н. Старение полимерных композиционных материалов: учебное пособие / Е.Н. Каблов, В.О. Старцев, А.Б. Лаптев. \_ Москва: ВИАМ, 2023. -536с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ ШХ15, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

*Новиков А.С., к.т.н. Севальнев Г.С., Крылов С.А.,  
Дружнов М.А., к.т.н. Севальнева Т.Г.  
НИИ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва*

Стремительное развитие аддитивных технологий открывает перед промышленностью перспективы при создании деталей сложной геометрии с уникальным комплексом свойств. В данном направлении особый интерес представляет применение селективного лазерного сплавления (СЛС) для получения заготовок из высокоуглеродистых сталей. При этом высокое содержание углерода усложняет процесс в связи с высокой склонностью к образованию трещин. Настоящая работа посвящена комплексному анализу взаимосвязи параметров синтеза, формирующейся микроструктуры и механических характеристик образцов из стали подшипниковой ШХ15.

Классическая технология изготовления колец подшипников сопряжена с многостадийной обработкой давлением и резанием, что исключает получение сложнопрофильных деталей. СЛС, напротив, позволяет «выращивать» деталь послойно, минуя этап формообразующей оснастки. Однако применение данной технологии на сталь ШХ15 сопряжено с фундаментальными трудностями металлургического характера. Высокое содержание углерода (около 1%), а также присутствие легирующего элемента хрома приводит к формированию закалочных структур и, как следствие, высокому уровню остаточных напряжений, ведущий к трещинообразованию в процессе построения.

В рамках проведенного исследования методом СЛС были изготовлены образцы с варьированием ключевых энергетических параметров: мощности лазера, скорости сканирования и шага между треками. Были разработаны режимы, позволяющие достичь минимальной газовой пористости при отсутствии дефектов в виде трещин и несплавлений.

В рамках исследования проведен металлографический анализ микроструктуры методом оптической и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурный фазовый анализ, дюрOMETрические исследования, трибологические испытания методом сухого трения скольжения, а так же испытания на контактную усталость синтезированных образцов из углеродистой подшипниковой стали марки ШХ15.

Таким образом, результаты исследования демонстрируют принципиальную возможность получения изделий из стали ШХ15 с твердостью, соизмеримой с традиционными аналогами. Установленные закономерности формирования структуры и свойств в зависимости от режима синтеза создают научный задел для разработки промышленной технологии производства подшипниковых деталей нового поколения с внутренними каналами охлаждения и бионическим дизайном.

# ПОВЫШЕНИЕ ОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ХЛАДОСТОЙКИХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В $\gamma$ - И $\alpha$ -ФАЗАХ

*Новоскольцев Н.С.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Для листового проката толщиной 60–100 мм актуальна разработка прецизионных режимов прокатки, обеспечивающих формирование по сечению деформируемой заготовки наиболее однородной структуры на высокотемпературной (черновой) стадии прокатки, полностью проходящей в аустенитной области, что позволит на дальнейших этапах передела сохранить ее оптимальную конфигурацию и обеспечить однородность механических свойств по сечению готового проката. Сложность данной задачи заключается в том, что черновая стадия проводится в условиях наибольшей неравномерности температурно-деформационных параметров по сечению сляба и ограничений по их варьированию из-за необходимости соблюдения режимов последующих чистовой стадии и охлаждения, что создает условия для неравномерного по сечению протекания процессов рекристаллизации в  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фазах.

Целью работы является повышение однородности ферритно-бейнитной, бейнитной, бейнитно-мартенситной и мартенситной структуры за счет управления процессами структурообразования в  $\gamma$ -фазе и  $\alpha$ -фазе при производстве листового проката из судостроительных марок стали толщиной до 100 мм включительно.

Для исследования были выбраны стали для судостроения с уровнем прочности от 315 до 960 МПа по ГОСТ Р 52927 марганцовистой, марганцевоникелиевой и хромникельмолибденовой композиций легирования с варьированием применяемого микролегирования. Исследование процессов рекристаллизации аустенита, имитационное моделирование многопроходной черновой стадии прокатки и горячей прокатки по технологиям термомеханической обработки и закалки с прокатного нагрева с последующим ускоренным охлаждением проводилось на многофункциональном пластометрическом комплексе «Gleeble 3800». Исследование роста зерна аустенита выполнено на dilatометре DIL 805 методом термического травления в вакууме (ТВ). Исследования структуры образцов выполнены на световом металлографическом микроскопе «Axiovert» 40 MAT и двулучевом сканирующем микроскопе «TESCAN LYRA3» с использованием метода дифракции обратно рассеянных электронов EBSD.

Выполненные исследования позволили определить температурно-деформационные условия формирования мелкозернистой аустенитной структуры на основании комплексных исследований рекристаллизационных процессов в  $\gamma$ -фазе. Была проведена оценка возможности использования различных вариантов микролегирования низкоуглеродистых сталей для судостроения, позволяющих обеспечить в листовом прокате наиболее оптимальный комплекс механических свойств. Разработаны режимы высокотемпературной стадии прокатки, минимизирующие разнородность аустенитной структуры по всей толщине листового проката до 100 мм из судостроительных сталей широкого марочного сортамента. Разработаны промышленные режимы высокотемпературного отпуска, обеспечивающие отсутствие развития рекристаллизационных процессов в  $\alpha$ -фазе легированной стали, что гарантирует получение равномерной мелкозернистой структуры с размером структурных элементов не более 30 мкм по всей толщине листового проката толщиной до 100 мм, изготовленного по технологии закалки с прокатного нагрева.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ СТАЛИ

*Обливанцев К.Д., к.т.н. Севальнев Г.С.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва*

В современной промышленности традиционные системы легирования конструкционных материалов приближаются к функциональному пределу: исчерпаны классические комбинации легирующих элементов. В этих условиях всё большее значение приобретают не объёмное легирование, а локальная модификация поверхности – именно она определяет ресурс изделий в условиях трения, коррозии и высоких температур.

Методы поверхностной обработки (ХТО, термическая, механическая) часто либо недостаточно эффективны для экстремальных нагрузок, либо трудоёмки. Электроискровое легирование (ЭИЛ) выделяется своей мобильностью, отсутствием потребности в вакууме и возможностью работать с деталями практически любой геометрии.

Перспективными материалами на основе железа являются высокоазотистые экономно- и комплекснолегированные стали, которые превосходят углеродистые стали по пластичности и могут эффективно работать в условиях сухого трения благодаря меньшему коэффициенту трения и аустенитной структуре.

В рамках проведённых исследований изучалась возможность использования высокоазотистых сталей в качестве покрытия для улучшения триботехнических характеристик сталей перлитного класса.

В качестве объекта исследований в данной работе использовали экономнолегированную сталь со сверхравновесным содержанием азота системы Fe-C-Cr-Mn-Mo-Ni-V. Исследования проводили после нанесения покрытия методом электроискрового легирования (ЭИЛ) на сталь перлитного класса 30ХГСН2А.

Металлографический анализ показал, что микроструктура состоит из белого слоя формируемого покрытия, диффузионной зоны перераспределения легирующих элементов и зоны основного металла подложки. Покрытие имеет литую дендритную структуру с высокой степенью искажения, вследствие чего зона покрытия слабо подвержена травлению.

Проведены трибологические испытания, исследованы триботехнические характеристики (интенсивность изнашивания и коэффициент трения) в зависимости от количества нанесённых слоёв и параметров испытаний.

## **ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШТАМПОВОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА 5ВА НА ИХ СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА**

*Орехов О.Д.*

*НИИ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Титан и сплавы на его основе являются одним из ключевых конструкционных материалов, используемых в судостроении, благодаря удачному сочетанию механических и эксплуатационных свойств, высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. В последнее время со стороны бюро-проектантов морской техники сформировался запрос на увеличение массогабаритных характеристик и толщин сферических штампованных заготовок из титанового псевдо- $\alpha$  сплава системы легирования Ti-Al-V-Mo при одновременном сохранении механических и служебных свойств металла на прежнем уровне.

Производство, используемых в качестве исходной заготовки под штамповку плит, осуществлялось методом прокатки на стане, технические возможности которого не позволяют получать плиты шириной более 1600 мм. Альтернативной технологией производства плит шириной более 2000 мм и сопоставимой или большей длины являетсяковка на гидравлических прессах. При этом следует учитывать, что обеспечение однородности структуры и механических свойств при изготовлении плит ковкой является гораздо более трудной технологической задачей, а обоснованная замена технологии требует проведения ряда сравнительных испытаний.

Таким образом, целью настоящей работы является проведение комплексных исследований механических свойств, вязкости разрушения и микроструктуры металла крупногабаритных сферических штампованных заготовок, полученных из катаной и кованой плит, для экспериментально обоснованного подтверждения возможности использования новой технологии.

