

№1
(107)
2022

ISSN 2307-6046



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов



ТРУДЫ ВИАМ



ТРУДЫ ВИАМ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С 2013 ГОДА

№ 1 (107) январь 2022

Учредитель периодического издания:

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакционный совет

Председатель совета – главный редактор:

Каблов Е.Н. академик РАН, профессор (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Заместитель председателя совета – заместитель главного редактора:

Антипов В.В. докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Члены совета:

Гейкин В.А. докт. техн. наук, профессор (АО «ОДК»)

Демонис И.М. канд. техн. наук

Кокорин В.Н. докт. техн. наук, профессор (Ульяновский государственный технический университет)

Лаптев А.Б. докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Леонтьев Л.И. академик РАН, профессор (РАН)

Ночовная Н.А. докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Пенязьков О.Г. академик НАН Беларуси, профессор (Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, Беларусь)

Петрова А.П. докт. техн. наук, профессор (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Райтер Г. докт. наук (ALD Vacuum Technologies GmbH, Германия)

Старцев В.О. докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Стороженко П.А. чл.-корр. РАН, профессор (АО «ГНИИХТЭОС»)

Тимофеев А.Н. докт. техн. наук (ОАО «Композит»)

Аграфенина Е.А. ответственный секретарь (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Издатель: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакция:

редакторы – Е.А. Аграфенина, Ю.В. Коломиец;
корректор – И.С. Туманова; верстка – М.С. Закржевская

Адрес редакции:

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, 17
Тел.: +7 (499) 263-89-50, +7 (499) 263-87-37; факс: +7 (499) 267-86-09;
e-mail: admin@viam.ru; сайт: <http://viam-works.ru>

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77-52548 от 21.01.2013 г.

Распространяется бесплатно посредством информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал входит в Международную ассоциацию издателей

(PILA – Publishers International Linking Association) и участвует в проекте CrossRef.

Всем статьям, публикуемым в журнале, присваиваются индексы DOI (Digital Object Identifier).

ТРУДЫ ВИАМ

TRUDY VIAM

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Жаропрочные сплавы и стали

Богачев И.А., Сухов Д.И., Ходырев Н.А., Куркин С.Э. Исследование режимов синтеза поддерживающих структур деталей, получаемых методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta

3 Bogachev I.A., Sukhov D.I., Khodyrev N.A., Kurkin S.E. Investigation of the supports structures' printing parameters for parts obtained by selective laser melting of metal powder composition of the Co–Cr–Ni–W–Ta alloy

Скугорев А.В., Капитаненко Д.В. Деформационная обработка труднодеформируемых сплавов с памятью формы систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr

14 Skugorev A.V., Kapitanenko D.V. Deformation treatment of hard-to-deform Ni–Ti–Nb and Ni–Ti–Nb–Zr shape memory alloys

Легкие сплавы

Карачевцев Ф.Н., Ерошкин С.Г., Трофимов Н.В., Леонов А.А., Поповнина Н.А. Разработка стандартных образцов состава магниевого сплава МЛ19

26 Karachevtsev F.N., Eroshkin S.G., Trofimov N.V., Leonov A.A., Popovnina N.A. Development of standard samples of magnesium alloy ML19

Полимерные материалы

Прокопова Л.А. Применение ангидрида фталевой кислоты для определения массовой доли гидроксильных групп в полиэфире 24К

35 Prokopova L.A. Phthalic anhydride application for hydroxyl groups contents determination in polyester 24K

Композиционные материалы

Бобровский А.П., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н., Худнев А.А. Получение сферических гранул высокотемпературного металлического композиционного материала на основе молибдена

44 Bobrovskiy A.P., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N., Khudnev A.A. Production of spherical granules of a high-temperature metal composite material based on molybdenum

Валуева М.И., Евдокимов А.А., Начаркина А.В., Губин А.М. Полимерные композиционные материалы и технологии в автомобилестроении (обзор)

53 Valueva M.I., Evdokimov A.A., Nacharkina A.V., Gubin A.M. Polymer composite materials and technologies in the automotive industry (review)

Light-metal alloys

Polymer materials

Composite materials

Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Особенности технологии и полимерные композиционные материалы для изготовления крыльев перспективных самолетов (обзор)

66 Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Features of technology and polymer composite materials for the manufacture of wings of advanced aircraft (review)

Серпова В.М., Няфкин А.Н., Курбаткина Е.И. Гибридные металлические композиционные материалы на основе меди (обзор)

76 Serpova V.M., Nyafkin A.N., Kurbatkina E.I. Hybrid metal matrix composites based on copper (review)

Защитные и функциональные покрытия

Protective and functional coatings

Власова О.В., Денисова В.С., Закалашный А.В., Солнцев С.С. Электроизоляционная термостойкая бессвинцовая эмаль для защиты элементов радиоэлектронной аппаратуры

88 Vlasova O.V., Denisova V.S., Zakalashniy A.V., Solntsev S.S. Electrical insulating heat-resistant lead-free enamel for the protection of electronic equipment

Испытания материалов

Material tests

Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А., Рыжков П.В. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175

97 Hodinev I.A., Gorbovets M.A., Monin S.A., Ryzhkov P.V. Low-cycle fatigue at elevated temperatures of heat-resistant nickel-based alloy manufactured by selective laser melting

Шершак П.В., Яковлев Н.О., Орешко Е.И. Применение оптических датчиков деформации для оценки деформативности образцов из полимерных композиционных материалов вблизи концентраторов напряжений

111 Shershak P.V., Yakovlev N.O., Oreshko E.I. Application of optical deformation sensors for estimating the deformativity of CFRP samples near the stress concentrators

Кривушина А.А., Старцев В.О. Микромицеты-деструкторы полимерных материалов среди экстремофильных микроорганизмов (обзор)

123 Krivushina A.A., Startsev V.O. Micromycetes-destructors of polymeric materials among extremophilic microorganisms (review)

**Конференции
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ**

**Conferences of
NRC «Kurchatov Institute» – VIAM**

Решение Всероссийской научно-технической конференции «Функциональные и полимерные материалы для авиационного остекления»

135 The solution of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Functional and Polymer materials for aviation glazing»

Научная статья

УДК 538.9:624.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-3-13

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СИНТЕЗА ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ СТРУКТУР ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ СПЛАВА СИСТЕМЫ Co–Cr–Ni–W–Ta

*И.А. Богачев¹, Д.И. Сухов¹, Н.А. Ходырев¹, С.Э. Куркин¹*¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Изучены особенности сплавления поддерживающих структур деталей из металлопорошковой композиции сплава на основе системы Co–Cr–Ni–W–Ta, изготавливаемых методом селективного лазерного сплавления. В качестве основного типа поддержек, применяемых для печати большинства сложнопрофильных конструкций, для проведения исследований выбран блочный тип. Проведен анализ расширенных технологических параметров печати поддерживающих структур, включая задержки движения лазерного луча при изменении траектории сканирования, начала и конца печати треков, перехода между треками, определено их влияние на качество изготовления поддержек, а также выбран оптимальный режим печати.

Ключевые слова: сплав на основе кобальта, селективное лазерное сплавление, поддерживающие структуры, параметры процесса, схема сканирования, структура трека

Для цитирования: Богачев И.А., Сухов Д.И., Ходырев Н.А., Куркин С.Э. Исследование режимов синтеза поддерживающих структур деталей, получаемых методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-3-13.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE SUPPORTS STRUCTURES' PRINTING PARAMETERS FOR PARTS OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING OF METAL POWDER COMPOSITION OF THE Co–Cr–Ni–W–Ta ALLOY

*Igor. A. Bogachev¹, Dmitry I. Sukhov¹, Nikita A. Khodyrev¹, Sergey E. Kurkin¹*¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: Features of the supports structures' processing for parts made of a metal-powder composition based on the Co–Cr–Ni–W–Ta system, manufactured by selective laser melting method, have been studied. As the main type of supports used for printing various types of parts, the block type was selected for the research. The analysis of advanced technological parameters of printing support structures, including delays of the laser beam movement when changing the trajectory, the beginning and end of the tracks, the transition between the tracks were held. Influence of the parameters on the quality of manufacturing supports was determined and optimal parameters for printing supports were selected.

Keywords: cobalt-based alloy, selective laser melting, supports structures, process parameters, scanning scheme, track structure

For citation: Bogachev I.A., Sukhov D.I., Khodyrev N.A., Kurkin S.E. Investigation of the supports structures' printing parameters for parts obtained by selective laser melting of metal powder composition of the Co–Cr–Ni–W–Ta alloy. Trudy VIAM, 2022, no. 1 (107), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-3-13.

Введение

Аддитивные технологии, начав свое развитие как метод быстрого послойного прототипирования объектов с использованием пластиков и полимеров различной морфологии и составов, быстро нашли применение в различных областях промышленности, трансформировавшись в том числе под изготовление металлических деталей [1]. Несмотря на то, что данные технологии постоянно совершенствуются, определенные технологические проблемы, связанные с использованием материалов, возможностями оборудования, геометрическими ограничениями на изготавливаемые изделия, управлением и моделированием процессов, оказывают влияние на их развитие [2]. В настоящее время технологии послойного синтеза с применением металлических порошков занимают значительную долю рынка аддитивного производства. Самым распространенным методом аддитивных технологий является селективное лазерное сплавление (СЛС), заключающееся в послойном нанесении металлопорошковой композиции (МПК) и ее последующем выборочном сплавлении при помощи лазерного излучения в соответствии с текущим сечением 3D-модели [3].

Необходимость применения поддерживающих структур при изготовлении деталей методом послойного синтеза является одним из сложных аспектов аддитивного производства. Высокая плотность энергии лазерного излучения в методе СЛС, сконцентрированная в локальном объеме зоны сплавления, в сочетании с высокой скоростью кристаллизации синтезированного материала [4, 5] приводит к возникновению большого теплового градиента между различными областями изготавливаемой детали и может являться причиной высоких внутренних термических напряжений в материале [6, 7]. Последние могут вызывать деформации и искажение геометрической формы изделия, приводить к возникновению дефектов при отделении детали от платформы построения и к образованию трещин в процессе постобработки детали (рис. 1).



Рис. 1. Искажение геометрической формы деталей вследствие больших внутренних напряжений, а также при печати поверхностей под углом больше критического

Вместе с тем сама форма детали, в частности сложнопрофильных навесных элементов или наклонных стенок, расположенных под углом больше критического, также может способствовать искажению ее геометрии. Частично данная проблема решается применением специальных поддерживающих структур, которые подводят к критическим поверхностям детали и в процессе печати жестко соединяют их с плитой построения. В результате поддерживающие структуры работают как элемент теплоотвода, предохраняющий локальную область от перегрева, а также как бандаж, предотвращающий геометрические искажения детали в процессе печати [8]. Необходимость в поддерживающих структурах является одним из ограничивающих факторов метода СЛС. Они вносят дополнительные требования к геометрической форме изготавливаемых деталей, увеличивают время построения и последующие производственные затраты на их удаление и зачистку поверхности деталей, а также снижают качество поверхностей, к которым они подводились [9].

Поскольку поддерживающие структуры создают еще на этапе подготовки 3D-модели детали к процессу синтеза, важную роль в их эффективности играет правильное расположение, выбранный тип, параметры структуры и другие свойства, которые определяют на этапе их моделирования. Инструменты, позволяющие проводить это моделирование, крайне важны для аддитивного производства. Как правило, программное обеспечение, настроенное для работы с 3D-моделями под аддитивное производство, имеет достаточно широкий набор параметров и функций построения поддерживающих структур. Например, модуль генерации поддержек программы Materialise Magics имеет базу широкого спектра поддерживающих конструкций, включая самые распространенные и часто используемые блочные (рис. 2, а), контурные (рис. 2, б), линейные (рис. 2, в) и некоторые другие, менее используемые, виды поддержек [10].

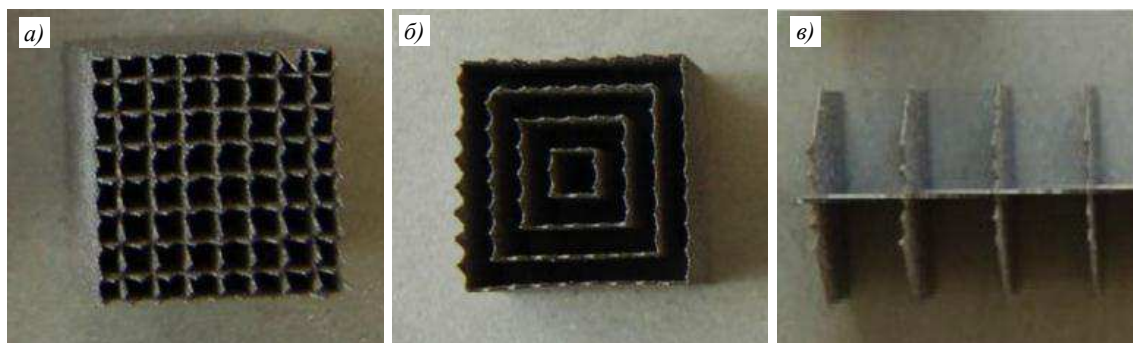


Рис. 2. Основные типы поддерживающих структур в методе селективного лазерного сплавления

Среди всех типов поддерживающих конструкций, показанных на рис. 2, наиболее распространенным для метода СЛС является блочный тип. Этот тип поддержек состоит из прямоугольных тонких стенок, взаимно перпендикулярно пересекающихся друг с другом, с заданным расстоянием между ними. Они могут иметь так называемые перфорации для облегчения конструкции, уменьшения количества используемого порошка и упрощения удаления порошка из массива поддержек, а также различные виды начальных и конечных областей, подходящих непосредственно к плите построения или самой детали, в виде сплошного массива, зубцов, пинов и т. д. В модуле генерации поддерживающих структур при моделировании эти поддержки задаются как плоскости нулевой толщины, которые установка СЛС при печати формирует в виде послойно наложенных друг на друга единичных треков. Режимы сканирования этих треков имеют существенные отличия от сканирования сечения основного материала или контура. При этом влияние расширенных параметров (тонких настроек) движения, поворота и задержек включения лазерного луча на поддержках выражено сильнее.

При учете указанных технологических особенностей цель работы – оптимизация режимов печати поддерживающих структур блочного типа для сплава на основе кобальта системы Co–Cr–Ni–W–Ta [11, 12]. Этот сплав является достаточно технологичным для использования в методе СЛС. Из жаропрочных сплавов, подобных рассматриваемому, изготавливают ответственные детали газотурбинного двигателя (ГТД) [13, 14]. Однако в сплаве при печати возникают значительные термические напряжения, что накладывает дополнительные требования к виду и режимам синтеза поддерживающих структур [15–17].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [18].