В качестве исследуемого материала выступали штампованные заготовки, изготовленные по двум технологиям. Для получения релевантных результатов образцы для проведения механических испытаний на статическое растяжение, ударную вязкость и вязкость разрушения вырезали из различных зон и слоёв полуфабрикатов в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Металлографический анализ выполняли на шлифах, отобранных из приповерхностных и средних по толщине слоёв полуфабрикатов.

Выполненные исследования и сравнительный анализ результатов показали, что ковано-штампованный вариант изготовления заготовки обеспечивает необходимые однородность и уровень значений механических и служебных свойств в металле сопоставимые металлу, полученному по катано-штампованному варианту производства.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК С ТОНКОПЛЕНОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ

*Павлова М.В.*

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», г. Санкт-Петербург*

Корундовая керамика обладает высокими электрическими, механическими и тепловыми свойствами, химической устойчивостью и размерной стабильностью. Благодаря указанным характеристикам керамика широко применяется в гиросприборостроении. В гиросприборостроении керамические изделия входят в состав таких приборов как, поплавковый, криогенный и электростатический гироскопы, а также в акселерометр компенсационного типа. Для акселерометра компенсационного типа формообразование используемой в нем прецизионной керамической подложки с медными контактными площадками производится при помощи абразивно-механической обработки с последующим магнетронным напылением медных контактных площадок через маску. В связи с большим количеством технологического отхода при указанном способе изготовления подложки было предложено заменить абразивно-механическую обработку лазерной. Для упрощения процесса напыления покрытия было принято решение рассмотреть возможность производить лазерную резку подложек с заранее нанесенным медным покрытием на поверхность керамической пластины-заготовки. Применение лазерной резки на всю глубину пластины-заготовки для вычленения подложки приводило к испарению медного покрытия на ее поверхности. В связи с этим было предложено разделить лазерную резку подложки на два этапа: с оборотной и лицевой стороны пластины-заготовки. При этом, для уменьшения температурного воздействия на медное покрытие при лазерной обработке пластины-заготовки было принято решение напылять медь после первого этапа лазерной резки. Проведение термодинамического анализа на основе расчета энергии Гиббса при температуре лазерной обработки поверхности выявило необходимость дополнительной защиты медного покрытия от окисления. Для дополнительной защиты медного покрытия от окисления во время лазерной обработки было предложено использовать протекторный слой олова.

В ходе исследований была разработана комбинированная технология лазерной обработки с локальным лазерным испарением тонкопленочного покрытия, напыленного на поверхность керамики, и лазерной резкой керамических подложек. Представленная технология позволяет уменьшить технологический отход на 40% по сравнению с традиционными способами обработки.

## **ВЛИЯНИЕ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОГО КАУЧУКА И ИНИЦИАТОРА ОТВЕРЖДЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СФЕРОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ НАПОЛНЕННОЙ ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ СМОЛЫ**

*Панфилова А.П., к. т. н. Артамонов Е.А., Матвиенко Ж.В.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,*

*г. Санкт-Петербург*

Сферопластик на основе ненасыщенной полиэфирной смолы ПН-609-21М, наполненной стеклянными микросферами МС-А9 гр.А2, широко применяется для изготовления ответственных изделий. Прочностные характеристики такой композиции зависят от сочетания свойств низкомолекулярного каучука, системы отверждения и вида наполнителей. Актуальность исследования обусловлена двумя факторами: прекращением поставок импортного инициатора Norpol Peroxid №1 (Швеция) и отсутствием на рынке пероксида метилэтилкетона (ПМЭК) российского производства, применяемых в качестве отвердителей для ненасыщенных полиэфирных смол (НПС). Важно отметить, что значительное влияние на свойства конечного продукта оказывают основной наполнитель – стеклянные микросферы и низкомолекулярный каучук. Низкомолекулярные карбоцепные каучуки с концевыми функциональными группами (например, с карбоксильными, гидроксильными, эпоксидными) улучшают прочностные свойства отверждённого связующего. Это происходит за счёт эффекта пластификации: каучук выступает в роли пластификатора и выделяется в отдельную фазу, что уменьшает хрупкость матрицы и приводит к повышению ударо- и трещиностойкости.

В работе исследовано влияние трех типов каучуков – гидроксилсодержащего ОРБ, полисульфидного Тиokol I и низкомолекулярного диенового – СКД-0, в сочетании с различными инициаторами полимеризации (пероксид метилэтилкетона марок Norpol Peroxid №1 и Акперох А50, гидропероксид изопропилбензола – Гипериз) на свойства наполненной композиции.

Для ускорения отверждения сферопластиковой композиции на основе НПС марки ПН-609-21М при комнатной температуре в присутствии инициаторов ПМЭК и Гипериза применялся ускоритель – октоат кобальта (ОК) в количестве 2,5 масс. ч. и 5,5 масс. ч соответственно.

Установлено, что замена импортного инициатора Norpol Peroxid №1 на аналог Акперох А50 (ПМЭК) в системах, содержащих каучук ОРБ, не ухудшает физико механических показателей сферопластика. Образцы, содержащие Гипериз и каучук ОРБ показали пониженную прочность при сжатии. Это можно объяснить тем, что перекись метилэтилкетона имеет более высокую концентрацию радикалов способных к инициированию отверждения полиэфирной матрицы, чем гидропероксид изопропилбензола. Вследствие чего ускоряется

процесс образования сшитой полимерной структуры (сетки). В свою очередь гидроксилсодержащий каучук выступает в качестве донора водорода для радикалов, тем самым инициируя рост полимерных цепей и способствуя образованию более прочной межфазной связи между каучуком и полиэфирной матрицей. В результате данных процессов формируется прочная композитная структура, что приводит к повышению механических характеристик материала при сжатии.

Введение Тиокола I в систему с инициатором отверждения Гипериз увеличивает прочностные показатели при сжатии сферопластика, в сравнении с композицией, содержащей каучук ОРБ.

Показано, что в композициях с инициатором Акрегох А50 введение каучука СКД-0 в количестве 8 масс.ч. значительно увеличивает значения разрушающего напряжения при сжатии и растяжении. Можно предположить, что в данной концентрации низкомолекулярный диеновый каучук за счет образования дополнительных поперечных связей увеличивает степень отверждения полимерной матрицы, в следствии чего повышаются прочностные характеристики материала. Дальнейшее увеличение концентрации каучука до 10 масс.ч. приводит к снижению прочностных свойств.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ И КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Пастух Е.С., к. т. н. Севостьянов Н.В.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва*

Ужесточение требований к надежности, экологичности и способности узлов трения работать в экстремальных средах (вакуум, высокие температуры, агрессивные среды) стимулирует отказ от жидких смазок в пользу сухого трения. Композиты на основе керамики и тугоплавких металлов являются приоритетными кандидатами для таких задач, однако их трибологическая совместимость с традиционными и перспективными материалами изучена мало. Ошибка в подборе пары «композит–контртело» ведет либо к недопустимому износу, либо к нестабильности коэффициента трения. Систематизация экспериментальных данных о поведении широкого круга материалов в единых методических условиях позволяет создать физически обоснованную базу для инженерного проектирования узлов сухого трения нового поколения.

В работе представлены результаты исследований триботехнических свойств керамических и металлических композиционных материалов, а также монокристалла оксида алюминия, в паре трения с материалами разного типа (стали, бронзы, чугун, твердый сплав, полимеры, графит). В качестве керамики были исследованы карбид и нитрид кремния, нитрид бора, графит марки МПГ-7, а в качестве металломатричных композитов – МКМ на основе никеля и меди, наполненные различными нитридами. Испытания проводились на универсальной машине трения по схемам трения pin-on-disc (вращательное движение) и pin-on-flat (возвратно-поступательное движение).

Установлены ключевые закономерности влияния физико-химической природы контртела на коэффициент трения, износ материала и механизмы формирования и разрушения вторичных структур. На основе полученных данных сформулированы принципы выбора пар трения для антифрикционных и фрикционных узлов, эксплуатируемых без смазочного материала в широком диапазоне нагрузок и скоростей при комнатной температуре.

## ПОРИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДОВ

*Полотнянщиков К.С., д. х. н. Светличный В.М., к. т. н. Ваганов Г.В.,  
Попова Е.Н., к. ф.-м. н. Иванькова Е.М., д. ф.-м. н. Юдин В.Е.  
Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС  
г. Санкт-Петербург*

Развитие аэрокосмической и авиационной промышленности создает запрос на новые легкие материалы с улучшенными свойствами, среди которых высокая тепло- и термостойкость, а также теплоизоляционные свойства, чему отвечают полиимидные пеноматериалы. В последние десятилетия пенопласты на основе полиимидов все чаще используются в качестве как легких наполнителей авиационных панелей, так и в отделке судов. Пенополиимидные изделия демонстрируют уникальный комплекс свойств, в том числе низкую плотность, высокую термостойкость и способность к сохранению механических свойств в широком диапазоне температур.