Материалы и методы

Для печати поддерживающих структур и образцов в работе использована МПК жаропрочного сплава на основе кобальта системы Co–Cr–Ni–W–Ta с рабочей температурой 1100 °С (фракции размером 10–63 мкм). Основа сплава состоит из следующих элементов, % (по массе): 49–53 Co; 20–30 Cr и 7–10 Ni. Углерод как основной упрочняющий элемент, образующий в структуре материала карбиды, содержится в сплаве в количестве до 0,25 % (по массе) [14]. Выплавку прутковых шихтовых заготовок проводили в вакуумной индукционной печи VIM150. Для снижения влияния вредных примесей и дополнительного раскисления при вакуумно-индукционной выплавке добавляли La и Mg в количествах, принятых в практике металлургии жаропрочных сплавов. Металлопорошковая композиция сплава получена методом газовой атомизации расплава на установке HERMIGA 10/100 VI. Рассев МПК по фракциям проводили с использованием ситового анализатора A20/4 на базе вибропривода ВП 50. Осуществляли также отделение тонкой фракции (<10 мкм) на газодинамическом сепараторе (классификаторе) установки HERMIGA.

Процесс СЛС проводили на установке Concept Laser M2 Cusing (Германия). Базовые параметры режима сплавления (скорость сканирования и мощность лазера) не меняли в ходе выполнения работы. Линейная плотность энергии при формировании трека составила 0,1 Дж/мм. Толщину слоя выбрали 30 мкм. Среди доступных для изменения тонких настроек построения поддерживающих структур на установке Concept Laser M2 Cusing определяющими являются те, которые характеризуют задержки движения и включения луча лазера при проходе заданного участка области сканирования и переходов от одного участка к другому. Описание основных настроек показано в таблице

Описание тонких настроек режима сплавления поддерживающих структур

Параметр	Описание
Delay Beam On	Задержка включения луча лазера в начале вектора экспозиции
Delay Beam Off	Задержка выключения луча лазера в конце вектора экспозиции
Delay Corners	Задержка движения луча лазера при повороте вектора экспозиции
Jump Delay	Задержка включения луча лазера при переходе от одного участка экспозиции к другому
Mark Delay	Задержка выключения луча лазера при переходе от одного участка экспозиции к другому

Задержки – это периоды (в мс) между включением или выключением лазера и ускорением или замедлением отклоняющих зеркал. Эти периоды имеют прямое влияние на структуру трека, поскольку векторы экспонирования активируют отклоняющие зеркала системы позиционирования луча, которые имеют физические ограничения по скорости изменения траектории, а включение и выключение лазерного луча при этом управляются источником излучения практически мгновенно и их работа должна быть синхронизирована. Эти задержки компенсируют отрицательные эффекты, которые могут возникнуть при ускорении и замедлении отклоняющих зеркал. Изменение продолжительности экспозиции при ускорении или замедлении, т. е. в начале или в конце вектора экспозиции, приводит к увеличению или уменьшению плотности энергии на единицу длины трека при постоянной мощности лазера. Поскольку начало и конец векторов экспонирования обычно находятся на конечных участках схемы сканирования, повышенное энерговыделение приводит к образованию наплывов, переплавов, задигов и других неоднородностей трека. Чтобы избежать этих эффектов, лазер следует включать только в том случае, если отклоняющие зеркала работают с заданной скоростью.

В качестве базовых значений параметров задержек, на основе которых сформирована сетка эксперимента, выбраны предустановленные значения установки Concept Laser M2 Cusing для штатного режима сплавления жаропрочных сплавов. Значения для параметров Delay Beam On и Delay Beam Off заданы в диапазоне от 0,1 до 2 мс, для параметра Delay Corners – от 0,1 до 3 мс, для параметров Jump Delay и Mark Delay – от 0,1 до 5 мс. Для оценки результатов фотографии образцов получены с использованием растровой электронной микроскопии на микроскопе Verios 460 XHR.

Результаты и обсуждение

Параметры задержки включения и выключения луча лазера в начале и в конце непрерывного участка схемы сканирования (Delay Beam On и Delay Beam Off) определяют форму и структуру трека на этих оконечных отрезках (рис. 3).

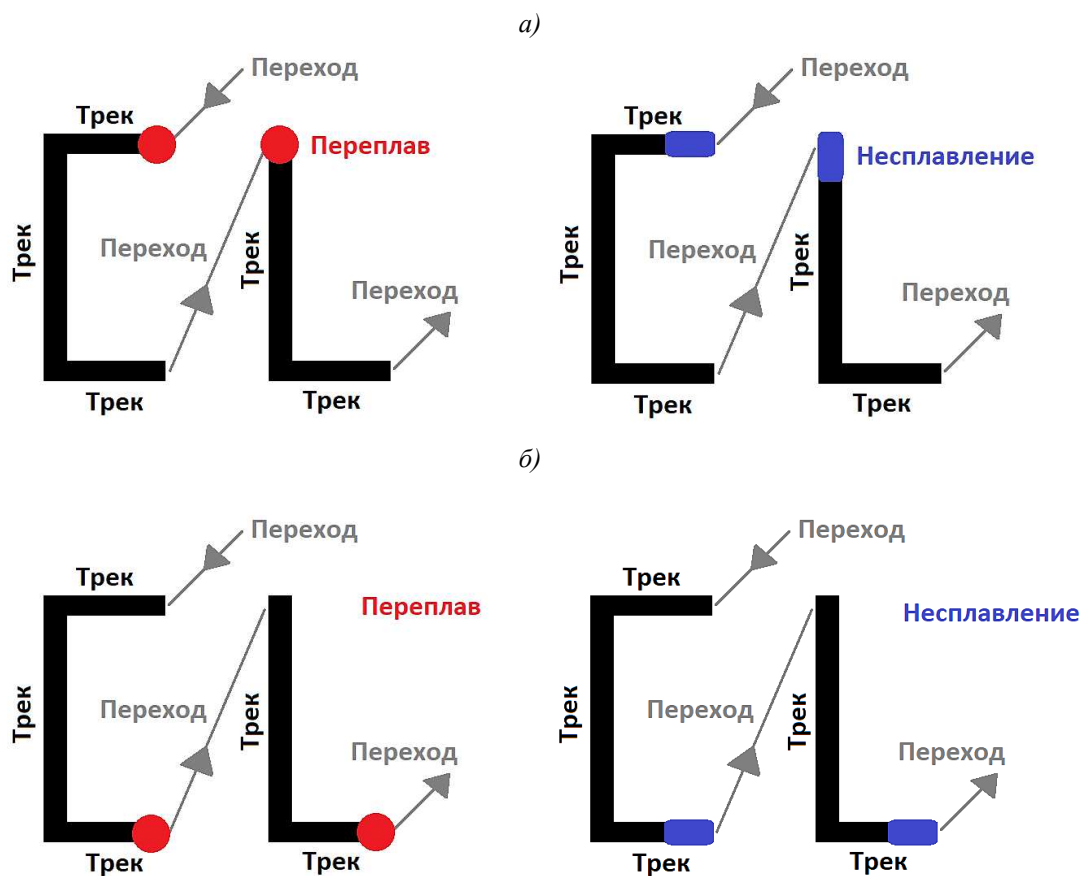


Рис. 3. Схема влияния задержек Delay Beam On (a) и Delay Beam Off (б) на структуру трека

При использовании данных схем задержки вектор экспонирования заданного участка блокируется отклоняющими зеркалами и лазерный луч включается с задержкой. Это означает, что первая часть вектора экспозиции не будет экспонироваться лазером. По окончании вектора экспозиции лазерный луч отключается с задержкой. Это означает, что отклоняющие зеркала больше не будут открываться при замедлении. Следовательно, последняя часть вектора экспозиции не будет экспонирована.

Анализ полученных образцов позволяет установить следующее: если значение параметра Delay Beam On мало, то на начальном отрезке непрерывного участка происходит перепплав, образуется наплыв металла, а толщина и высота трека увеличиваются, так как скорость движения луча лазера в этот момент времени еще не достигла

заданного значения, что влияет на процесс нанесения последующего слоя, нарушая его равномерность (рис. 4, *а*). При слишком большом значении этого параметра происходит неполное сплавление порошка в зоне воздействия пятна лазера, что приводит к существенной пористости данного отрезка трека и его разрушению при нанесении следующего слоя. Аналогичная картина наблюдается при изменении параметра Delay Beam Off с той лишь разницей, что он оказывает обратный эффект при увеличении и уменьшении значения (рис. 4, *б*).

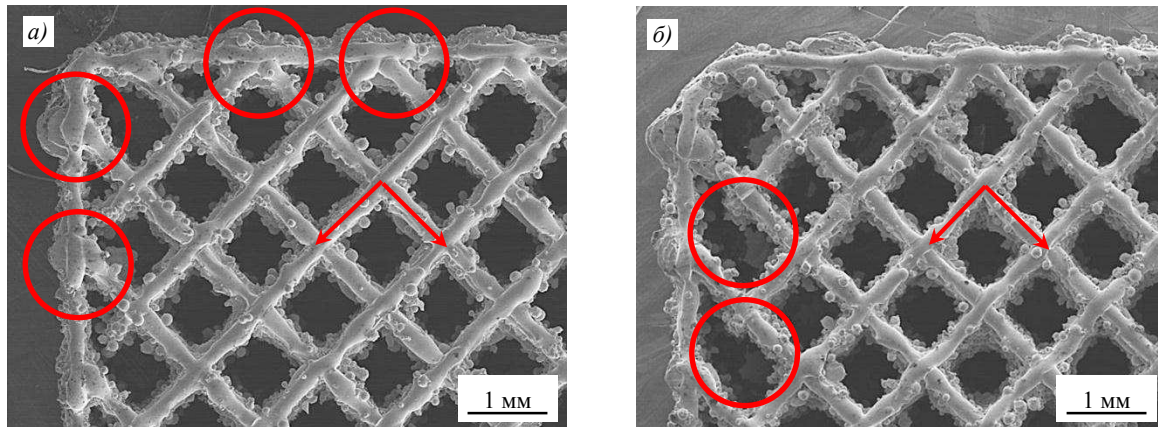


Рис. 4. Вид поддержек при малых значениях параметров Delay Beam On (*а*) и Delay Beam Off (*б*) (стрелками показаны направления движения луча при экспонировании)

Параметр задержки движения луча лазера при прохождении угловых отрезков непрерывного участка схемы сканирования при смене направления движения (Delay Corners) определяет в конечном итоге степень скругления этих областей (рис. 5).

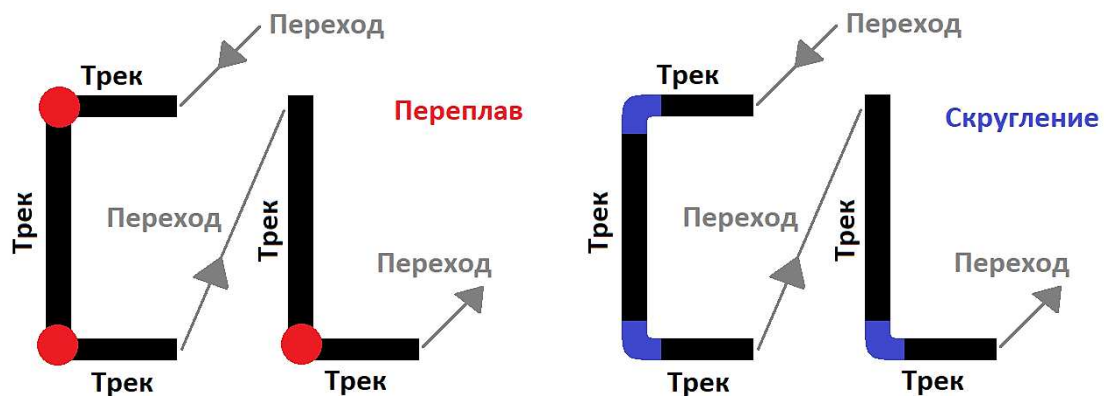


Рис. 5. Схема влияния задержки Delay Corners на структуру трека

Выявлено, что при уменьшении этого параметра радиус скругления отрезка при изменении направления трека увеличивается. При достаточно сильном скруглении это может оказывать влияние на геометрическое построение поддерживающих структур, а также на их целостность и способность выполнять свои функции в процессе печати детали (рис. 6, *а*; для наглядности сетка поддержек сделана с отступом от их контура). На выбранном типе поддержек этот эффект наилучшим образом наблюдается на контурном треке. Напротив, чрезмерное увеличение данного вида задержки приводит к переplаву и появлению наплыва металла, аналогичным в случае задержки включения и выключения луча лазера на оконечных отрезках непрерывного участка схемы сканирования, а также к схожим последствиям (рис. 6, *б*).

Другой эффект запаздывания отражающих зеркал возникает после большого скачка между двумя векторами экспозиции, т. е. после задержек включения и выключения луча лазера при переходе от одного непрерывного участка схемы сканирования к другому в начале следующего и в конце предыдущего участка (Jump Delay и Mark Delay), характеризующих четкость и соответствие границ участков схемы сканирования заданной программе (рис. 7). Для того чтобы перейти от конечного положения вектора экспозиции к начальному положению второго вектора экспозиции, отклоняющие зеркала перемещаются с максимальной скоростью. Отклоняющие зеркала будут колебаться, если произойдет резкое замедление в заданном положении. В том случае, если лазер включается сразу после достижения цели, колебания отклоняющего зеркала в начале вектора экспозиции могут привести к флуктуациям следа лазерного луча.

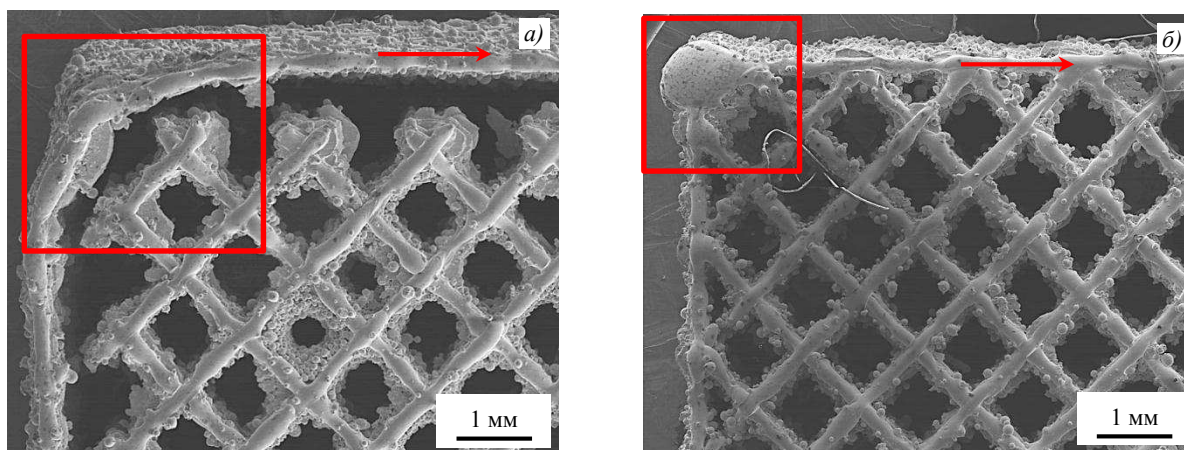


Рис. 6. Вид поддержек при слишком малом (а) и большом значениях (б) параметра Delay Corners (стрелками показаны направления движения луча при экспонировании)

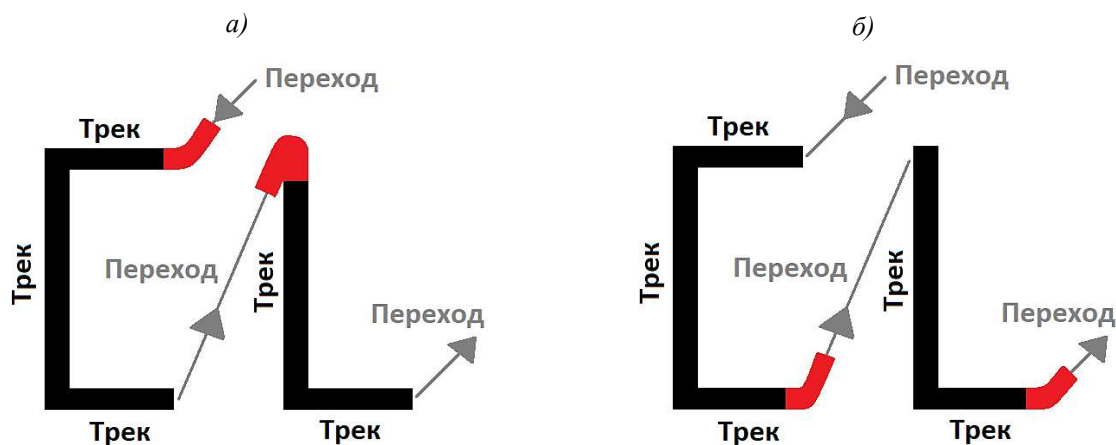


Рис. 7. Схема влияния задержек Jump Delay (а) и Mark Delay (б) на структуру трека

В том случае, если задержка Jump Delay слишком мала, лазер начинает работу еще до того момента, как сканатор успеет позиционировать луч в заданном месте. Это приводит к появлению «хвостов» у начальных участков трека, что в свою очередь может приводить к нарушению геометрической формы поддерживающих структур (рис. 8, б). Большая величина задержки приводит к появлению непропадов. Напротив, при увеличении параметра задержки Mark Delay сканатор уже начинает переходить к другому участку схемы сканирования, в то время как луч лазера еще не выключен,

в результате «хвосты» возникают уже у конечных участков треков (рис. 8, *a*). Меньшая величина задержки в данном случае также приводит к появлению непроплавов.

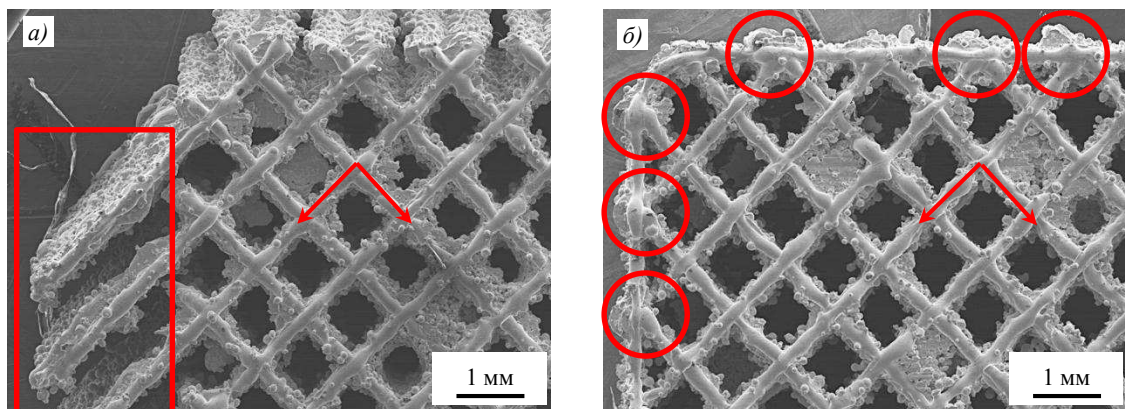


Рис. 8. Вид поддержек при слишком большом значении параметра Mark Delay (*a*) и слишком малом значении параметра Jump Delay (*б*) (стрелками показаны направления движения луча при экспонировании)

Таким образом, принимая во внимание определенные ранее зависимости влияния задержек движения лазерного луча, для параметров построения поддерживающих структур определены их оптимальные значения, позволяющие формировать поддержки деталей с четкой структурой и геометрической формой, гарантирующие стабильность процесса построения изделия (рис. 9). Для значения линейной плотности энергии при сплавлении трека 0,1 Дж/мм оптимальные диапазоны составят: 0,2–0,6 мс – для параметров Delay Beam On и Delay Beam Off; 0,1–0,4 мс – для Delay Corners; 0,2–0,9 мс – для Jump Delay; 0,3–1,0 мс – для Mark Delay.

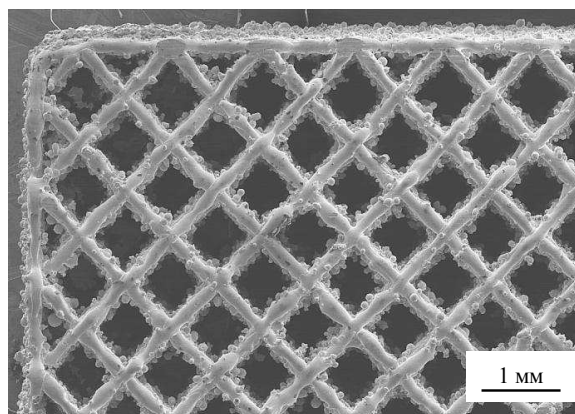


Рис. 9. Вид поддерживающих структур, напечатанных по оптимальному режиму

Следует отметить, что в работе не рассматривали использование схемы сканирования SkyWriting, в которой требуемые траектории для ускорения и замедления отклоняющего зеркала устанавливают до и после векторов экспозиции. Это означает, что все области с неравномерным движением остаются вне векторов экспозиции. Преимущество данной схемы заключается в том, что обрабатывается только фактическая длина определенного вектора экспозиции, при этом энергозатраты на единицу трека остаются постоянными в любой его точке. Влияние этой схемы наиболее выражено при сплавлении основного металла или контура, что не входило в область исследований данной работы.

Заключения

Изучены особенности СЛС поддерживающих структур из МПК сплава на основе системы Co–Cr–Ni–W–Ta применительно к их расширенным параметрам (задержкам) движения лазерного луча и системы позиционирования при изменении траектории сканирования, начала и конца печати треков, перехода между треками. Выявлено, что для исследованного блочного типа поддержек основное влияние на качество их изготовления оказывают параметры Delay Beam On, Delay Beam Off, Delay Corners, Jump Delay и Mark Delay.

Установлено, что чрезмерное уменьшение или увеличение этих задержек может приводить к нарушению структуры трека, выраженному в формировании наплывов металла, переплавах или непроплавах и разрушении целостности трека – в зависимости от характера влияния конкретного параметра. Так, наибольшее негативное влияние на целостность поддерживающих структур оказывают недостаточные задержки движения отклоняющих зеркал сканатора в начале или конце вектора экспозиции, когда энергозатраты на этих участках оказываются меньше заданного базовыми параметрами (скоростью сканирования и мощностью лазера), что приводит к недостаточному проплавлению порошка и разрушению этого участка трека, а также к потере связи с другими участками поддерживающих конструкций. В результате поддержка может перестать работать как единое целое, что снижает ее несущую способность, особенно в случае возникновения термических напряжений в изготавливаемой детали.

Определены оптимальные значения указанных параметров задержек для определенной плотности энергии при сплавлении трека, позволяющие формировать поддерживающие структуры деталей из сплава на основе системы Co–Cr–Ni–W–Ta с четкой структурой и геометрической формой, гарантирующие стабильность процесса построения детали.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Что такое инновации // Наука и жизнь. 2011. № 11. С. 16–21.
2. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // Металлы Евразии. 2017. № 3. С. 2–6.
3. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 222 с.
4. Богачев И.А., Сульянова Е.А., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование микроструктуры и свойств коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni, полученной методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-3-13.
5. Kruth J.-P., Badrossamay M., Yasa E. et al. Part and material properties in selective laser melting of metals // Proceedings of the 16th International Symposium of Electromachining. 2010. P. 3–14.
6. Mercelis P., Kruth J.-P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting // Rapid Prototyping Journal. 2006. Vol. 12. No. 5. P. 254–265.
7. Karpov I.D., Em V.T., Mazalov P.B., Sulyanova E.A. Characterisation of residual stresses by neutron diffraction at the research reactor IR-8 of NRC «Kurchatov Institute» // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1109. Art. 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012046.
8. Yadroitsev I., Smurov I. Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape // Physics Procedia. 2010. Vol. 5. P. 551–560.
9. Mumtaz K., Vora P., Hopkinson N. A method to eliminate anchors/supports from directly laser melted metal powder bed processes // Solid Freeform Fabrication Proceedings. 2011. P. 273–275.
10. Yasa E., Deckers J., Kruth J. The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts // Rapid Prototyping Journal. 2011. Vol. 17. No. 5. P. 312–327.

11. Deshpande S. A Review on Appropriateness of Cobalt based Alloys and Super Alloys for Machining // International Journal of Engineering Research & Technology. 2019. Vol. 8. Is. 01. P. 267–269.
12. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных установок / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столлофа, У.К. Хагеля. М.: Металлургия, 1995. Кн 1. 384 с.
13. Мазалов П.Б., Сухов Д.И., Сулянова Е.А., Мазалов И.С. Жаропрочные сплавы на основе кобальта. Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.10.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-3-10.
14. Мазалов И.С., Мазалов П.Б., Сухов Д.И., Сулянова Е.А. Влияние параметров горячего изостатического прессования на структуру и свойства сплавов на основе кобальта, получаемых методом селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.10.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-3-14.
15. Асланян Г.Г., Сухов Д.И., Мазалов П.Б., Сулянова Е.А. Фрактографическое исследование образцов сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta, полученных методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2019. № 4 (76). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2021). DOI: 0.18577/2307-6046-2019-0-4-3-10.
16. Coutoradis D., Davin A., Lamberigts M. Cobalt-based Superalloys for Applications in Gas Turbines // Materials Science and Engineering. 1987. Vol. 88. P. 11–19.
17. Deshpande S. A Review on Appropriateness of Cobalt based Alloys and Super Alloys for Machining // International Journal of Engineering Research & Technology. 2019. Vol. 8. Is. 01. P. 267–269.
18. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Reference

1. Kablov E.N. What is innovation. Nauka i zhizn, 2011, no. 11, pp. 16–21.
2. Kablov E.N. The dominant feature of the national technology initiative. Problems of accelerating the development of additive technologies in Russia. Metally Evrazii, 2017, no. 3, pp. 2–6.
3. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. Additive technologists in mechanical engineering. St. Petersburg: Publ. house of Polytech. University, 2013, 222 p.
4. Bogachev I.A., Sulyanova E.A., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Microstructure and properties investigations of Fe–Cr–Ni stainless steel obtained by selective laser melting. Trudy VIAM, 2019, no. 3 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-3-13.
5. Kruth J.-P., Badrossamay M., Yasa E. et al. Part and material properties in selective laser melting of metals. Proceedings of the 16th International Symposium of Electromachining, 2010, pp. 3–14.
6. Mercelis P., Kruth J.-P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. Rapid Prototyping Journal, 2006, vol. 12, no. 5, pp. 254–265.
7. Karpov I.D., Em V.T., Mazalov P.B., Sulyanova E.A. Characterisation of residual stresses by neutron diffraction at the research reactor IR-8 of NRC «Kurchatov Institute». Journal of Physics: Conference Series, 2018, vol. 1109, art. 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012046.
8. Yadroitsev I., Smurov I. Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape. Physics Procedia, 2010, vol. 5, pp. 551–560.
9. Mumtaz K., Vora P., Hopkinson N. A method to eliminate anchors/supports from directly laser melted metal powder bed processes. Solid Freeform Fabrication Proceedings, 2011, pp. 273–275.
10. Yasa E., Deckers J., Kruth J. The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts. Rapid Prototyping Journal, 2011, vol. 17, no. 5, pp. 312–327.
11. Deshpande S. A Review on Appropriateness of Cobalt based Alloys and Super Alloys for Machining. International Journal of Engineering Research & Technology, 2019, vol. 8, is. 01, pp. 267–269.

12. Superalloys II. Heat-resistant materials for aerospace and industrial installations. Ed. Ch.T. Sims, N.S. Stoloff, W.C. Hagel. Moscow: Metallurgy, 1995, book 1, 384 p.
13. Mazalov P.B., Suhov D.I., Sulyanova E.A., Mazalov I.S. Heat-resistant cobalt-based alloys. Aviation materials and technologies, 2021, no. 3 (64), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 2, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-3-10.
14. Mazalov I.S., Mazalov P.B., Suhov D.I., Sulyanova E.A. Influence of hot isostatic pressing parameters on structure and properties of cobalt-based alloys obtained by selective laser melting. Aviation materials and technologies, 2021, no. 2 (63), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 2, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-3-14.
15. Aslanian G.G., Sukhov D.I., Mazalov P.B., Sulyanova E.A. Fractographic study of Co–Cr–Ni–W–Ta alloy samples obtained by selective laser melting. Trudy VIAM, 2019, no. 4 (76), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-3-10.
16. Coutoradis D., Davin A., Lamberigts M. Cobalt-based Superalloys for Applications in Gas Turbines. Materials Science and Engineering, 1987, vol. 88, pp. 11–19.
17. Deshpande S. A Review on Appropriateness of Cobalt based Alloys and Super Alloys for Machining. International Journal of Engineering Research & Technology, 2019, vol. 8. Is. 01, pp. 267–269.
18. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». Aviacionnye materialy i tehnologii, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

Богачев Игорь Александрович, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сухов Дмитрий Игоревич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ходырев Никита Алексеевич, начальник участка, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куркин Сергей Эдуардович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Igor A. Bogachev, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry I. Sukhov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikita A. Khodyrev, Head of production area, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey E. Kurkin, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 20.07.2021; одобрена после рецензирования 04.08.2021; принята к публикации 04.08.2021.

The article was submitted 20.07.2021; approved after reviewing 04.08.2021; accepted for publication 04.08.2021.

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-14-25

ДЕФОРМАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ СИСТЕМ Ni–Ti–Nb И Ni–Ti–Nb–Zr

А.В. Скугорев¹, Д.В. Капитаненко¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Работа посвящена изучению процессов горячей и холодной пластической деформации труднодеформируемых сплавов с эффектом памяти формы систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr. Определены оптимальные режимы деформационной обработки исследуемых сплавов, обеспечивающие получение полуфабрикатов без поверхностных дефектов. Проведены исследования механических свойств горячедеформированных и холоднодеформированных полуфабрикатов из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr. Показано, что выбранные режимы обработки исследуемых сплавов позволяют обеспечить высокий уровень механических свойств материалов.

Ключевые слова: сплавы с эффектом памяти формы, горячая деформация, прессование, волочение, механические свойства, муфты термомеханического соединения

Для цитирования: Скугорев А.В., Капитаненко Д.В. Деформационная обработка труднодеформируемых сплавов с памятью формы систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-14-25.