На сегодняшний день разработан ряд новых методов получения полиимидных материалов и пенополиимидов, таких как лиофилизация растворов форполимеров полиимидов (полиамидокислот) или термообработка пенообразующих комплексов, получаемых при ацилировании диаминов диэфирами тетракарбоновых кислот. Такие форполимерные комплексы, содержащие сложноэфирные и аминные группы, являются реакционноспособными олигомерами. На основе двух указанных типов форполимеров полиимидов получены как ненаполненные пенополиимиды, так и пенокомпозиты различных типов.

В данной работе получен ряд пен и пенокомпозитов с применением полиимидных связующих на основе ароматических диаминов: 4,4'-диаминодифенилового эфира (ДАДФЭ) и 4,4'-диаминодифенилметана (ДАДФМ) ацилированных диангидами 3,3',4,4'-дифенилоксидтетракарбоновой (ДФО) и 3,3',4,4'-бензофенонтetraкарбоновой кислот (БЗФ). Показано, что синтезированные форполимеры могут быть применены как для получения легких (плотность 70–40 кг/м<sup>3</sup>) высокотермостойких ( $T_g$  248–271 °С,  $\tau_5$  500–530 °С) пенополиимидов, так и для прочных высокотермостойких ( $\tau_5$  550–555 °С) пенокомпозитов.

# ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОГО МЕТОДА НА БАЗЕ ПРОГРАММЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ FIJI/IMAGEJ И СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИЗА ДЕФЕКТОВ МИКРОСТРУКТУРЫ

*Поляков Д.Д.*

*НИИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт Петербург*

Работа посвящена методу автоматизации классификации и распознаванию зернограницных трещин с применением сверточных нейросетей.

При длительном нагревании аустенитных сталей в условии воздействия нейтронного облучения возникает наработка гелия и водорода. Эти элементы, обладая высокой подвижностью, накапливаются во внутренних дефектах: границах кристаллов, дислокациях и флокенах. При повышенных температурах может происходить моляризация атомов гелия и водорода, приводящая к увеличению давления в полости дефектов. Наиболее вероятно локализация в участках границ зерна.

Традиционные металлографические методы анализа, основанные на визуальном контроле оператором, субъективны и не позволяют с высокой точностью распознавать отличия границ зерен от трещин, а также имеют высокую трудоемкость при работе с большим количеством снимков.

В этой связи создание методики анализа зернограницных трещин в аустенитных сталях с применением технологии искусственного интеллекта приобретает особую актуальность.

Гибридный метод решения данной задачи заключается в следующем: нейросеть проходит первичное обучение с участием оператора, после чего на основе полученных данных самостоятельно проводит классификацию и выделение границ дефектов. Программа Fiji/ImageJ позволяет избавиться от шумов и провести расчет совокупных параметров трещин.

Для оптимизации работы и упрощения использования метода были написаны модули, позволяющие автоматизировать обработку большого массива изображений.

Данный метод позволяет существенно сократить время работы оператора на анализ снимков микроструктуры металлов без потери качества.

# САМОКЛЕЯЩИЙСЯ ОГНЕЗАЩИТНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОТЕНЦИАЛЬНО ПОЖАРООПАСНЫХ ЗОН АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

*Пушница А.С., к. т. н. Венедиктова М.А.,  
Котельникова Д.Д., Куршев Е.В., Лонский С.Л.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва*

Разработка интумесцентных покрытий с повышенной огнезащитной способностью, работающих в сложных и экстремальных условиях эксплуатации, характерных для нефтегазовой, нефтехимической, энергетической, автомобильной и аэрокосмической отрасли, сопряжена с рядом актуальных проблем, связанных с технологическим прогрессом. Во-первых, ограниченный интервал эксплуатации огнезащитных материалов (работоспособность от -60 до 120 °С), во-вторых, необходимость последней обработки заданной толщины и соблюдения режимов сушки как при комнатной, так и при повышенной температуре, в-третьих, низкая прочность вспученного углеродного слоя, снижающая огнезащитную эффективность интумесцентных покрытий.

Ввиду этого научно-практический интерес представляет интенсификация коксообразования и упрочнение углеродного слоя, а также расширение температурного интервала эксплуатации и сокращение технологического цикла нанесения указанного типа материалов.

В свою очередь НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ имеет успешный опыт в разработке огнезащитных материалов, в том числе интумесцентных. Разработанные ранее огнезащитные материалы применяются для защиты металлических и конструкций из полимерных композиционных материалов авиационной техники, работоспособны как в воздушной среде, так и в контакте с горюче-смазочными материалами (ГСМ) при температуре от -60 до +120 или 150 °С в зависимости от конкретной марки огнезащитного материала.

В связи с чем нами разработан самоклеящийся огнезащитный материал марки ВЗО-11 для защиты потенциально пожароопасных зон, работоспособный в интервале температур от -60 до 200 °С длительно и при (1100 ± 50) °С в течение не менее 15 мин, стойкий к воздействию ГСМ. Технологическое преимущество по сравнению с традиционными огнезащитными материалами, заключается в наличии интумесцентного, клеевого и теплоизоляционного слоя. Таким образом наличие клеевого (липкого) слоя позволяет использовать материал как самоклеящийся, тем самым сокращает производственный цикл нанесения, поскольку не требуется послойного нанесения и сушки.

Поскольку вспучивание происходит в процессе горения, вследствие множественно протекающих химических реакций, в том числе реакций конденсации, образуются пористый, преимущественно углеродной, структуры (кокс), большое значение имеет исследование полученного кокса.

Следует подчеркнуть, что эффективность огнезащитного материала ВЗО-11 (упрочнение углеродного кокса) объясняется его составом (комбинации функциональных добавок и бинарных неорганических соединений) и теплоизоляционным слоем, частично изолирующим закоксованный слой от субстрата (металлической основы), что помогает уменьшить нагрев и сохранить адгезионную прочность.

*Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.5 «Теплозащитные материалы и покрытия».*

## ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ЧАСТЕЙ В ПОДВОДНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Румынский И.И.*

*АО «Концерн «МПО-Гидроприбор», г. Санкт-Петербург*

При выполнении подводных работ возникают задачи обеспечения несущей способности герметичных корпусов, снижения их массы и массы гидродинамических элементов в подводном положении.

Современные ЛВЗ – материалы, позволяющие решить подобные задачи, обладающие плотностью  $(650 \pm 150)$  кг/м<sup>3</sup> и способные работать при критически больших наружных всесторонних гидростатических давлениях без потери запаса плавучести и без водопоглощения.

В рамках описанной работы была решена задача по повышению запаса плавучести подводного аппарата за счет замены традиционных металлических сплавов на легковесные ПКМ (стеклопластик и ЛВЗ) при изготовлении гидродинамических элементов.

Предварительно была изготовлена форма из полиуретана, состоящая из двух полуформ, соединяемых между собой винтами.

Формирование наружной стеклопластиковой оболочки гидродинамического элемента было выполнено методом контактного формования стеклотканью марки Т-11-ГВС-9 (ГОСТ 19170-2001) и связующим холодного отверждения на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) в полуформах.

Непосредственно перед заливкой ЛВЗ в полуформы устанавливались закладные элементы в количестве 5 шт. Затем производилось заполнение полости формы заливочной композицией. Одновременно с этим производилось заполнение форм для изготовления образцов-свидетелей. Отверждение заливочной композиции совместно с образцами-свидетелями производилось в соответствии температурным режимом отверждения ЛВЗ с пиковой температурой 90 °С.

Для подтверждения работоспособности гидродинамического элемента были проведены испытания образцов-свидетелей. Определение плотности (ГОСТ 15139-69) и величины прочности при одностороннем сжатии (ГОСТ 4651-2014) легковесного заполнителя ЛВЗ-550 выполнялось на 5 образцах-свидетелях для каждого гидродинамического элемента.

Среднее значение плотности составило  $506 \pm 31$  кг/м<sup>3</sup>, среднее значение предела прочности при одноосном сжатии –  $356 \pm 50$  кгс/см<sup>2</sup>.

На поверхность гидродинамического элемента была нанесена система ЛКП, включающая в себя композицию на основе клея ЭЛ-20 с добавлением

молотого кварца и микросфер, шпатлевку ЭП-0010 (ГОСТ 28379-2025) и голубовато-серая эмаль ЭП-140.

На рисунке приведена фотография полностью готового гидродинамического элемента.



Задача снижения массы и обеспечения запаса плавучести в подводном положении удачно решена, так, масса одного стабилизатора из ЛВЗ в подводном положении составила – 1,6 кг (положительная плавучесть), для сравнения, масса аналогичного алюминиевого стабилизатора составила 4,3 кг. Таким образом, массу каждого стабилизатора удалось снизить на 137 %.