Scientific article

DEFORMATION TREATMENT OF HARD-TO-DEFORM Ni–Ti–Nb AND Ni–Ti–Nb–Zr SHAPE MEMORY ALLOYS

Alexander V. Skugorev¹, Denis V. Kapitanenko¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: The work is devoted to the study of the processes of hot and cold plastic deformation of hard-to-deform shape memory alloys of the Ni–Ti–Nb and Ni–Ti–Nb–Zr systems. The optimal modes of deformation treatment of these alloys, which ensure the production of semi-finished products without surface defects, have been determined. Investigations of the mechanical properties of hot-deformed and cold-deformed semi-finished products from alloys of the Ni–Ti–Nb and Ni–Ti–Nb–Zr systems have been carried out. It is shown that the selected treatment modes of these alloys provide a high level of mechanical properties of materials.

Keywords: shape memory alloys, hot deformation, pressing, drawing, mechanical properties, thermomechanical couplings

For citation: Skugorev A.V., Kapitanenko D.V. Deformation treatment of hard-to-deform Ni–Ti–Nb and Ni–Ti–Nb–Zr shape memory alloys. Trudy VIAM, 2022, no. 1 (107), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-14-25.

Введение

В гражданской авиационной технике сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) используют для изготовления приводов заслонок систем вентиляции и кондиционирования, в приводах бортовых самописцев и элементах пожарной сигнализации. В гидроавтоматике систем автоматического управления газотурбинного двигателя такие сплавы применяют при создании плотных и неразъемных соединений; также с помощью

муфт из сплавов с ЭПФ можно скреплять патрубки гидросистем. В данном случае используется следствие ЭПФ, когда при восстановлении исходной геометрической формы изделия и наличии противодействия (обжатие трубы или прутка) сплав способен генерировать значительные реактивные усилия.

Из известных материалов, обладающих ЭПФ, т. е. способностью восстанавливать исходную геометрическую форму при термическом воздействии, наибольшее распространение получил эквиатомный сплав системы Ni–Ti марки ТН-1 (монокелид титана). Для этого сплава характерна исключительно большая обратимая деформация (до 15 %), т. е. деформация, после которой возможен возврат к первоначальной геометрической форме в результате обратимого термоупругого мартенситного превращения. Кроме того, данный сплав обладает комплексом высоких механических характеристик и способен генерировать значительные реактивные напряжения (>200 МПа) при восстановлении исходной геометрической формы изделия. Рабочая температура монокелида титана типа ТН-1 зависит от химического состава и структуры сплава и находится в интервале $0\text{--}40$ °С, из-за чего деформационное воздействие (предварительное формообразование изделия) приходится проводить в области температур ниже комнатной, что технологически весьма сложно.

Разработанные в 2000-х гг. опытные составы сплавов с ЭПФ на основе монокелида титана, дополнительно легированные ниобием и цирконием, позволяют сдвинуть температурный диапазон восстановления формы в интервале $30\text{--}100$ °С и, соответственно, проведение всех технологических операций в область положительных температур, что значительно сокращает трудоемкость использования сплавов для сборки систем гидроавтоматики современных и перспективных газотурбинных двигателей.

Однако сплавы на основе монокелида титана систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr являются труднодеформируемыми, обладают более низкой технологической пластичностью и обрабатываемостью резанием по сравнению со сплавом-прототипом марки ТН-1. Данная работа посвящена разработке технологий горячей и холодной деформации сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr, обеспечивающих получение полуфабрикатов сложной формы из этих сплавов для изготовления разъемных термомеханических соединений патрубков гидроавтоматики.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных проблем 5.1. «Андронидные материалы, обладающие эффектом памяти формы» и 10.2. «Изотермическая деформация на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых жаропрочных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2].

Материалы и методы

Выплавку слитков из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr проводили в вакуумной индукционной печи УППФ-3 с применением чистых шихтовых материалов [3]. Для повышения чистоты сплавов по неметаллическим включениям осуществляли вакуумно-дуговой переплав исходных слитков на установке ALD VAR L200.

Исследование химического состава слитков из данных сплавов проводили методами атомно-эмиссионного анализа содержания основных легирующих элементов в сплаве и газового анализа содержания примесей (C, S, O, N, H).

Технологическую пластичность сплавов в литом состоянии определяли по результатам испытаний цилиндрических образцов на осадку при температурах от 600 до 1200 °С. Осадку образцов проводили на гидравлическом одноколонном прессе с усилием 25 тс, нагрев образцов – в камерной электропечи сопротивления. Нагрев и деформацию

образцов осуществляли в контейнере из жаропрочного никелевого сплава, исключая охлаждение образца в процессе испытания.

Обработку технологией горячей деформации сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr проводили методом прессования (экструзии) прутков круглого сечения, из которых с помощью механической обработки можно изготовить муфты патрубков гидроавтоматики, и методом объемной штамповки модельной заготовки патрубка гидроавтоматики, обеспечивающей получение детали со значительно более высоким коэффициентом использования материала.

Горячее прессование (экструзию) выполняли на гидравлическом прессе «Блисс» с максимальным усилием 1000 тс. Для прессования использовали специализированный прессовый инструмент из штамповой стали для горячей деформации, который перед деформацией нагревали в электрической камерной печи ПСКО 700/360.60-60 до температуры 400 °С. Нагрев литых заготовок из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr проводили в электрической камерной печи KS 800/37.

Для защиты литых заготовок от окисления в процессе деформации, а также снижения напряжений трения на поверхности контакта деформируемого материала и штампового инструмента перед нагревом на поверхность заготовок наносили защитное технологическое покрытие (ЗТП) марки ЭВТ-24 [4–6]. После нанесения ЗТП обеспечивали полное высыхание заготовок.

Отработку режимов получения модельной штампованной заготовки муфты патрубка гидроавтоматики методом изотермической штамповки проводили на специализированном гидравлическом прессе ПА2638 с усилием 630 тс, оснащенный индукционной установкой нагрева штампового инструмента УИДИН-250 (данный комплекс оборудования называется изотермическим прессом) [7–9]. В качестве исходной заготовки использовали мерные литые заготовки из сплава системы Ni–Ti–Nb плавки 13-108п диаметром 50_{–2} мм и высотой 70 мм. На поверхность заготовок перед нагревом наносили ЗТП марки ЭВТ-24. После нанесения покрытия обеспечивали полное высыхание заготовок. Нагрев заготовок проводили в камерной электропечи ПСКО 1250/640 50 80. Штамповый инструмент с помощью установки УИДИН-250 нагревали до температуры, равной температуре нагрева литых заготовок.

Отработку технологии холодной деформации сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr проводили методом волочения. Волочение прутков выполняли на цепном волочильном станке при комнатной температуре. Для лучшего удержания смазки в процессе холодного волочения на поверхность прутка наносили подсмазочное покрытие – натриевое жидкое стекло. После полного застывания жидкого стекла на поверхность прутков наносили смазочное покрытие – раствор смазочного графита марки ГС-1 в машинном масле.

Определение механических свойств (предела прочности и относительного удлинения) горячедеформированных и холоднодеформированных полуфабрикатов из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr проводили в соответствии с ГОСТ 1497–84.

Результаты и обсуждение

Благодаря использованию современных технологий выплавки [10, 11], рафинирования [12, 13] и вакуумно-дугового переплава слитков из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr удалось добиться стабильности химического состава слитков по основным легирующим элементам в пределах $\pm 0,2$ % (по массе) и получить низкое содержание примесей в сплавах. Содержание углерода, серы и газовых примесей в слитках приведено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание примесей в слитках из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)				
	C	S	O	N	H
Ni–Ti–Nb	0,065–0,072	0,0009–0,0014	0,047–0,050	0,0042–0,0076	0,0014–0,0023
Ni–Ti–Nb–Zr	0,060–0,082	0,0009–0,0011	0,045–0,048	0,0053–0,0060	0,0018–0,0021

Из выплавленных слитков изготовлены цилиндрические образцы диаметром 15 мм и высотой 20 мм в количестве 200 шт. (по 100 шт. для каждого сплава); продольная ось образцов совпадала с продольной осью слитков. Определение допустимой степени деформации образцов при осадке на прессе проводили в интервале температур от 600 до 1200 °С, соответствующем интервалу температур горячей деформации сплавов на основе никеля и титана. Максимально допустимую деформацию материала при определенной температуре определяли как максимальное значение степени деформации образца, при которой не происходит его макроразрушения (появления на боковой поверхности образца трещин или полного разрушения образца). На рис. 1 представлена диаграмма зависимости максимально допустимой степени деформации при сжатии образцов из исследуемых сплавов от температуры деформации.

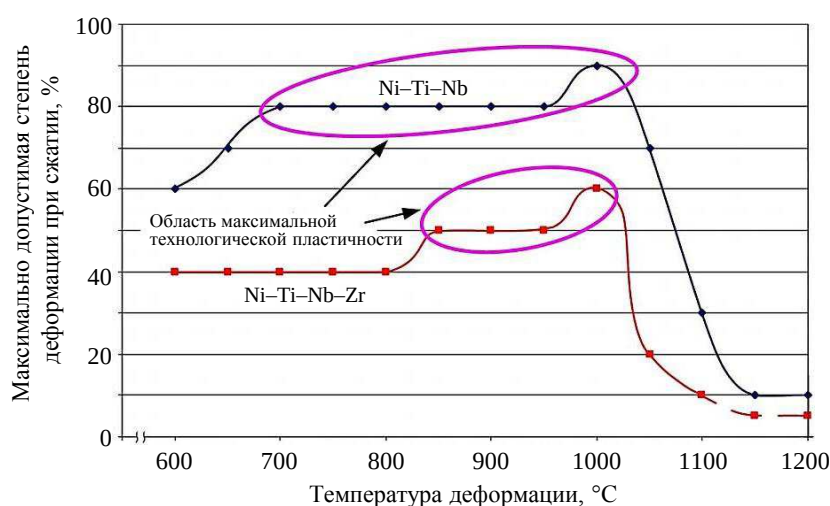


Рис. 1. Технологическая пластичность сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr в литом состоянии

Анализ результатов исследований показал, что четырехкомпонентный сплав системы Ni–Ti–Nb–Zr обладает более низкой технологической пластичностью при обработке давлением, чем трехкомпонентный сплав системы Ni–Ti–Nb. Сплав системы Ni–Ti–Nb имеет высокую технологическую пластичность при температурах от 700 до 1000 °С, а сплав системы Ni–Ti–Nb–Zr обладает сравнительно низкой технологической пластичностью, удовлетворительные значения которой находятся в интервале температур от 850 до 1000 °С.

*Отработка технологии прессования (экструзии) прутков
из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr*

Выбор параметров горячей деформации слитков из исследуемых сплавов проводили с учетом результатов компьютерного моделирования процессов деформации

в программном комплексе QForm, широко используемом при разработке технологий деформационной обработки специальных сталей и сплавов [14–16]. С помощью компьютерного моделирования произведена оценка изменения температуры заготовки вследствие ее охлаждения при контакте с деформирующим инструментом и разогрева при пластической деформации.

Оценку изменения температуры заготовки при прессовании осуществляли в зависимости от ее температуры нагрева перед деформацией и коэффициента вытяжки при прессовании μ , который определяли по формуле

$$\mu = \frac{D^2}{d^2} \approx \frac{D^2}{d_M^2},$$

где D – диаметр исходной заготовки, мм; d – диаметр заготовки после прессования, мм; d_M – диаметр матрицы, мм.

Выбор исходных параметров для моделирования обусловлен геометрическими формами заготовки и существующего штампового инструмента, техническими характеристиками используемого пресса и результатами исследования технологической пластичности сплавов. Используемые для расчета диаметры матрицы 10, 15, 23 и 30 мм соответствуют коэффициентам вытяжки: 30,2; 13,4; 5,7 и 3,4. По результатам компьютерного моделирования процесса экструзии слитка анализировали температурное поле заготовки до и после прессования (рис. 2).

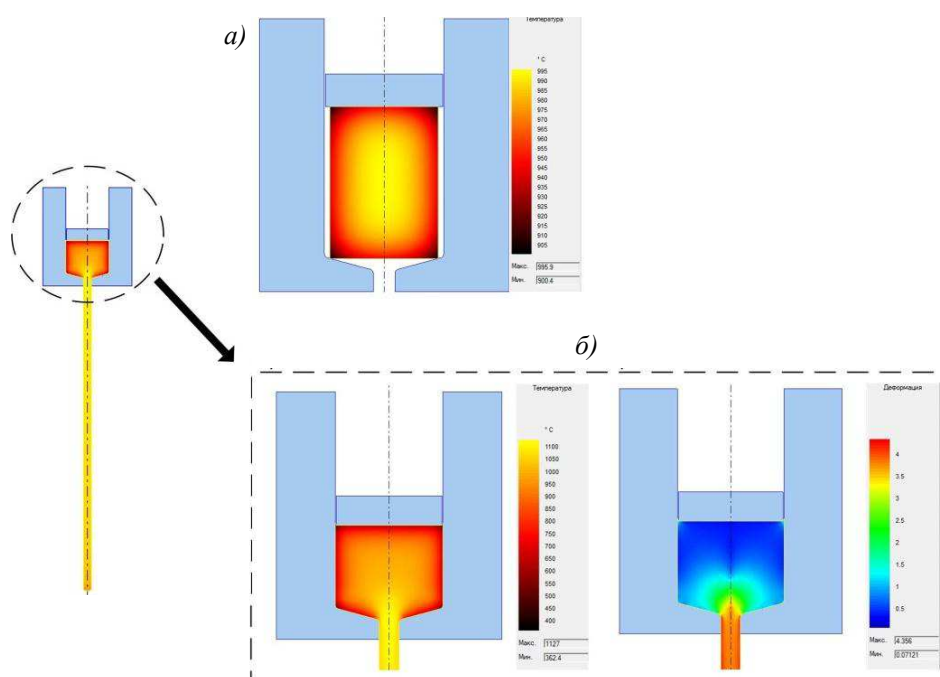


Рис. 2. Температурное поле заготовки после охлаждения на воздухе и в штампе (а) и после деформации (б) (справа – поле интенсивности деформации)

Результаты компьютерного моделирования показали, что исследуемые сплавы в процессе горячего прессования (экструзии) подвергаются значительному деформационному разогреву. Построен график зависимости максимальной температуры заготовки в процессе прессования (экструзии) от начальной температуры заготовки и коэффициента вытяжки при прессовании (рис. 3).

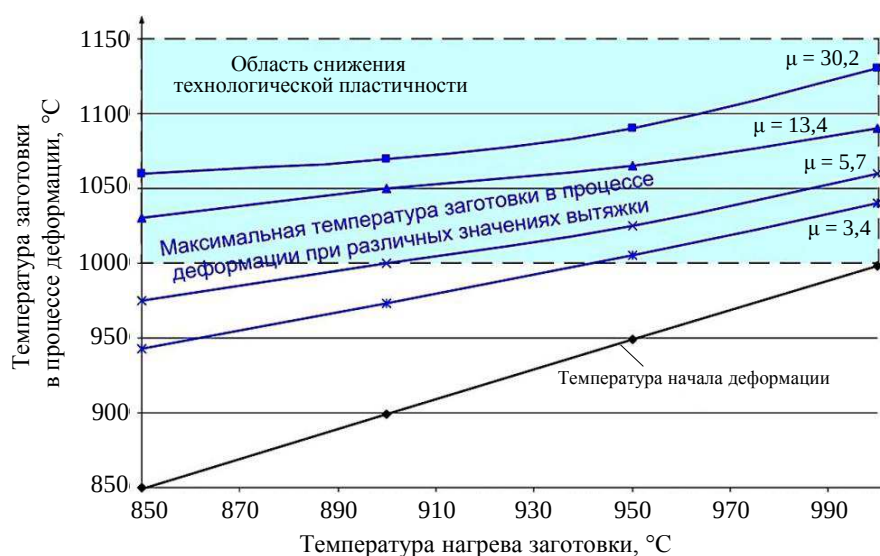


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры заготовки в процессе деформации от температуры ее нагрева и коэффициента вытяжки при прессовании

В соответствии с результатами компьютерного моделирования выбраны основные параметры прессования (экструзии) прутков круглого сечения из труднодеформируемых сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr с ЭПФ. В результате опытного прессования получены прутки диаметром 23 мм, структура которых не имеет трещин, плен, зажимов, расслоений и пустот. Полученные прутки пригодны для дальнейшей обработки технологии холодной деформации исследуемых материалов. На рис. 4 представлен внешний вид прессованных прутков, а также их макро- и микроструктура после прессования.

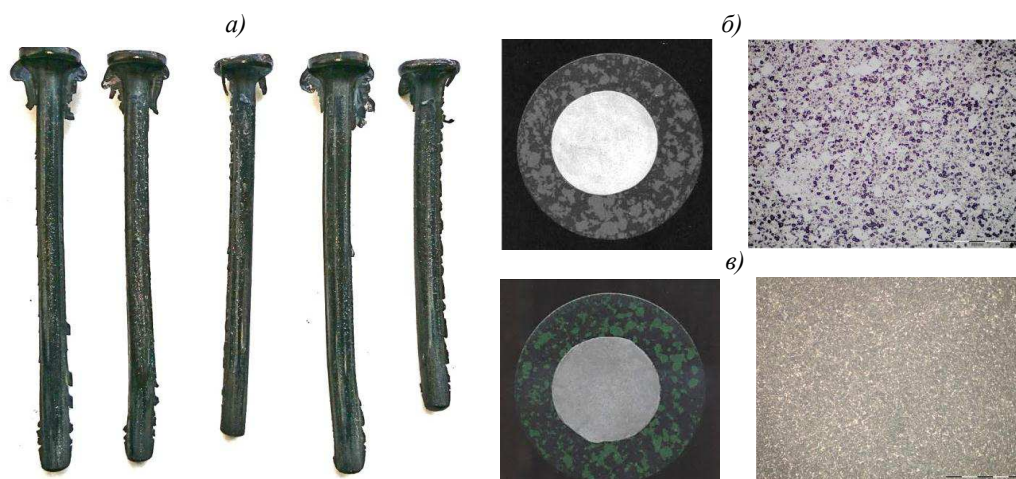


Рис. 4. Внешний вид (а), а также макро- и микроструктура прессованных прутков из сплавов систем Ni–Ti–Nb (б) и Ni–Ti–Nb–Zr (в)

Отработка технологии получения заготовки патрубка гидроавтоматики методом изотермической штамповки на воздухе

Для получения заготовок муфтовых соединений патрубков гидроавтоматики предложена горячая объемная штамповка заготовки муфты в условиях, близких к изотермическим. Методами компьютерного моделирования проведена оценка изменения температуры заготовки в процессе деформации. В связи с тем, что скорость хода

рабочего инструмента при штамповке на изотермических прессах в 7–10 раз меньше скорости хода рабочего инструмента при прессовании, повышение температуры заготовки ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдают только при достаточно высокой степени деформации (64 %) заготовки (рис. 5). Таким образом, штамповку заготовки муфты патрубка гидроавтоматики можно проводить при температурах, близких к предельным температурам нагрева штампового инструмента на изотермических прессах.

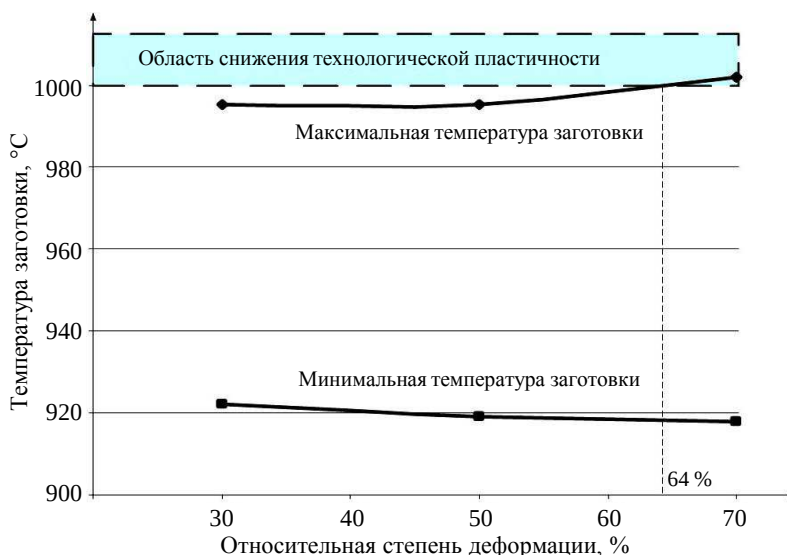


Рис. 5. Зависимость температуры заготовки от степени деформации при осадке в изотермических условиях (температуры нагрева заготовки и штампов равны)

По разработанной технологической схеме получены штампованные заготовки муфты патрубка гидроавтоматики (рис. 6), макроструктура которых не имеет трещин, плен, зажимов, расслоений и пустот.

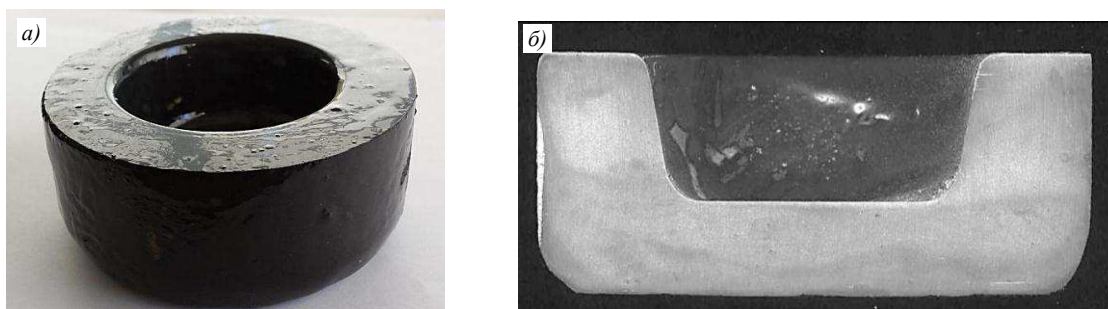


Рис. 6. Внешний вид (а) и макроструктура (б) штампованных заготовок из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr

Обработка технологии холодной деформации сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr

Получение прутков круглого сечения диаметром $<20\text{ мм}$ осуществляли путем холодного волочения механически обработанных прессованных прутков. Прессованные прутки из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr номинальным диаметром 23 мм подвергали токарной обработке до диаметра 20 мм с полным удалением с их поверхности окалина и остатков ЗТП. Волочение прутков проводили путем однократного протягивания через фильеру. После каждого прохода волочения визуально контролировали состояние поверхности прутков. Для каждого перехода

волочения определяли количественные показатели деформации материала: коэффициент вытяжки и относительную степень деформации.

Коэффициент вытяжки определяли по формуле

$$\mu = \frac{d_0^2}{d_k^2},$$

где d_0 и d_k – диаметры прутка до и после волочения соответственно, мм.

Относительную степень деформации определяли по формуле

$$\varepsilon = \frac{(d_0^2 - d_k^2)}{d_0^2} \cdot 100 \, \%.$$

На рис. 7 представлена схема отработки режимов волочения прутков из сплава системы Ni–Ti–Nb.

За первые два перехода волочения удалось получить прутки диаметром 17 мм без поверхностных дефектов (трещин и разрывов). Суммарная степень деформации составила 27,7 %. Далее проведена смягчающая термическая обработка. Режим термической обработки сплава системы Ni–Ti–Nb выбран по данным, представленным в работе [17]. После закалки прутки подвергали пескоструйной обработке для удаления окалины и последующего волочения. Волочение закаленного прутка проведено за три перехода. Получение прутка без поверхностных дефектов обеспечивается волочением с суммарной степенью деформации 25,2 мм. На полученных в ходе отработки режимов волочения прутках из сплава системы Ni–Ti–Nb диаметром 14,7 мм определяли механические свойства материала.

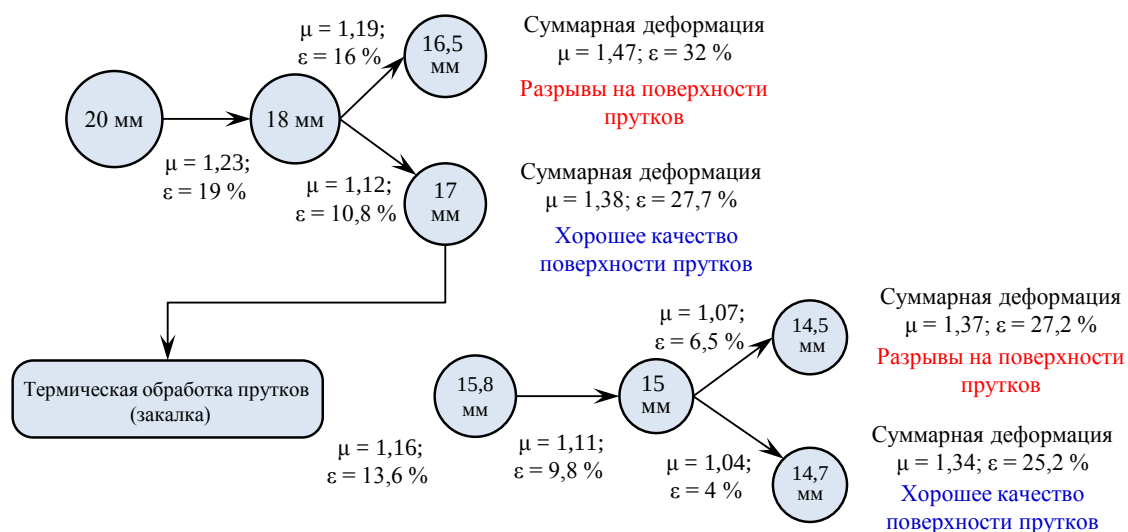


Рис. 7. Схема отработки режимов волочения прутков из сплава системы Ni–Ti–Nb

По аналогичному алгоритму проведена отработка режимов волочения прутков из сплава системы Ni–Ti–Nb–Zr (рис. 8).

По сравнению со сплавом системы Ni–Ti–Nb четырехкомпонентный сплав системы Ni–Ti–Nb–Zr обладает более низкой технологической пластичностью при холодной деформации волочением. Максимальная степень деформации до проведения смягчающей термической обработки для исследуемого сплава не превышает 20 %. Режим смягчающей термической обработки (закалки) сплава системы Ni–Ti–Nb–Zr выбран по данным, представленным в работе [17]. По результатам отработки режимов волочения

прутков из сплава системы Ni–Ti–Nb–Zr за четыре перехода получены прутки диаметром 16 мм, используемые для определения механических свойств материала.

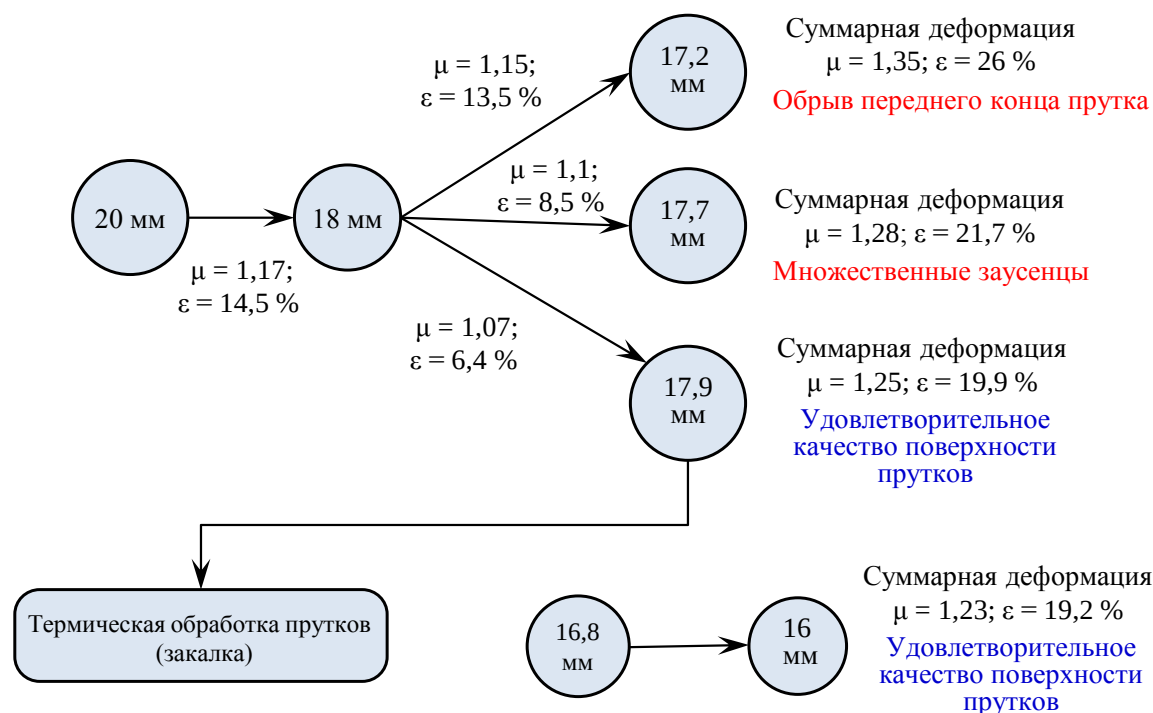


Рис. 8. Схема отработки режимов волочения прутков из сплава системы Ni–Ti–Nb–Zr

Результаты исследования макро- и микроструктуры волоченых прутков из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr (рис. 9) показали, что после термической обработки (закалки) структура прутков не содержит трещин, расслоений, пустот и равномерна по всей площади шлифов.