Впервые в опытном изделии профиля Концерна был использован элемент КМЧ, изготовленный полностью из ПКМ.

## **СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ПАРАМЕТРЫ ДИФфуЗИОННЫХ СЛОЕВ В ВЫСОКОАЗОТИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЯХ ПОСЛЕ ВАКУУМНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

*к.т.н. Севальнёв Г.С., Дульнев К.В., к.т.н. Севальнёва Т.Г.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва*

Высокоазотистые легированные стали конструкционного и коррозионно-стойкого назначения представляют значительный интерес в современном материаловедении благодаря сочетанию высоких прочностных и пластических характеристик с износостойкостью и усталостной прочностью [1]. Комплексное легирование углеродом и азотом обеспечивает формирование мелкодисперсной мартенситной матрицы, упрочнённой карбонитридными фазами, а также стабилизированной аустенитной составляющей, положительно влияющей на ударную вязкость и износостойкость. Вместе с тем наличие остаточного аустенита способствует интенсивному накоплению дислокаций при циклических нагрузках, что негативно сказывается на усталостных характеристиках.

Эффективным способом устранения указанного недостатка является поверхностное модифицирование методами химико-термической обработки, прежде всего вакуумной цементацией. Установлено, что присутствие азота в поверхностном слое ускоряет диффузионные процессы, что связывается со снижением энергии дефектов упаковки. При этом в сравнении с химическими составами, в которых в качестве элемента внедрения содержится только углерод, более низкое расчетное значение энергии дефектов упаковки аустенита свидетельствует о преобладании процесса торможения диффузии. Ранее в работе [2] было показано, что кинетика формирования диффузионного слоя в высокоазотистых конструкционных сталях отличается от наблюдаемой в углеродистых сталях – как по морфологии избыточных фаз, так и по распределению твёрдости и характеру выделения упрочняющих фаз. В работе показаны основные механизмы формирования структурно-фазового состава и свойств диффузионного слоя после вакуумной цементации и термической обработки.

1) Востриков А.В., Севальнев Г.С., Банных И.О. и др. Эволюция микроструктуры, твердости и триботехнических свойств экономнолегированной стали мартенситного класса со сверхвысоким содержанием азота // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2022. № 9. Ст.1. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-3-14.

2) Севальнев Г.С., Ульянов Е.И., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Особенности формирования диффузионных слоев в экономнолегированной высокоазотистой конструкционной стали при вакуумной цементации // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2025. № 1 Ст.1. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.05.2026). DOI 10.18577/2307-6046-2025-0-1-3-15

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СТРУКТУРНЫХ И СПЕКТРАЛЬНО-ЯРКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛЮМИНОФОРОВ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИДА ЦИНКА

***Снятков И.В.<sup>1,2</sup>, Сняткова А.В.<sup>2</sup>, к. т. н. Зеленина Е.В.<sup>2</sup>***

*<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,*

*<sup>2</sup> СПбГТИ(ТУ), каф. теоретических основ материаловедения, г. Санкт-Петербург*

Радиоломинесцентные источники света (РИС) применяются в таких областях техники, где необходимо освещение, независимое от электрической сети, и состоят из радиоломинофора, совмещенного с радиоактивным изотопом. Чаще всего изотопом в таких источниках является тритий, а в качестве радиоломинофоров используются люминофоры на основе сульфида цинка, которые получили распространение за счет своей дешевизны и радиационной устойчивости.

Сульфид цинка существует в виде двух кристаллических модификаций – сфалерита и вюрцита, однако влияние фазового состава на радиоломинесцентные свойства изучено недостаточно. В ходе работы синтезированы люминофоры состава  $ZnS:Cu(0-0,03\text{мас.}\%),Br(0,8\text{мас.}\%)$  твердофазным спеканием при температуре  $950\text{ }^{\circ}\text{C}-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  в восстановительной атмосфере. Также для повышения яркости люминофоров на разных стадиях синтеза применялась электронно-лучевая обработка (ЭЛО) ускоренными электронами. В результате, несмотря на смену сырья, воспроизвелись обнаруженные в предыдущих исследованиях [1] S-образные зависимости спектральных характеристик от фазового состава. Также получены люминофоры во всем диапазоне содержания вюрцита, благодаря чему удалось расширить представления о влиянии фазового состава на радиоломинесценцию. Полученные результаты были оценены с применением теории перколяции [2].

Поскольку энергия излучения трития мала и составляет в среднем 5 КэВ, а пробег излучаемых электронов в твердом теле не превышает 1 мкм [3], радио-люминесценцию можно рассматривать как поверхностный процесс, в связи с чем возникает необходимость в более детальном исследовании свойств поверхности. В данной работе изучена поверхность серии люминофоров без дополнительной обработки и серии, синтезированной после ЭЛО шихты. Для оценки кислотно-основных свойств поверхности применялся химический метод анализа распределения центров адсорбции (РЦА). Также для обеих серий был определен элементный состав поверхности методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Было обнаружено, что данные этих двух анализов взаимно дополняют друг друга и открывают возможность для углубленного изучения свойств поверхности.

1. Зеленина, Е. В. Разработка твердотельных радиоломинесцентных источников света повышенной яркости: специальность 1.4.15 «Химия твердого тела»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зеленина Елена Владимировна; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет). – Санкт-Петербург, 2022. – 145 с.

2. Зеленина Е. В. Анализ влияния структуры  $ZnS:Cu,Br$  люминофоров на люминесцентные характеристики с применением теории перколяции / Е. В. Зеленина, М. М. Сычев, И. В. Снятков, А. В. Чуркина // Физика и химия стекла. – 2024. - Т 50 - № 5. – С. 464-473. Doi: 10.31857/S0132665124050092

3. Твердохлебов, Е. Н. Радиоломинесцентные излучатели оптического диапазона / Е. Н. Твердохлебов, В. Н. Чечевичкин, Л. В. Карклит // Приборы и техника эксперимента. - 1990. - № 5. - С. 23–30.

*Работа выполнена в рамках дипломного исследования*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА ДЛЯ НОЖЕВОГО ИНСТРУМЕНТА

*Степичев Е.С., д. т. н. Геращенко Д.А., д. т. н. Кузнецов П.А.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Карбидостали на основе TiC используются для создания кулачков, седел клапанов, деталей подшипников, подающих и поддерживающих прутков бесцентровых токарных станков, режущих пластин, мерительного и штампового инструмента, ножей и лопастей агрегатов для окомкования, звеньев винтовых питателей [1]. За рубежом был разработан сплав марки Nikro 128, успешно применяющийся в изготовлении биметаллических ножей для процесса подводного гранулирования полимеров (Underwater Pelletizing) [2]. Отечественная нефтеперерабатывающая промышленность оснащается импортными грануляторами, элементами которых являются ножи с лезвием из Nikro 128. В условиях непрерывного производства лезвие изнашивается из-за трения о более твердую поверхность фильеры, поэтому ножи требуется периодически заменять. В России не производят Nikro 128, также отсутствуют исследования, посвященные ему и подобным материалам. Цель настоящей работы заключалась в определении трибологических характеристик Nikro 128, его аналога, полученного по традиционной для твердых сплавов технологии порошковой металлургии, и быстрорежущей стали P6M5.

Композиционный материал, аналогичный по составу Nikro 128, изготавливали по методике, описанной в работе [3]. Трибологические испытания проводили, используя конфигурацию пары трения «кольцо-кольцо», которая имитирует работу ножей. Из исследуемых материалов после упрочняющей термообработки и рабочей поверхности импортной фильеры вырезали образцы методом электроэрозионной резки и склеивали со стандартным кольцом. Кольцо с образцом фильеры устанавливали в неподвижный паз силоизмерителя, а в паз вращающегося привода — кольцо с образцами керметов и P6M5. Трущиеся материалы соприкасались плоскопараллельной гранью. Вращение кольца осуществлялось со скоростью 1000 об/мин. В зону трения подавалась вода для снижения температуры поверхностей.

Коэффициенты трения образцов Nikro 128 и изготовленного аналога получились достаточно близкими и равными, соответственно, 0,16 и 0,17. Значение интенсивности изнашивания аналога на порядок ниже, чем оригинального материала. Износ образца фильеры от трения с Nikro 128 меньше, чем от трения с аналогом, а наибольший износ наблюдается от взаимодействия с P6M5.

1. Кипарисов, С.С. Карбид титана: получение, свойства, применение : учебное пособие / С.С. Кипарисов, Ю.В. Левинский, А.П. Петров. – Москва : Металлургия, 1987. – 216 с.

2. Foller, M. A new investigation on mechanical properties of ferro-titanit / M. Foller, H. Meyer // Proceedings of the 6th International Tooling Conferece. – Karlstad, Sweden, 2002. – Pp. 10-13.

3. Степичев, Е.С. и др. Исследование процесса синтеза ферро-титанида для изготовления изделий на его основе // XXII Конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» : Сборник тезисов докладов. – Санкт-Петербург : НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 2025. – С. 61.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕШНОГО ВЛИЯНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ИНГИБИТОРА КОРРОЗИИ И ПРОИЗВОДНЫХ СИЛАНА НА СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ И СФЕРОПЛАСТИКОВ НА ИХ ОСНОВЕ

*Суворова Е.С., Гордеева Я.В., Эльдяева Г.Б.,*

*к. х. н. Ткачук А.И., Коваленко А.В.*

*НИЦ Курчатовский институт – ВИАМ, Москва*

Активное развитие концепции «зеленой химии» в промышленности требует отказа от использования токсичных химических соединений, к которым, в частности, относятся различные неорганические ингибиторы коррозии. Их альтернативой могут служить органические соединения, наиболее перспективными из которых являются гетероциклические азосоединения класса азолов, обладающие высокой антикоррозионной способностью в паре «покрытие–металл». При этом использование азолов является не только экологически безопасным, но и рентабельным в случае промышленного применения.

Использование органических соединений силана в связующих обеспечивают повышенную влагостойкость, равномерное смачивание дисперсного или волокнистого наполнителя смоляным (вязким) компонентам и, как следствие, высокую адгезию, что исключает наличие «сухих» зон, которые будут причиной раннего разрушения изделия.

В настоящей работе в качестве модельной композиции была выбрана смесь на основе эпокси-диановой смолы и циклоалифатического амина, бензотриазол – в качестве ингибитора, а производные силана: 3-глицидоксипропилтриметоксисилан и 3-аминопропилтриэтоксисилан – в качестве смачивающих добавок.

В результате исследования влияния бензотриазола в модельной композиции было установлено, что с увеличением концентрации вязкость смолы стремительно возрастает, физико-механические характеристики увеличиваются, а коррозионная активность снижается и становится нейтральной. Была выявлена оптимальная концентрация бензотриазола – 1,25 масс. %, при которой сохраняются высокие прочностные, теплофизические характеристики и нейтральный рН среды.

При добавлении 3-глицидоксипропилтриметоксисилана и 3-аминопропилтриэтоксисилана вязкость уменьшается, что позволяет корректировать ее повышение при введении ингибитора. В результате добавления производных силанов в количестве от 0,5 до 5 масс. % водопоглощение отвержденной полимерной матрицы увеличивается, прочностные и теплостойкие характеристики стремительно уменьшаются. Это объясняется тем, что данные вещества выступают в качестве пластификаторов, то есть при встраивании в эпок-

сидную матрицу увеличивается расстояние между узлами сетки, что делает систему более гибкой.

Было замечено, что после кипячения в течение 24 часов в дистиллированной воде прочностные характеристики резко увеличиваются из-за возможной активации силана: в результате кипячения метокси- и этоксигруппы гидролизуются до силанольных, конденсируются между собой, и, как следствие, образуются жёсткие силоксановые связи, благодаря которым проявляется армирующий эффект. Важно отметить, что введение производных силана можно использовать для корректировки pH.

На основе экспериментальных образцов и стеклянных микросфер марки МС – ВП – А9 группы 5 были изготовлены сферопластики и изучены их механические свойства до и после кипячения в течение 24 часов и плотность. Установлено, что увеличение доли наполнителя приводит к снижению плотности, однако уменьшение доли полимерной матрицы может привести к повышенной пористости и снижению физико-механических свойств. Выявлена оптимальная концентрация 3-глицидоксипропилтриметоксисилана – 0,5 масс. % и 3-аминопропилтриэтоксисилана – 1 масс. %, при которых наблюдаются наилучшие прочностные характеристики. В составе сферопластика производные силана обеспечивают хорошую адгезию между полимерной матрицей и микросферами, что повышает физико-механические характеристики до максимального значения, а с последующим увеличением концентрации смачивающих добавок не меняется. После кипячения образцов также наблюдалось увеличение прочности при сжатии относительно исходных значений, что возможно объяснить упрочнением полимерной матрицы за счет химических превращений метокси- и этоксигрупп.

Полученные экспериментальные данные послужат основой для разработки новых эпоксидных материалов (связующие, компаунды, клеи на их основе), которые будут обладать пониженной коррозионной стойкостью для защиты металлоконструкций.

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ ДУПЛЕКСНОЙ СТАЛИ 03X22Н6М2, ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ ПЛВ

*Удунци Т.В.<sup>1,2</sup>, к. т. н. Мендагалиев Р.В.<sup>1</sup>, к. т. н. Климова-Корсмик О.Г.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Аддитивное производство на сегодняшний день стремительно развивается, позволяя получать сложные изделия из самых разнообразных марок сталей и сплавов. Безусловно, такие технологии, как прямое лазерное выращивание (ПЛВ), являются крайне востребованными в тех сферах, где необходима высокая точность геометрии изделий с минимальной постобработкой.

Главной задачей, стоящей перед материалововедами, работающими с подобными изделиями, является достижение ими уровня механических и эксплуатационных свойств, не уступающих изделиям изготовленным по традиционным технологиям. Для решения данной задачи в области некоторых специальных сталей и сплавов требуются отдельные исследования направленные на изучения влияния как метода изготовления (параметров режима ПЛВ), так и методов последующей термической обработки (ТО) изделий. Структура изделий, изготовленных ПЛВ, сильно отличается от типичных структур, получаемых традиционными методами изготовления и соответственно требует потенциально новых подходов и детальных исследований перед введением изделия в эксплуатацию, чему и посвящена данная работа [1].

В данной работе приведены исследования коррозионностойкой аустенитно-ферритной стали 03X22Н6М2, обладающей повышенными прочностными характеристиками и значительно большей стойкостью как к общей, так и к локальной коррозии по сравнению с большинством аустенитных хромоникелевых сталей [2,3]. В работе приведены исследования влияния режима изготовления на исходное фазовое состояние стали, исследовано влияние ТО на структуру, механические свойства и коррозионную стойкость данной стали. Также приведены результаты натуральных коррозионных испытаний в условиях морской воды. Разработаны рекомендации по проведению ТО и скорректирован режим ПЛВ изготовления изделий из стали 03X22Н6М2.

1. Baoyu Luo, Yanhui Guo, Linghuan Pang, Xin Liu, Mingzhe Cui, Bin Fu. Excellent combinations of strength-ductility and corrosion resistance in SAF 2205 duplex stainless steel with multi-scale grain distribution. *Materials Characterization*, Vol. 218, (2024) 114490.

2. Tongwei Shen, Li Feng, Yanqun Shao, Yunxiang Chen, Xiaojian Xia, Yaliang Chen, Wei Zhao. Relationship between phase transformation and corrosion performance of 2205 duplex stainless steel fabricated by laser powder bed fusion. *Materials Today Communications*, Vol. 44, (2025) 111919.

3. Zhiyuan Huang, Yiqi Zhou, Lili Li, Decheng Kong, Shuoyang Wang, Zhuangzhuang Liu, Xiaogang Li, Chaofang Dong. The pitting corrosion mechanism in additively manufactured Ni overalloyed 22Cr duplex stainless steel at different temperatures. *Construction and Building Materials*, Vol. 486, (2025) 142049.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ И РАЗРАБОТКА СОСТАВА ОДНОРОДНОГО АНТИКОРРОЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ СУДОВЫХ АЭУ

*Фомин Г.Б., к. т. н. Морозовская И.А.*

*НИИ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,*

*г. Санкт-Петербург*

В настоящее время наплавка антикоррозионных покрытий (АКП) корпусного оборудования атомных энергетических установок с реакторами водяного типа осуществляется, как правило, в два слоя автоматической электродуговой технологией ленточным электродом под слоем флюса для больших поверхностей деталей и ручной электродуговой технологией покрытыми электродами в местах, недоступных для автоматических способов. В ряде случаев применяется ленточная электрошлаковая наплавка однородного АКП, однако сварочные материалы для ручной дуговой наплавки однородного АКП подобного состава отсутствуют.

Повышение производительности процесса наплавки АКП в местах, недоступных для ленточной наплавки, может быть достигнуто за счёт применения импульсной аргонодуговой технологии взамен ручной дуговой наплавки покрытыми электродами, с обеспечением требуемого качества наплавленного металла и зоны сплавления, а также разработкой состава сварочной проволоки для наплавки однородного антикоррозионного покрытия.