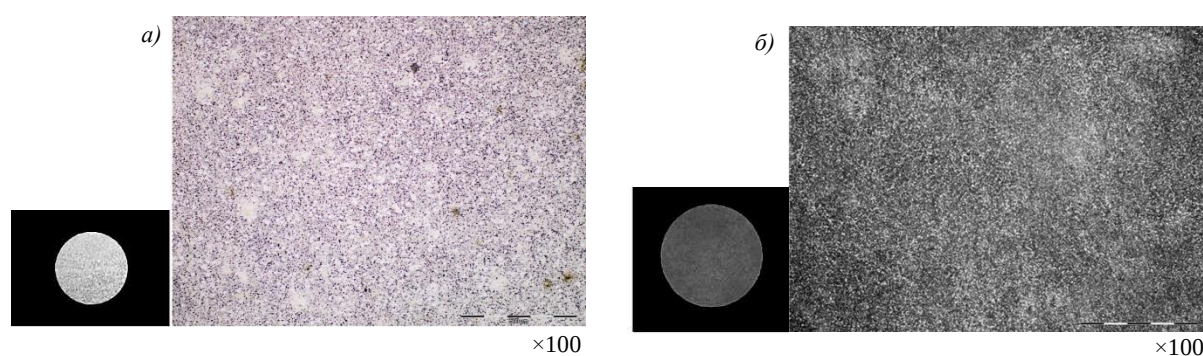


Рис. 9. Макро- и микроструктура холоднотермически деформированных прутков из сплавов систем Ni–Ti–Nb (а) и Ni–Ti–Nb–Zr (б)

Механические свойства полуфабрикатов из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr

Прессованные и холоднотермически деформированные (волоченые) прутки закаливали по режиму, выбранному по данным, представленным в работе [17]. В табл. 2 приведены результаты определения механических свойств горячедеформированных и холоднотермически деформированных полуфабрикатов в закаленном состоянии.

Таблица 2

**Механические свойства полуфабрикатов в закаленном состоянии
из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr при температуре 20 °С**

Сплав	Вид полуфабриката	Предел текучести при растяжении, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
Ni–Ti–Nb	Прессованный пруток диаметром 23 мм	460–475	760–800	17,5–23,5
	Волоочный пруток диаметром 14,7 мм	460–485	750–790	15,5–19,5
Ni–Ti–Nb–Zr	Прессованный пруток диаметром 23 мм	215–225	930–990	16,5–21,5
	Волоочный пруток диаметром 16 мм	335–350	970–990	20,5–22,5

Результаты испытаний показали, что сплав системы Ni–Ti–Nb–Zr обладает большими прочностью и деформационным упрочнением, чем сплав системы Ni–Ti–Nb. Характеристики пластичности материалов позволяют проводить холодную деформацию образцов и деталей для последующей реализации ЭПФ.

Заключения

Проведены исследования технологической пластичности сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–TiNbZr в литом состоянии. По результатам компьютерного моделирования определены температурные интервалы горячей деформации труднодеформируемых сплавов с ЭПФ, обеспечивающие проведение пластической деформации в области максимальной технологической пластичности материалов и предотвращающие коррозионное растрескивание материала при деформации.

Экспериментально отработаны режимы горячей и холодной деформации труднодеформируемых сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr при операциях прессования (экструзии), изотермической штамповки на воздухе заготовки муфты патрубка гидроавтоматики и волочения прутков. Определены режимы деформации, обеспечивающие получение равномерной макро- и микроструктуры деформированных полуфабрикатов без трещин, расслоений, пустот, а также равномерных по всей площади шлифов.

Проведены исследования механических свойств горячедеформированных и холоднодеформированных полуфабрикатов из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr. Установлено, что полуфабрикаты после термической обработки обладают высокими прочностными свойствами. Характеристики пластичности материалов позволяют проводить холодную деформацию образцов и деталей для последующей реализации ЭПФ.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
2. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
3. Щербаков А.И., Мосолов А.Н., Калицев В.А. Производство бериллийсодержащей стали 32X13H6K3M2БДЛТ-ВИ (ВНС32-ВИ) // Материаловедение. 2017. № 4. С. 17–21.
4. Денисова В.С., Малинина Г.А., Власова О.В., Виноградова А.Ю. Влияние добавок тетраборида кремния на свойства жаростойких покрытий для защиты жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2. С. 68–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-68-73.

5. Розененкова В.А., Солнцев С.С., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Стеклокерамические композиционные защитные технологические покрытия для термомеханической обработки интерметаллидных сплавов // *Стекло и керамика*. 2016. № 10. С. 32–36.
6. Солнцев С.С., Денисова В.С. Реакционно отверждаемые композиционные покрытия и стекла // *Стекло и керамика*. 2019. № 4. С. 9–14.
7. Пономаренко Д.А., Летников М.Н., Скугорев А.В., Сидоров С.А. Использование специализированных изотермических прессов дляковки заготовок дисков турбины из труднодеформируемых жаропрочных сплавов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2018. № 3. С. 19–25.
8. Бакрадзе М.М., Ломберг Б.С., Сидоров С.А., Бубнов М.В. Изготовление крупногабаритных штамповок дисков ГТД из слитков промышленного производства Ø320 мм сплава ЭК151-ИД // *Труды ВИАМ*. 2017. № 6 (54). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-2-2.
9. Моисеев Н.В., Некрасов Б.Р., Летникова Е.Ю., Выдумкина С.В. Штамповые материалы для высокотемпературной изотермической деформации на воздухе // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2017. № 7. С. 25–30.
10. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-55-71.
11. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Ригин В.Е. Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов // *Электрометаллургия*. 2016. № 9. С. 30–41.
12. Сидоров В.В., Мин П.Г., Каблов Д.Е. Десульфурация монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов при плавке в вакууме // *Металлург*. 2017. № 5. С. 57–62.
13. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Вадеев В.Е. Рафинирование сложнолегированного никелевого сплава ЖС32-ВИ от примесей кремния и фосфора путем однонаправленного затвердевания расплава при малых скоростях перемещения фронта кристаллизации // *Технология металлов*. 2016. № 3. С. 2–7.
14. Шпагин А.С., Кучеряев В.В., Бубнов М.В. Компьютерное моделирование процессов термомеханической обработки жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ЭП742 // *Труды ВИАМ*. 2019. № 8 (80). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-27-35.
15. Бакрадзе М.М., Скугорев А.В., Кучеряев В.В., Бубнов М.В. Компьютерное моделирование технологических процессов обработки металлов давлением как инструмент разработки новых технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 175–185. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-175-185.
16. Гладков Ю.А., Каневский С.С. Моделирование прессования алюминиевых профилей в новой версии программы QForm Extrusion VX: совместная деформационная задача // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2016. № 11. С. 41–48.
17. Боровков Д.В. Структура, мартенситные превращения и функциональные свойства сплавов с памятью формы на основе Ti–Ni–Nb с широким мартенситным гистерезисом: дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 122 с.

Reference

1. Kablov E.N. What to make the future of? New generation materials, technologies for their creation and processing - the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
2. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft construction and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5-6, pp. 40–44.
3. Shcherbakov A.I., Mosolov A.N., Kalitsev V.A. Production of beryllium-containing steel 32Kh13N6K3M2BDLT-VI (VNS32-VI). *Materialovedenie*, 2017, no. 4, pp. 17–21.
4. Denisova V.S., Malinina G.A., Vlasova O.V., Vinogradova A.Yu. The influence of silicon tetra-boride additives on properties of heat-resistant coatings for nickel alloys protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 68–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-68-73.

5. Rosenenkova V.A., Solntsev S.S., Mironova N.A., Gavrilov S.V. Glass-ceramic composite protective technological coatings for thermomechanical processing of intermetallic alloys. *Steklo i keramika*, 2016, no. 10, pp. 32–36.
6. Solntsev S.S., Denisova V.S. Reaction-hardened composite coatings and glass. *Steklo i keramika*, 2019, no. 4, pp. 9–14.
7. Ponomarenko D.A., Letnikov M.N., Skugorev A.V., Sidorov S.A. The use of specialized isothermal presses for forging blanks of turbine disks from hard-to-deform heat-resistant alloys. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2018, no. 3, pp. 19–25.
8. Bakradze M.M., Lomberg B.S., Sidorov S.A., Bubnov M.V. Method of large-sized deformed turbine discs manufacturing from EK151-ID industrial ingots with limited diameter (320 mm). *Trudy VIAM*, 2017, no. 6 (54), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-2-2.
9. Moiseev N.V., Nekrasov B.R., Letnikova E.Yu., Vydumkina S.V. Stamping materials for high-temperature isothermal deformation in air. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2017, no. 7, pp. 25–30.
10. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G. The metallurgical fundamentals for high quality maintenance of single crystal heat-resistant nickel alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
11. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G., Rigin V.E. Resource-saving technologies for the smelting of promising casting and wrought superheat-resistant alloys taking into account the processing of all types of waste. *Elektrometallurgiya*, 2016, no. 9, pp. 30–41.
12. Sidorov V.V., Min P.G., Kablov D.E. Desulfurization of monocrystalline heat-resistant nickel alloys during melting in vacuum. *Metallurg*, 2017, no. 5, pp. 57–62.
13. Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G., Vadeev V.E. Refining of complex alloyed nickel alloy ZhS32-VI from silicon and phosphorus impurities by means of unidirectional solidification of the melt at low speeds of movement of the crystallization front. *Tekhnologiya metallov*, 2016, no. 3, pp. 2–7.
14. Shpagin A.S., Kucheryaev V.V., Bubnov M.V. Computer simulation of thermomechanical processing of heat-resistant nickel alloys VZh175 and EP742. *Trudy VIAM*, 2019, No. 8 (80), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-27-35.
15. Bakradze M.M., Skugorev A.V., Kucheryayev V.V., Bubnov M.V. Computer modeling of technological metal forming processes as effective instrument for development of new technologies. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 175–185. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-175-185.
16. Gladkov Yu.A., Kanevsky S.S. Modeling of extrusion of aluminum profiles in the new version of the QForm Extrusion VX program: a joint deformation problem. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2016, no. 11, pp. 41–48.
17. Borovkov D.V. Structure, martensitic transformations and functional properties of shape memory alloys based on Ti – Ni – Nb with wide martensitic hysteresis: thesis, Cand. tech. sciences. Moscow, 2006, 122 p.

Информация об авторах

Скугоров Александр Викторович, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Капитаненко Денис Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander V. Skugorev, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Denis V. Kapitanenko, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 15.09.2021; одобрена после рецензирования 25.10.2021; принята к публикации 25.10.2021.

The article was submitted 15.09.2021; approved after reviewing 25.10.2021; accepted for publication 25.10.2021.

Научная статья

УДК 669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-26-34

РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ СОСТАВА МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ19

Ф.Н. Карачевцев¹, С.Г. Ерошкин¹, Н.В. Трофимов¹, А.А. Леонов¹, Н.А. Поповнина²

¹НИИ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

²ПАО «ОДК-Кузнецов», Самара, Россия; lab@uec-kuznetsov.ru

Аннотация: Проведена разработка технологии изготовления и производства материала для стандартных образцов (СО) состава магниевого сплава МЛ19. Выполнено изготовление материала для СО указанного сплава в виде цилиндров диаметром 40 мм и высотой 30 мм. Проведены испытания материала для СО в целях утверждения его типа. Установлены метрологические характеристики СО, выполнена метрологическая экспертиза, оформлены заключения по проверке результатов испытаний СО состава магниевого сплава МЛ19.

Ключевые слова: стандартный образец, магниевый сплав, спектроскопия, технология изготовления, утверждение типа, неопределенность

Для цитирования: Карачевцев Ф.Н., Ерошкин С.Г., Трофимов Н.В., Леонов А.А., Поповнина Н.А. Разработка стандартных образцов состава магниевого сплава МЛ19 // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-26-34.

Scientific article

DEVELOPMENT OF STANDARD SAMPLES OF MAGNESIUM ALLOY ML19

Fedor N. Karachevtsev¹, Sergey G. Eroshkin¹, Nikolay V. Trofimov¹,
Alexander A. Leonov¹, Natalya A. Popovnina²

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

²PJSC «ODK-Kuznetsov», Samara, Russia; lab@uec-kuznetsov.ru

Abstract: The development of technology for the manufacture and production of reference materials (CRMs) of the composition of the magnesium alloy ML19 has been carried out. Manufactured material for CRM pipes with a diameter of 40 mm and a height of 30 mm. Tests of the material for CRM have been carried out in order to validate it. The metrological characteristics of the CRM were established, a metrological examination was carried out, and the conclusion on the verification of the CRM test results for the composition of the ML19 magnesium alloy.

Keywords: standard sample, magnesium alloys, spectroscopy, manufacturing technology, type approval, uncertainty

For citation: Karachevtsev F.N., Eroshkin S.G., Trofimov N.V., Leonov A.A., Popovnina N.A. Development of standard samples of magnesium alloy ML19. Trudy VIAM, 2022, no. 1 (107), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-26-34.

Введение

Как конструкционные материалы магниевые сплавы обладают рядом преимуществ по сравнению со сплавами на других основах: высокой удельной прочностью; хорошим сопротивлением усталости; стабильностью механических свойств при соблюдении требований при длительном хранении; способностью работать в широком диапазоне температур – от $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до высоких (кратковременно – до $300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$, длительно – до $200\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$); высокой демпфирующей способностью; хорошим тепловым и противошумным экранированием и др. Эти свойства востребованы для изделий авиационной, космической и оборонной промышленности. Применение магниевых сплавов позволяет улучшить весовую эффективность элементов конструкции летательных аппаратов, повысить дальность полета и полезную массу изделий, а также улучшить их тактико-технические характеристики и ресурс работы [1, 2]. При этом замена деталей и узлов из алюминиевых сплавов на магниевые сплавы приводит к снижению массы этих конструктивных элементов на 25–30 %.

В настоящее время за рубежом вновь возрастает интерес к магниевым сплавам с позиции их применения в летательных аппаратах, где по своим характеристикам они могут успешно конкурировать даже с композиционными углепластиковыми [3].

Сплав марки МЛ19 относится к группе жаропрочных литейных магниевых сплавов системы Mg-PZM-Zr . В состав сплава входят такие легирующие элементы, как неодим, иттрий, цирконий и цинк. В сплавах этой системы необходимо контролировать наличие вредных примесей (алюминия, кремния, железа, никеля, меди и бериллия) в соответствии с ГОСТ 2856–79. Сплав рекомендуется применять для изготовления деталей летательных аппаратов, приборов, агрегатов (корпусов насосов, помп, картеров, маслоотстойников, крышек блоков, кронштейнов, ферм, рам) изделий для авиакосмической промышленности и машиностроения, работающих длительно при температуре до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для обеспечения единства измерений и контроля качества материалов и полуфабрикатов из них необходимы стандартные образцы (СО) состава сплавов [4–6]. В задачу данной работы входит разработка СО состава магниевого сплава МЛ19, которые позволят проводить анализ материала магниевых сплавов в процессе выплавки для оперативной корректировки их состава.

Для проведения такого анализа используется современное химико-аналитическое оборудование (оптико-эмиссионный спектрометр Q8 Magellan, рентгенофлуоресцентный анализатор типа S8 Tiger). Однако корректные и достоверные результаты на таком оборудовании можно получить только при наличии СО состава сплавов соответствующих марок. В настоящее время в отрасли отсутствуют комплекты СО состава магниевого сплава МЛ19 для спектрального анализа [7–9].

Назначение СО: аттестация, валидация методик (методов) измерений и контроль точности результатов измерений состава магниевого сплава МЛ19 и аналогичных по химическому составу магниевых сплавов методами спектрального анализа; калибровка средств измерений состава магниевых сплавов при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методик калибровки; установление и контроль стабильности калибровочной (градуировочной) характеристики при соответствии метрологических и технических характеристик СО требованиям методики измерений; проверка средств измерений состава магниевых сплавов.