Приведены результаты исследований наплавленного металла: механических свойств, содержания ферритной фазы, стойкости против МКК, микроанализа химического состава фаз (EDS) и анализа картин дифракции обратного рассеянных электронов (EBSD-анализ) в сопоставлении с распределением значений микротвердости в зоне сплавления реакторной теплоустойчивой стали перлитного класса Cr-Mo-V композиции с металлом антикоррозионного покрытия, выполненного импульсным аргонодуговым способом в различных пространственных положениях.

Также приведены результаты исследований послойного химического состава металла наплавки в зависимости от применяемой защитной газовой смеси, проведена оценка влияния содержания  $\text{CO}_2$  в газовой смеси на содержание углерода в металле антикоррозионного покрытия, и определены значения  $\text{Cr}_{\text{eq}}$  и  $\text{Ni}_{\text{eq}}$ , обеспечивающие стойкость против образования горячих трещин и существенного охрупчивания при отпусках, а также образования хрупких мартенситных структур в зоне сплавления с основным металлом – сталью перлитного класса.

## ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ МОЛНИЕЗАЩИТНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Харисова К.И., Кудрявцева А.Н., Загора А.Г., к. х. н. Долгова Е.В.,*

*Клименко О.Н., к. т. н. Гуняева А.Г.*

*НИЦ Курчатowskiй институт – ВИАМ, г. Москва*

Для защиты летательных аппаратов от воздействия молниевых разрядов всё чаще применяются полимерные молниезащитные пленочные покрытия, которые представляют собой пленку связующего с интегрированной в него металлической сеткой. Такие покрытия накладываются верхним слоем на пакет препрегов и формируются совместно. В данной работе показаны основные особенности создания эпоксидных связующих для молниезащитных покрытий.

К пленочным связующим, используемым при разработке молниезащитных покрытий, предъявляется комплекс требований таких, как высокая адгезия к препрегу, химическое сродство составов пленки связующего и препрега, а также совместимый режим отверждения. При этом особое внимание уделяется реологическим свойствам, регулируя которые возможно исключить вытекание связующего из сетки, а также обеспечить эффективное распределение связующего под давлением в процессе формования. В настоящее время наиболее востребованными являются составы на основе эпоксидных смол, что обусловлено технологичностью последних и высоким уровнем прочностных свойств получаемых полимеров.

В представленной работе в качестве основы была выбрана азотсодержащая четырехфункциональная эпоксидная смола, поэтому для обеспечения качественного совмещения связующего с медной сеткой в состав добавляли низковязкую эпоксиноволачную смолу. Было обнаружено, что при увеличении содержания последней в составе наблюдается расслоение. Выявлено, что наиболее оптимальным соотношением смол является 3:1, позволяющее получить однородную композицию с оптимальными технологическими свойствами. Помимо этого в составе связующего присутствовали смесь отвердителей аминного типа, пластификатор и дисперсный наполнитель – аэросил.

Введение в состав дисперсного наполнителя увеличивает вязкость системы, что предотвращает вытекание связующего из металлической сетки. Реологические исследования показали, что варьирование количества аэросила от 0,1 до 0,5 мас. % имеет значение только при температуре до 80 °С, дальнейший нагрев связующего не сопровождается существенным увеличением вязкости.

Исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии и термомеханический анализ показали, что температура стеклования полимерной матрицы отвержденного связующего превышает 140 °С, что дает возможность применения молниезащитного покрытия в композиционных материалах с рабочими температурами не ниже указанного значения.

В результате проведенных исследований было установлено, что состав эпоксидного связующего существенно влияет на свойства молниезащитного полимерного пленочного покрытия. Показано, что использование эпоксиноволачной смолы позволяет улучшить совмещение связующего с медной сеткой, а также использование дисперсного наполнителя дает возможность регулировать вязкость. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эпоксидных связующих для молниезащитных пленочных покрытий.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ, ПОЛУЧЕННОМ МЕТОДОМ СТП, ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЯЕМОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Zn-Mg

*Циренникова Е.И., Никулин В.Е., к. т. н. Алифиренко Е.А.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Высокопрочные термически упрочняемые алюминиевые сплавы системы Al-Zn-Mg нашли широкое применение во многих отраслях промышленности благодаря высокому соотношению прочности к весу. Основным способом соединения данных сплавов является аргодуговая сварка (АрДС). Однако при изготовлении изделий толщиной более 5 мм данный метод в большинстве случаев требует выполнения многопроходной сварки, что сопровождается повышенным тепловложением и существенным разупрочнением зоны термического влияния (ЗТВ).

Альтернативой АрДС является применение перспективного метода сварки металлов в твердой фазе – сварки трением с перемешиванием (СТП).

СТП позволяет получать качественные сварные соединения с пониженным тепловложением в сравнении с АрДС. Кроме этого, СТП позволяет избежать таких затратных этапов подготовки, как разделка кромок, а также исключает необходимость многопроходной сварки, что делает процесс значительно менее трудоемким.

Известно, что термически упрочняемые алюминиевые сплавы, хотя и свариваются методом СТП, но прочность сварных соединений после сварки на 20–30 % ниже предела прочности основного металла (ОМ). Это обусловлено природой самих сплавов, а именно растворением упрочняющих фаз и образованием пересыщенного твердого раствора, обладающего пониженной прочностью. Для повышения прочностных характеристик сварного соединения требуется проведение последующей термической обработки по режиму искусственного старения.

В рамках данной работы был подобран режим СТП алюминиевого сплава 1903 системы Al-Zn-Mg, проведены исследования фазовых превращений в разных зонах сварного соединения и проведена оценка их влияния на механические свойства после сварки и после искусственного старения.

Установлено, что термическая обработка по режиму искусственного старения позволяет получать сварное соединение с коэффициентом прочности не менее 0,8. При этом твердость в зоне перемешивания (ЗП) достигает твердости ОМ равной 130 HV. Это обусловлено выделением упрочняющих фаз во время старения из пересыщенного твердого раствора, образованного в данной зоне в процессе сварки.

При достаточной прочности разрушение локализуется в самой слабой зоне СТП соединения – ЗТВ. В данной зоне в процессе сварки происходит растворение части упрочняющих фаз, что приводит к ее разупрочнению. Твердость ЗТВ после сварки и искусственного старения в среднем составляет 100 HV.

## АНАЛИЗ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Черциев Р.О., Лаврентьев А.А.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

При сертификации высокопрочных судостроительных сталей, предназначенных в том числе для эксплуатации в арктических условиях, одним из обязательных требований является определение параметров трещиностойкости в натурной толщине проката. Параметры трещиностойкости СТОД и J-интеграла обладают свойством изменяться при варьировании размеров стандартных образцов, что является проявлением масштабного эффекта. В количественном отношении данное явление регламентируется нормативными документами, базирующимися на вероятностной модели хрупкого разрушения. Однако при переходе от образцов больших толщин к образцам меньших толщин и от низких температур к более высоким при сохранении хрупкого типа разрушения наблюдаются отклонения от стандартных поправок, обусловленные изменением напряженно-деформированного (НДС) состояния вдоль фронта трещины и наличием зон смешанного НДС. Отсутствие учета указанного фактора может приводить к ошибкам в оценке предельных температур применимости материала и снижению уровня безопасности конструкций. В связи с этим актуальной представляется задача уточнения механических составляющих масштабного эффекта с привлечением методов численного моделирования, позволяющих оценить вклад различных зон фронта трещины в измеряемые параметры и повысить достоверность прогноза характеристик.

Цель работы – количественная оценка ширины переходной зоны от плоского напряженного состояния (ПНС) на боковых поверхностях образца к плоской деформации (ПД) в его середине и установление её прямой связи с экспериментально наблюдаемой шириной «губ среза» при различных уровнях нагружения, толщинах образцов и механических характеристиках стали. Для достижения цели разработана объёмная упругопластическая модель в ANSYS Mechanical APDL с учётом геометрической нелинейности и притупления вершины трещины, обеспечивающая детальное воспроизведение полей напряжений и деформаций в зоне процесса.

Исследования выполнены на высокопрочной низкоуглеродистой стали с пределом текучести близким к 1000 МПа при температурах -20 и -60 °С на SENB образцах с надрезом толщиной 14 и 40 мм. Установлено, что при полностью хрупком изломе сдвиг температурной зависимости трещиностойкости вдоль температурной оси согласуется с положениями ГОСТ Р 59115.6-2021. Однако при наличии в изломе зон ПНС, проявляющихся в виде губ среза, наблюдается дополнительный сдвиг температурной зависимости трещиностойкости, не описываемый стандартными соотношениями. Полученные данные свидетельствуют о необходимости учета особенностей напряженного состояния на фронте трещины при оценке применимости материала. Результаты исследования вносят вклад в понимание механизмов масштабного эффекта и могут быть использованы при разработке методик сертификационных испытаний, а также при уточнении масштабных поправок для конструкционных сталей, работающих в условиях низких температур, в том числе при обосновании замены образцов натурной толщины испытаниями образцов с меньшей толщиной.

## **К УТОЧНЕНИЮ ОЦЕНОК СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЯЗКОМУ И ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ ПРОКАТА СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ И ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ**

*Чечель Е.Г., Бараков Д.Р., д. т. н. Филин В.Ю.*

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Обеспечение сопротивления распространению вязкого и хрупкого разрушения является одной из ключевых задач при оценке работоспособности конструкций из судостроительных и трубных сталей, эксплуатируемых при низких климатических температурах. В связи с этим актуальна задача перехода от качественных оценок хладостойкости материалов к количественным характеристикам энергоемкости разрушения образцов, например, испытываемых падающим грузом по методике DWTT. Для этого разрабатываются расчетные методики нормирования требуемой работы разрушения на основе численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ).

В ранее выполненных работах рассмотрены различные подходы к моделированию процессов конкурирующего вязкого и хрупкого разрушения при совместном использовании условий, соответствующих наступлению разрушения каждого вида. Предложена модель распространения и торможения трещины в крупногабаритных конструктивных элементах. Разработаны корреляции между температурами вязко-хрупкого перехода, определяемыми различными методиками испытаний, и температурой торможения трещины. Существенное внимание уделено анализу известных формул оценки работы вязкого разрушения образцов DWTT, а также разделению работы зарождения и распространения трещины. Показана недостаточная обоснованность применения критерия вязкого разрушения СТОА (критического угла раскрытия вершины трещины), определяемого при испытании образцов DWTT, как характеристики энергоемкости распространения разрушения.

К настоящему времени в рамках расчетных исследований МКЭ рассмотрены пять вариантов условий вязкого и хрупкого разрушения. Выполнены калибровка и уточнение условия хрупкого разрушения – достижения критического значения жесткости напряженного состояния (силовой критерий) с учетом недоработок в ранних моделях. Одновременно проводится исследование условия вязкого разрушения срезом – достижения критического значения накопленной пластической сдвиговой деформации, ранее подробно не анализировавшегося. Разрабатываемые модели позволяют учитывать особенности разрушения материала в поверхностных слоях и центральной части образца, а также влияние конкурирующих механизмов разрушения на процесс распространения трещины.

Экспериментальная работа состоит из двух частей. Первая ориентирована на изготовление образцов и исследование энергоемкости разрушения образцов DWTT проката из судостроительной стали нормальной прочности марки E, поскольку, в отличие от трубных сталей, известные формулы некорректно оценивают работу разрушения стали с пределом текучести менее 500 МПа. Также будет установлена связь между поглощенной энергией и характеристиками излома. Вторая часть посвящена анализу возможного изменения свойств корпусных сталей при ударных скоростях воздействия.

Перспективы дальнейших исследований связаны с уточнением корреляций между температурами вязко-хрупкого перехода, определенными по различным методикам (NDT, DWTT,  $T_{KB}$ ) и пересмотром требуемых температурных запасов по каждому виду испытаний для совершенствования нормативных требований к материалам конструкций морской техники и магистральных трубопроводов.

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ПРОВОЛОКОЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МАРОК ТС6 И СПТ-2**

**Чугунов Е.М.**

*АО «Центральный научно-исследовательский институт материалов имени Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург*

Титановым сплавам в мировой и отечественной промышленности уделяется большое внимание, обусловленное совокупностью их уникальных физико-химико-механических свойств. Для изготовления мелкосерийных или единичных заготовок и изделий традиционными методами требуется сложная механическая обработка, длительное время производства и значительное количество отходов. Электронно-лучевая наплавка в вакууме является основой для последующей разработки аддитивной технологии получения прогрессивных заготовок из титановых и других сплавов на основе химически активных и тугоплавких металлов. Аддитивное производство электронно-лучевым методом отличается совокупностью высокой производительности, возможности изготавливать крупногабаритные изделия и высоким коэффициентом использования материала. Помимо необходимой защиты сварочной ванны от вредного газонасыщения также улучшаются условия кристаллизации наплавленного металла.

Целью исследования была разработка технологии получения прогрессивных заготовок с заданным комплексом механических свойств.

Задачи работы:

- Модернизация установки Электронно-лучевой ЭЛУ-20А для возможности прецизионной наплавки;
- Подбор режимов наплавки;
- Получение механических характеристик.

Работа проводилась на установке ЭЛУ-20А в отделе сварочных материалов и технологий АО «ЦНИИМ».

Для выполнения наплавки установка была доукомплектована:

- двухкоординатным столом перемещения заготовки в горизонтальной плоскости;
- механизмом подачи проволоки на переднюю границу сварочной ванны.

Одновременно была доработана система управления и синхронизации отдельных функциональных элементов установки.

В результате исследования была разработана технология электронно-лучевой наплавки проволоками диаметром 1,0–1,5 мм из сплавов средней (СПТ-2) и высокой (ТС6) прочности. Механические свойства наплавленного металла соответствуют уровню механических свойств сварных соединений этих сплавов.

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НИКЕЛЕВОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА HAYNES 230, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

*Шабунина С.С., Дмитриева А.В., к. т. н. Степанов Н.Д.  
Институт лазерных и сварочных технологий (ИЛСТ СПбГМТУ),  
г. Санкт-Петербург*

Одним из актуальных направлений современных науки и техники применение аддитивных технологий для снижения затрат производстве деталей сложной формы. Так, технология прямого лазерного выращивания (ПЛВ) позволяет снижать количество технологических операций, и оптимизировать внутреннюю структуру деталей. Одним из наиболее перспективных материалов для использования в ПЛВ являются жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС). Для достижения требуемых механических свойств ЖНС подвергают термической обработке, необходимой для снятия остаточных напряжений, гомогенизации состава и, в случае дисперсионно-твердеющих сплавов, выделения упрочняющих фаз. Изделия, полученные методами аддитивного производства, часто нуждаются в корректировке рекомендуемых для материала режимов термической обработки в связи с спецификой их структуры.

Настоящая работа посвящена изучению структуры, фазового состава и механических свойств никелевого сплава Haynes 230, полученного методом ПЛВ, на разных этапах термической обработки. В ходе исследования было изучено влияние отжига при температуре 1200 °С в течение 2 часов с последующим охлаждением на воздухе на макро- и микроструктуру, фазовый состав, а также на механические свойства материала. Методы исследований включали оптическую металлографию, сканирующую электронную микроскопию с энергодисперсионным анализом и анализом дифракции обратно отражённых электронов (EBSD), рентгенофазовый анализ, статические механические испытания при комнатной температуре и повышенной температуре.

В результате работы установлено, что структура сплава Haynes 230 после прямого лазерного выращивания имеет характерное «чешуйчатое» строение и содержит незначительную газовую пористость (около 0,03%). При помощи EBSD анализа была выявлена повышенная плотность дефектов кристаллического строения по границам валиков. До термической обработки наблюдается незначительная сегрегация хрома и молибдена по границам ячеек. После отжига в структуре формируются карбидные частицы типа  $M_6C$  на основе вольфрама и молибдена размером 0,7–2,5 мкм, которые располагаются преимущественно по границам зёрен. Твёрдость материала снижается с 281 HV до 249 HV, предел прочности составляет 915 МПа (горизонтальное направление) и 883 МПа (вертикальное направление), а относительное удлинение возрастает до 35–38%, что превышает требования технической документации на сплав Haynes 230. Сочетание технологии прямого лазерного выращивания и последующей термической обработки обеспечивает сплаву Haynes 230 высокие механические свойства, что позволяет применять его для производства ответственных деталей в авиационном двигателе-строении.

*Исследование было выполнено в рамках проекта Российского Научного Фонда №25-79-30012*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОМПАКТИРОВАННОМ ТИТАНОВОМ ПСЕВДО- $\beta$ -СПЛАВЕ

*Широкая Я.И., к. х. н. Титова А.Д., Гаранина И.М.  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург*

Титановые сплавы обладают большим рядом свойств (высокая прочность, небольшой удельный вес, высокая коррозионная стойкость), обуславливающим их широкое применение в различных областях промышленности и медицине [1, 2].

Широкий спектр применения титановых сплавов формирует потребность в использовании методов изготовления, обеспечивающих их высокое качество. Одним из таких методов является метод горячего изостатического прессования (ГИП) порошковых материалов, позволяющий путем одновременного действия высокой температуры и давления на заготовку получать качественный, химически однородный, плотный беспористый материал [3].

Цель работы заключается в исследовании высокопрочного титанового псевдо- $\beta$ -сплава, изготовленного из порошкового материала методом ГИП, с использованием методов атомно-эмиссионной спектроскопии и растровой электронной микроскопии для определения влияния температурного режима ГИП ( $T_{\text{ни}}$  -30,  $T_{\text{ни}}$ ,  $T_{\text{ни}}$  +50) на однородность распределения легирующих элементов в конечной заготовке.