В данной работе к СО предъявляли следующие основные требования:

- материал СО должен быть однороден по химическому составу, не иметь трещин, пор и прочих дефектов;
- аттестованные значения СО должны охватывать интервал легирования сплава МЛ19 для построения градуировочных зависимостей на спектральном оборудовании;

– комплект СО должен состоять из пяти экземпляров стандартных образцов.

Основными задачами, решаемыми в процессе выполнения работы, являлись:

- выбор технологии выплавки материала для СО, которая обеспечивала бы получение однородного материала заданного химического состава;
- изготовление и выпуск комплектов СО;
- установление метрологических характеристик СО и требований к ним;
- разработка комплекта документов на СО в целях утверждения их типа.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [10].

Материалы и методы

Измерения методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой проводили на спектрометрах Ultima 2 и Agilent 5100 с аксиальным обзором плазмы по методикам МИ 1.2.078–2018 и МИ 1.2.079–2018 [11, 12]. Масс-спектрометрические исследования выполняли на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCap-Qc по МИ 1.2.080–2018. Измерения методом атомно-абсорбционной спектроскопии осуществляли на спектрометре Varian 240FS по ГОСТ 3240–76. Исследование однородности распределения элементов в материале для СО проводили на спектрометре Q8 Magellan оптико-эмиссионным методом анализа по ГОСТ 7728–79 [13].

Объектом исследования в данной работе является материал СО из магниевого сплава МЛ19 (комплект) для его спектрального анализа.

Результаты и обсуждение

Проведенный анализ научно-технической информации в области выплавки сплавов системы легирования Mg–PЗМ–Zr показал, что для обеспечения плотной бездефектной структуры материалов для СО возможно проводить выплавку сплава в печи с газовым обогревом и заливкой металла в металлический кокиль диаметром 60 мм.

Выбор и расчет шихтовых составов СО из сплава МЛ19 для выплавки материала для СО (пять экземпляров с разным химическим составом) проводили таким образом, чтобы был обеспечен широкий диапазон содержания основных легирующих элементов для сплава МЛ19.

Стандартные образцы с таким химическим составом обеспечивают построение градуировочных графиков с широким диапазоном содержания элементов, что поможет сделать выводы о соответствии или несоответствии состава сплава нормативной документации для сплава МЛ19 и близких по химическому составу сплавов. В табл. 1 приведен расчетный шихтовой состав сплава МЛ19 для выплавки СО.

Таблица 1

Шихтовой состав сплава МЛ19 для проведения выплавки стандартных образцов (СО)

Индекс СО	Содержание элементов, % (по массе)									
	Y	Nd	Zn	Zr	Al	Be	Cu	Fe	Ni	Si
МЛ19-1	1,4	1,0	0,005	0,600	0,0005	0,0001	0,0003	0,0003	0,0009	0,0005
МЛ19-2	0,5	2,0	0,400	1,000	0,0050	0,0002	0,0010	0,0001	0,0005	0,0010
МЛ19-3	2,4	2,5	0,150	0,100	0,0010	0,0003	0,0008	0,0010	0,0020	0,0020
МЛ19-4	1,2	2,2	0,900	0,005	0,0500	0,0005	0,0200	0,0200	0,0010	0,0030
МЛ19-5	1,5	2,7	0,800	0,400	0,0030	0,0002	0,0005	0,0010	0,0100	0,0001
По ГОСТ 2856–79	1,4– 2,2	1,6– 2,3	0,100– 0,600	0,400– 1,000	0,0300	0,0010	0,0300	0,0100	0,0050	0,0300

Проведена отработка технологических режимов выплавки материала для СО состава магниевых сплавов МЛ19, а именно способов введения основных легирующих элементов и примесей: сначала вводили чушковой магний, далее цинк, медь, а затем лигатуры магний–цирконий, магний–иттрий и магний–неодим.

При введении примесей в состав сплава МЛ19 цирконий осаждается в жидком расплаве на дно тигля, что приводит к неоднородному его распределению в отливках. Поэтому при введении примесей в сплав МЛ19 не добавляли цирконий. В соответствии с выбранным составом произведены расчет и навеска шихтовых материалов для каждой плавки.

После введения каждого легирующего элемента производили тщательное перемешивание расплава, а зеркало расплавленного металла покрывали флюсом. В момент введения легирующих компонентов и перемешивания расплава возникали очаги горения, поэтому поверхность расплава присыпали флюсом ВИ-2.

Отливку заготовок СО производили в чугунный кокиль. Из одной плавки получали по четыре слитка (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид отливки из материала для стандартных образцов

Заготовки СО обтачивали на токарном станке до диаметра 40 мм, разрезали на отрезном круге и отторцовывали с целью отбора стружки для химического анализа. Схема разрезки приведена на рис. 2.

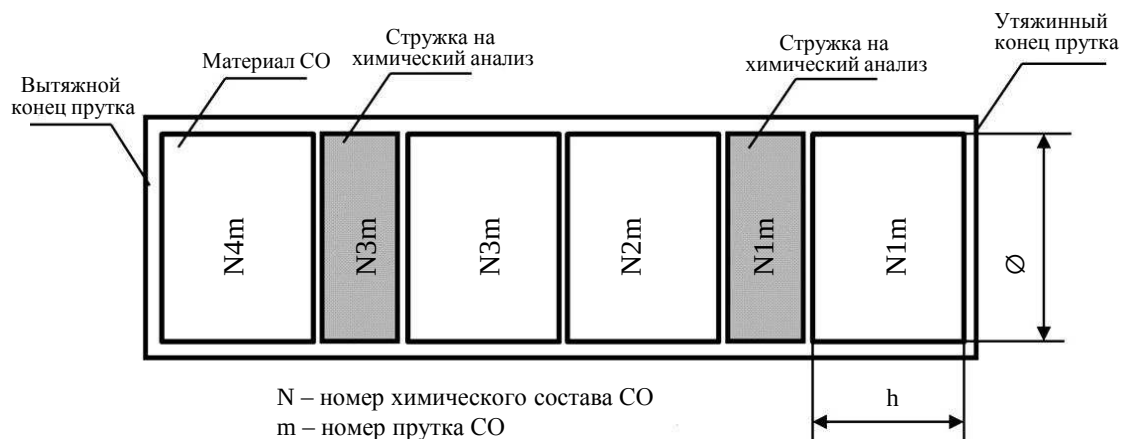


Рис. 2. Схема разрезки заготовки стандартного образца (СО)

Таким образом, отобрано по восемь проб материала от каждого состава СО в виде стружки. В дальнейшем пробы материала от каждого состава СО смешивали между собой; методом квартования отбирали образцы стружки для химического анализа.

Для спектрального анализа изготовлены СО состава магниевое сплава МЛ19 диаметром 40 мм и высотой 30 мм. На образцы нанесена маркировка. Общий вид комплекта СО состава магниевое сплава МЛ19 приведен на рис. 3.



Рис. 3. Комплект стандартных образцов состава магниевое сплава МЛ19

Исследование однородности СО проводили совместно с определением аттестованных значений в соответствии с РМГ 53–2002 «Стандартные образцы. Оценивание метрологических характеристик с использованием эталонов и образцовых средств измерений» [14].

Характеристику однородности (S_n) рассчитывали по алгоритму, приведенному в РМГ 53–2002. Результаты определения характеристики однородности СО представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика однородности (в % (отн.)) стандартных образцов (СО) из сплава МЛ19

Индекс СО	Y	Nd	Zn	Zr	Al	Be	Cu	Fe	Ni	Si
МЛ19-1	0,2	0,2	1,4	0,2	1,6	2,0	2,5	0,7	5,7	0,7
МЛ19-2	0,2	0,2	0,2	0,2	1,0	–	1,1	1,01	2,9	8,2
МЛ19-3	0,4	0,4	0,4	2,3	2,6	–	3,3	0,8	–	0,7
МЛ19-4	0,2	0,4	0,5	0,8	2,0	1,4	0,4	0,8	–	0,5
МЛ19-5	0,3	0,2	0,4	0,3	2,1	0,7	0,9	0,4	2,4	0,5

Характеристика однородности для легирующих элементов <1 % свидетельствует об их хорошей растворимости в объеме материала и возможности его использования в качестве СО.

Аттестованные значения массовых долей цинка, циркония, неодима, иттрия, алюминия, никеля, меди, железа, кремния и бериллия в СО определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой.

Согласно методикам измерений, представленным в работе [12], растворение проб материалов для СО проводили в смесях соляной, азотной и фтористоводородной кислот. После этого растворы переносили в мерные колбы и доводили до метки бидистиллированной водой. Затем, согласно методикам измерений, отбирали аликвотные части анализируемых растворов, добавляли раствор бария в качестве внутреннего стандарта и доводили объем раствора в колбе бидистиллированной водой до метки.

Установление градуировочных характеристик осуществляли непосредственно перед проведением измерений. Для каждого градуировочного раствора выполняли не менее пяти измерений (реплик) интенсивностей аналитических линий определяемого элемента. Продолжительность реплики составляла 5 с. Растворы анализируемых проб последовательно вводили в источник возбуждения и измеряли интенсивности аналитических линий определяемых элементов. В соответствии с программным обеспечением, управляющим спектрометром, для каждого раствора выполняли по три параллельных

измерения интенсивности и вычисляли среднее значение. С помощью градуировочной зависимости находили содержание определяемого элемента в растворе пробы.

Дополнительно методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводили определение примесей.

Способ установления прослеживаемости аттестованного значения СО – применение Государственного первичного эталона единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах на основе спектральных методов ГЭТ 196–2015.

Алгоритм расчета характеристики погрешности, обусловленной способом установления аттестованного значения СО, приведен в п. 4.2 РМГ 53–2002 «Оценивание метрологических характеристик с использованием эталонов и образцовых средств измерений».

Погрешность аттестованных значений СО ($D_{\text{атт}}$) рассчитывали по формуле

$$D_{\text{атт}} = (D_{\text{м}}^2 + 4 \cdot S_{\text{н}}^2)^{0,5},$$

где $D_{\text{м}}$ – погрешность метода, используемого для установления аттестованного значения, а $S_{\text{н}}$ – характеристика однородности для легирующих элементов, рассчитанные в соответствии с РМГ 53–2002.

Результаты определения метрологических характеристик СО из сплава МЛ19 приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Аттестованная характеристика стандартных образцов (СО) из сплава МЛ19

Индекс СО	Содержание элементов, % (по массе)									
	Y	Nd	Zn	Zr	Al	Be	Cu	Fe	Ni	Si
МЛ19-1	1,45	1,12	0,0073	0,590	0,0020	0,00002	0,0004	0,0007	0,00090	0,0007
МЛ19-2	0,66	2,13	0,3700	0,510	0,0026	–	0,0011	0,0008	0,00045	0,0005
МЛ19-3	2,44	2,55	0,1650	0,154	0,0062	–	0,0009	0,0037	0,00210	0,0030
МЛ19-4	1,27	2,00	0,9100	0,004	0,0550	0,00059	0,0247	0,0190	0,00170	0,0050
МЛ19-5	1,51	2,73	0,8400	0,619	0,0034	0,00020	0,0007	0,0033	0,00830	0,0020

Таблица 4

**Границы абсолютной погрешности аттестованных значений
государственных стандартных образцов (ГСО)
(при доверительной вероятности 0,95)**

Индекс СО	Границы абсолютной погрешности элементов, %									
	Y	Nd	Zn	Zr	Al	Be	Cu	Fe	Ni	Si
МЛ19-1	0,09	0,05	0,0015	0,040	0,0010	0,00001	0,0001	0,0001	0,00040	0,0002
МЛ19-2	0,06	0,12	0,0100	0,030	0,0001	–	0,0004	0,0002	0,00018	0,0002
МЛ19-3	0,12	0,12	0,0050	0,016	0,0014	–	0,0002	0,0004	0,00050	0,0010
МЛ19-4	0,04	0,12	0,0400	0,001	0,0060	0,00017	0,0019	0,0040	0,00060	0,0010
МЛ19-5	0,08	0,13	0,0300	0,029	0,0007	0,00010	0,0002	0,0003	0,00060	0,0010

С использованием разработанных СО из магниевого сплава МЛ19 построены градуировочные зависимости на оптико-эмиссионном и рентгенофлуоресцентном анализаторах (рис. 4). Зависимости имеют линейный вид, что позволяет применять СО для калибровки спектрального оборудования.

Проведена метрологическая экспертиза в соответствии с требованиями ГОСТ 8.315–2019 [15] и других документов (протоколов испытаний материалов для СО и исследования однородности СО состава сплава МЛ19, проекта описания их типа, паспорта, этикетки).

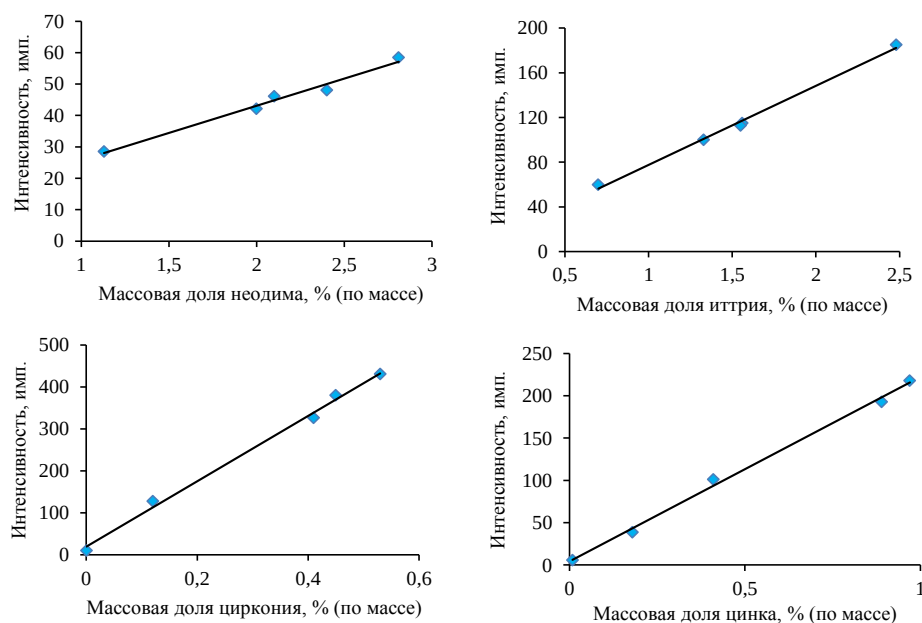


Рис. 4. Градуировочные зависимости, построенные на рентгенофлуоресцентном анализаторе S8 Tiger

Оформлены заключения по проверке результатов испытаний СО состава сплава МЛ19. Выпущено 10 комплектов СО утвержденного типа (ГСО 11695–2021) состава магниевого сплава МЛ19 с описанием типа и паспортом, которые имеют метрологические характеристики, приведенные в табл. 3 и 4.

Заключения

Разработанная технология изготовления материала для СО состава высокопрочного магниевого сплава МЛ19 обеспечивает получение однородных СО заданного химического состава и основана на выплавке в газовом горне с последующим разливом в цилиндрические чугунные изложницы. Определены последовательность и способы введения при требуемой температуре основных легирующих элементов и примесей в материал для СО из сплава МЛ19.