Исследование проводилось в три этапа: определение общего химического состава методом оптико-эмиссионной спектроскопии с использованием спектрометра «ДФС-500»; разработка методики пробоподготовки и анализа с последующим определением объемного химического состава методом атомно-эмиссионной спектроскопии с азотной микроволновой плазмой на спектрометре «Agilent MP-AES 4210»; анализ микроструктуры образцов методом рентгеноспектрального микроанализа на растровом электронном микроскопе «Tescan Mira».

Результаты определения среднего химического состава и исследования микроструктуры образцов титанового псевдо- $\beta$ -сплава показали, что температурный режим ГИП не оказывает прямого влияния на однородность распределения легирующих элементов в материале. Однако режим компактирования влияет на формирование микроструктуры: размер зерна и распределение фаз. Именно однородность фазового распределения определяет однородность распределения легирующих элементов.

1. Легирование, фазовый состав и механические свойства титановых сплавов / Польшкин И. С., Егорова Ю. Б., Давыденко Л. В. // *Металловедение*. – 2022. – №2. – с. 4-13

2. Морские титановые сплавы – настоящее и будущее / Горынин И. В., Орыщенко А. С., Леонов В. П., Кудрявцев А. С., Михайлов В. И., Чудаков Е. В. // *Вопросы материаловедения*. – 2014. – №2 (78). – с. 36-47

3. Hot isostatic pressing of metal powders // *ASM Handbook, Volume 7: Powder Metal Technologies and Applications* / Eds. P. Samal, J. Newkirk. – 10th ed. – Materials Park (OH): ASM International, 2015. – p. 131-138

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН НЕСТАБИЛЬНОСТИ СВОЙСТВ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ

*Шнайдер С.Р.*

*АО «Центральный научно-исследовательский институт материалов  
имени Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург*

В настоящее время в связи с санкционными ограничениями, на ряде заводов произошли изменения, связанные с переходом на новые типы сырья и новое оборудование для производства сталей и сплавов. При этом требования нормативной документации к качеству выпускаемой продукции остались прежними и несмотря на переход к новым сырьевым материалам, они обеспечиваются производителями. В то же время нами наблюдается нестабильность значений ряда свойств, изменение которых влечет за собой сокращения потенциально возможных сфер его применения.

Основная задача исследования – определение причин нестабильности свойств мартенситностареющей стали и создание научно-технического задела для совершенствования мартенситностареющих сталей при использовании сырья, поставляемого на заводы в настоящее время.

Исследования проводили на образцах из деформированной заготовки мартенситностареющей стали после проведения термической обработки (старения).

Методы исследования.

- Определение вида излома на остатках ударных образцов, отобранных от заготовки и характера разрушения образцов;
- Фрактография остатков ударных образцов;
- Определение загрязненности металла неметаллическими включениями (НВ) на шлифованных образцах по ГОСТ 1778-2022;
- Определение микроструктуры образцов по ГОСТ 8233-56;
- Определение величины зерна на травленных образцах.

По результатам исследования определены показатели качества проведения термической обработки и выплавки стали.

Выводы.

По результатам исследования выдвинуто предположение возникновения нестабильности значений свойств – изменение шихтовых материалов, требующих уточнения параметров (режима) проведения технологического процесса выплавки.

## **РАЗРАБОТКИ НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ В ОБЛАСТИ ТЕРМОСТОЙКИХ СВЯЗУЮЩИХ И КЛЕЕВ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПКМ**

***Шошева А.Л., Ахмадиева К.Р., к. х. н. Долгова Е.В.**  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва*

Одним из приоритетных направлений современного авиационного материаловедения выступает разработка высокотемпературных полимерных композиционных материалов на основе термореактивных связующих. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых термостойких полимерных связующих, отвечающих непрерывно растущим требованиям по тепло-, термо- и огнестойкости, механическим характеристикам и технологичности. НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ обладает многолетним опытом в разработке термостойких связующих для получения высокотемпературных ПКМ.

К числу перспективных классов термореактивных связующих, обеспечивающих высокие технологические и эксплуатационные свойства, относятся цианэфирные связующие. Доступность исходного сырья, безопасность работы с ними, относительная низкая температура плавления делает циановые эфиры перспективным классом для создания конструкционных ПКМ. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана серия цианэфирных связующих, перерабатываемых по автоклавной и безавтоклавной технологиям. Разработано связующее марки ВСТ-1208 с рабочей температурой до 170 °С, перерабатываемое по препреговой технологии, для прессования и автоклавного формования. Цианэфирные связующие марок ВСТ-1210 и ВСТ-60 с рабочей температурой 200 °С и 250 °С, соответственно, используются для получения ПКМ методами вакуумной инфузии и пропитки под давлением. Материалы на их основе могут использоваться как в аэрокосмической промышленности в обтекателях и подложках антенн, благодаря низким значениям диэлектрической проницаемости, так и при производстве деталей теплонагруженных элементов различных конструкций. Также разработан цианэфирный клей марки ВК-97, который обеспечивает прочность клеевых соединений при сдвиге при склеивании металлических материалов на уровне 17–21 МПа при температурах испытания 20 °С и 200 °С.

К классу термостойких также относятся бисмалеимидные и полиимидные связующие, в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработано бисмалеимидное связующее марки ВСТ-71, перерабатываемое по препреговой технологии. Связующее марки ВСТ-71 имеет температуру начала термоокислительной деструкции не менее 400 °С и температуру стеклования не менее 270 °С, что позволяет эксплуатировать композиционные материалы на его основе до 220 °С. Помимо термостойкости, ПКМ основе бисмалеимидного

связующего марки ВСТ-71 имеют высокие показатели механических свойств. Разработанное полиимидное связующее полимеризационного типа марки ВС-51, позволяет получать угле- и стеклопластики методом автоклавного или прессового формования с рабочей температурой до 300 °С. Преимуществом ПКМ на основе полиимидного связующего марки ВС-51 являются более высокие физико-механическими свойства по сравнению с ПКМ на основе растворных полиимидных связующих. Для изготовления многослойных конструкций из высокотемпературных материалов были разработаны бисмалеимидный пленочный клей марки ВК-109 с рабочей температурой до 220 °С и полиимидный пленочный клей марки ВК-103 с температурой эксплуатации до 300 °С. Клей марки ВК-103 рекомендуется для склеивания стали, титановых сплавов и многослойных конструкций из углепластика и стеклопластика на основе полиимидного связующего марки ВС-51. Клеевые соединения на основе клея марки ВК-103 стойки к воздействию влаги, тропического климата, химических сред и прочностные характеристики после воздействия составляют не менее 68 % от исходных значений. ПКМ на основе бисмалеимидных и полиимидных связующих являются перспективными материалами для изготовления теплонагруженных элементов конструкций авиационно-космической техники.

## ЭРОЗИОННОСТОЙКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ КАМЕР СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*Шербак П.В., Трубин Д.А.*

*АО «Центральный научно-исследовательский институт материалов  
имени Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург*

АО «ЦНИИМ» более 30 лет является единственным производителем в России керамического материала на основе гексагонального нитрида бора марки БГП-10, используемого при изготовлении электроразрядных камер стационарных плазменных двигателей (СПД), выпускаемых калининградским АО «ОКБ «Факел» (входит в интегрированную структуру НПО «Энергомаш» ГК «Роскосмос»).

Однако для нового поколения двигателей с высокой мощностью разряда, материал БГП-10 не может обеспечить требуемый ресурс эксплуатации из-за увеличения интенсивности эрозии стенок.

Таким образом, была сформулирована основная тема работы: «Разработка и исследование двухфазного керамического материала на основе гексагонального нитрида бора, обеспечивающего повышенную эрозионную стойкость материала электроразрядной камеры СПД к воздействию электронной компоненты плазмы, с целью увеличения ресурса работы двигателя».

В ходе работы методом горячего прессования были изготовлены образцы керамических материалов на основе гексагонального нитрида бора с добавлением различных активаторов спекания, исследованы их физико-механические и теплофизические свойства, проведены испытания на эрозионную стойкость

При отработке режимов горячего прессования керамических композиций, были определены оптимальные параметры получения материалов на имеющемся оборудовании.

На основании выявленного в ходе разработки материала изобретательского уровня и возможности его технической реализации, получен патент на изобретение РФ № 2854092 «Керамический материал и способ его изготовления».

*Подписано в печать 11.06.2026 Формат 60x48 1/16.  
Печать – офсетная. Усл. п. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1.05.  
Тираж 120 экз. Заказ № 2/58  
Отпечатано в типографии  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»  
191015, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49  
Лицензия на полиграфическую деятельность  
Лр № 020644 от 13 октября 1997г.*