Изготовлены СО состава магниевого сплава МЛ19 для спектрального анализа в виде цилиндров диаметром 40 мм и высотой 30 мм. Выполнено исследование однородности СО и установлено, что характеристика однородности для легирующих элементов <1 % свидетельствует о хорошей растворимости элементов в объеме материала. Проведено определение химического состава полученных СО, показано, что содержание элементов в экземплярах СО имеет широкий диапазон значений и позволяет использовать их для градуировки спектрального оборудования.

С применением Государственного первичного эталона ГЭТ 196–2015 проведены испытания в целях утверждения типа СО из магниевого сплава МЛ19. Метрологические характеристики СО рассчитаны по РМГ 53–2002. Метрологическая экспертиза выполнена в соответствии с требованиями ГОСТ 8.315–2019 и других документов (протоколов испытаний, проектов описания типа и паспорта СО).

Выпущены комплекты СО утвержденного типа (ГСО 11695–2021) состава магниевого сплава МЛ19 с описаниями типа и паспортами.

Разработанные СО состава магниевого сплава МЛ19 позволят проводить анализ сплава МЛ19 и близких по составу сплавов опико-эмиссионным методом анализа, в котором не используется растворение проб в кислотах. Это снизит трудоемкость по сравнению с атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой методом анализа в ~3 раза и энергозатраты в ~3,5 раза.

Список источников

1. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 3–10.
3. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
4. Карачевцев Ф.Н., Ерошкин С.Г., Мостяев И.В., Акинина М.В., Славин А.В. Разработка стандартных образцов состава магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16 // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-39-47.
5. Каблов Е.Н., Чабина Е.Б., Морозов Г.А., Муравская Н.П. Оценка соответствия новых материалов с использованием СО и МИ высокого уровня // Компетентность. 2017. № 2. С. 40–46.
6. Луценко А.Н., Перов Н.С., Чабина Е.Б. Новые этапы развития Испытательного центра // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 460–468. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-460-468.
7. Карпов Ю.А., Барановская В.Б. Аналитический контроль – неотъемлемая часть диагностики материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1-І. С. 5–12.
8. Карпов Ю.А. Аналитический контроль металлургического производства. М.: Металлургия, 1995. С. 97–107.
9. Отто М. Современные методы аналитической химии: в 2 т. М.: Техносфера, 2003. Т. 1. 416 с.
10. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
11. Fariñas J.C., Rucandio I., Pomares-Alfonso M.S. et al. Determination of rare earth and concomitant elements in magnesium alloys by inductively coupled plasma optical emission spectrometry // Talanta. 2016. No. 154. P. 53–62. DOI: 10.1016/j.talanta.2016.03.047.
12. Дворецков Р.М., Барановская В.Б., Карачевцев Ф.Н., Летов А.Ф. Определение редкоземельных металлов в магниевых сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой // Измерительная техника. 2019. № 4. С. 62–66.
13. ГОСТ 7728–79. Сплавы магниевые. Методы спектрального анализа. М.: Изд-во стандартов, 2004. 11 с.
14. РМГ 53–2002. Стандартные образцы. Оценивание метрологических характеристик с использованием эталонов и образцовых средств измерений. М.: Изд-во стандартов, 2004. 8 с.
15. ГОСТ 8.315–2019. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения М.: Стандартинформ, 2019. 33 с.

References

1. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.
2. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Rare metals and rare-earth elements are materials for modern and future high technologies. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2013, no. S2, pp. 3–10.
3. Duyunova V.A., Volkova E.F., Uridiya Z.P., Trapeznikov A.V. Dynamics of the development of magnesium and cast aluminum alloys. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2017, no. S, pp. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
4. Karachevtsev F.N., Eroshkin S.G., Mos-tayev I.V., Akinina M.V., Slavin A.V. Development of standard samples of magnesium alloys VML20 and VMD16. Trudy VIAM, 2021, no. 5 (99), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 16, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-39-47.

5. Kablov E.N., Chabina E.B., Morozov G.A., Muravskaya N.P. Conformity assessment of new materials using high-level RM and MI. *Kompetentnost*, 2017, no. 2, pp. 40–46.
6. Lutsenko A.N., Perov N.S., Chabina E.B. The new stages of development of Testing Center. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 460–468. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-460-468.
7. Karpov Yu.A., Baranovskaya V.B. Analytical control is an integral part of material diagnostics. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 1-I, pp. 5–12.
8. Karpov Yu.A. Analytical control of metallurgical production. Moscow: Metallurgiya, 1995, pp. 97–107.
9. Otto M. Modern methods of analytical chemistry: in 2 vols. Moscow: Technosfera, 2003, vol. 1. 416 p.
10. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
11. Fariñas J.C., Rucandio I., Pomares-Alfonso M.S. et al. Determination of rare earth and concomitant elements in magnesium alloys by inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Talanta*, 2016, no. 154, pp. 53–62. DOI: 10.1016/j.talanta.2016.03.047.
12. Dvoretsov R.M., Baranovskaya V.B., Karachevtsev F.N., Letov A.F. Determination of rare earth metals in magnesium alloys by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Izmeritelnaya tekhnika*, 2019, no. 4, pp. 62–66.
13. State Standard 7728–79. Magnesium alloys. Methods of spectral analysis. Moscow: Publishing house of standards, 2004, 11 p.
14. RMG 53–2002. Standard samples. Assessment of metrological characteristics using standards and exemplary measuring instruments. Moscow: Publishing house of standards, 2004, 8 p.
15. State Standard 8.315–2019. Standard samples of the composition and properties of substances and materials. Basic provisions. Moscow: Standartinform, 2019, 33 p.

Информация об авторах

Карачевцев Федор Николаевич, начальник лаборатории, к.х.м., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ерошкин Сергей Геннадьевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Трофимов Николай Вадимович, Инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Леонов Александр Андреевич, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Поповнина Наталья Николаевна, начальник спектральной лаборатории, Публичное акционерное общество «ОДК-Кузнецов», lab@uec-kuznetsov.ru

Information about the authors

Fedor N. Karachevtsev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey G. Eroshkin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikolay V. Trofimov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander A. Leonov, Head of laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalya A. Popovnina, Head of the spectral laboratory, Public Joint Stock Company «ODK-Kuznetsov», lab@uec-kuznetsov.ru

Статья поступила в редакцию 19.11.2021; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 10.12.2021.

The article was submitted 19.11.2021; approved after reviewing 10.12.2021; accepted for publication 10.12.2021.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-35-43

ПРИМЕНЕНИЕ АНГИДРИДА ФТАЛЕВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОЙ ДОЛИ ГИДРОКСИЛЬНЫХ ГРУПП В ПОЛИЭФИРЕ 24КЛ.А. Прокопова¹¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Рассмотрена возможность замены ангидрида уксусной кислоты ангидридом фталевой кислоты при определении массовой доли гидроксильных групп в полиэфире 24К. Методом титриметрического анализа получены данные о содержании указанных функциональных групп, согласующиеся с данными более ранних анализов. Полноту протекания реакции контролировали методом инфракрасной спектроскопии, результаты которой свидетельствуют об успешном протекании процесса. Дополнительно проверена реакционная способность продукта с истекшим сроком годности.

Ключевые слова: полиэфир, содержание гидроксильных групп, фталевый ангидрид, ИК-спектроскопия, жизнеспособность, входной контроль сырья

Для цитирования: Прокопова Л.А. Применение ангидрида фталевой кислоты для определения массовой доли гидроксильных групп в полиэфире 24К // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-35-43.

Scientific article

PHTHALIC ANHYDRIDE APPLICATION FOR HYDROXYL GROUPS CONTENTS DETERMINATION IN POLYESTER 24KLilia A. Prokopova¹¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: The possibility of replacing acetic anhydride with phthalic anhydride when determining the hydroxyl groups contents in polyester 24K is discussed. Titrimetric analysis method obtained data on the content of these functional groups, consistent with previously analyzes. The reaction completeness was controlled by infrared spectroscopy, the results of which report on the successful process flow. Additionally, the reactivity of the product with an expired shelf life was checked.

Keywords: polyester, hydroxyl groups contents, phthalic acid anhydride, IR-spectroscopy, expiry, raw materials control

For citation: Prokopova L.A. Phthalic anhydride application for hydroxyl groups contents determination in polyester 24K. Trudy VIAM. 2022, no. 1 (107), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-35-43.

Введение

Композиционные материалы – это неоднородные сплошные материалы, состоящие из двух и более компонентов: матрицы и армирующих элементов. В результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется комплекс свойств композиции, не только отражающий исходные характеристики ее компонентов, но и включающий свойства, которыми исходные компоненты по отдельности не обладают. Объем мирового рынка полимерных композитов растет и спрос на них не показывает тенденцию к снижению [1, 2].

Полиэфир 24К – продукт поликонденсации этиленгликоля и глицерина с себадиновой кислотой [3], вследствие чего он является насыщенным сложным полиэфиром и применяется в отечественной промышленности в полиуретановых клеях, которые используются в двигателестроении [4]. Полиуретановые клеи отверждаются путем образования связи между изоцианатным отвердителем и гидроксильной группой полиэфира, а некоторые их свойства обусловлены, в том числе, образованием водородных связей [5]. Несмотря на то, что в основной документации на этот продукт указано применение его в клеевых композициях, в последнее время он, как и другие сложные эфиры, находит все большее применение и в лакокрасочной промышленности [6, 7]. Применение полиэфиров в лакокрасочных составах способствует образованию прочной пленки на различных поверхностях, что повышает срок службы изделий. В патенте [7] при разработке радиопрозрачной полимерной композиции введение полиэфира способствовало наиболее равномерному распределению компонентов в эпоксидном олигомере, что приводило к образованию качественного лакокрасочного покрытия, повышению его водостойкости, адгезионных и физико-механических свойств. Указанные свойства весьма важны при разработке покрытий, стойких к воздействию климата [8].

Простые алифатические полиэфиры применяются в качестве сырья для полиуретановых материалов, которые используются в составах защитных эмалей для авиационной техники [9].

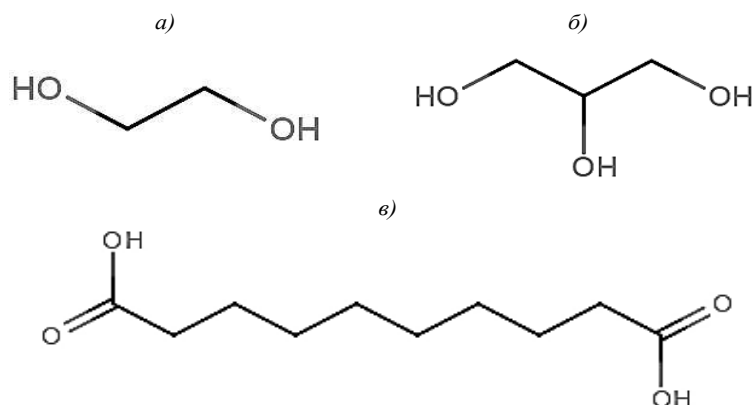


Рис. 1. Исходные компоненты для производства полиэфира 24К: а – этиленгликоль; б – глицерин; в – себадиновая кислота

Поскольку в составе полиэфира 24К содержится не только этиленгликоль (рис. 1, а), но и трехатомный спирт глицерин (рис. 1, б), поэтому строение молекул указанного полиэфира – разветвленное, что также влияет на свойства композиций на его основе [10]. Кроме гидроксильных групп, в структуре полиэфира содержатся свободные карбоксильные группы, присутствие которых обусловлено его третьим компонентом – себадиновой кислотой (рис. 1, в). Их количество характеризуется кислотным числом. Оба указанных вида функциональных групп являются важными показателями качества и влияют на степень сшивки, структуру и свойства получаемых композиций.

Реакционноспособность полиэфира напрямую связана с содержанием функциональных групп. Если функциональных групп будет недостаточно, то образуемая пленка получится непрочной, а при избытке возможны трудности – нестабильность композиции при хранении и переработке. Избыток кислотных или гидроксильных групп также ведет к неполному отверждению композиции. Это может приводить к повышенной гидрофильности, что влечет за собой недостаточную стойкость итоговой пленки вследствие неполного использования функциональных групп, а также приводит к снижению стабильности при хранении [11]. Таким образом, определение содержания функциональных групп является одним из важных испытаний этого вида сырья.

Определение массовой доли гидроксильных групп можно проводить различными методами – химическими и физико-химическими. Физико-химический метод анализа заключается в построении градуировочного графика зависимости оптической плотности раствора глицерина и определении по нему содержания гидроксильных групп в исследуемой композиции [12]. Однако этот метод рекомендуется использовать для эпоксидных смол. Химический же метод предполагает этерификацию гидроксильных групп избытком ангидрида, гидролиз неизрасходованного ангидрида и последующее титрование получившейся в ходе реакции кислоты. В основном стандарте для полиэфира 24К использован именно этот метод анализа, однако в нем применяется уксусный ангидрид (рис. 2, а). Применение этого вещества в настоящее время ограничено, вследствие чего возникает необходимость поиска новых методов анализа, при которых не используется ангидрид уксусной кислоты.

Отмеченный ранее метод ИК-спектроскопии хотя и применяется для количественного определения гидроксильных групп, имеет ряд особенностей, ограничивающих его использование. Присутствие гидроксильных групп приводит к появлению в ИК-спектре широкой и заметной полосы, однако кроме того, в этой области может проявляться обертоном карбонильной группы, которая имеется в молекулах полиэфира [13]. Следует также отметить, что положение полосы валентных колебаний гидроксильной группы в молекуле зависит не только от концентрации, но и от температуры, а кроме того, на него влияют водородные связи, образуемые искомой функциональной группой [14]. При образовании водородных связей внутри димеров или полимеров обычно узкая полоса поглощения свободных гидроксильных групп становится более широкой и может приобретать более сложный контур пиков в диапазоне интересующих исследователя волновых чисел [15]. Совокупность этих факторов мешает количественному определению искомого показателя таким способом.

С учетом вышеизложенного целью данного исследования являлась разработка методики определения гидроксильного числа в полиэфире 24К альтернативным методом и оценка его эффективности.

В качестве реагента для определения гидроксильных групп методом обратного титрования выбран фталевый ангидрид. Это ангидрид двухосновной кислоты, поэтому реакция полиэфиров с ним мало исследована.

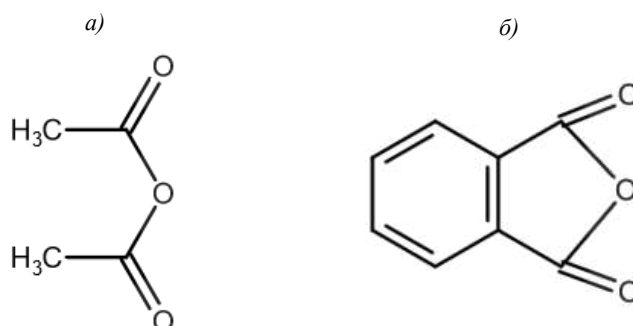


Рис. 2. Химические формулы уксусного (а) и фталевого ангидридов (б)

Фталевый ангидрид (рис. 2, б) в среде пиридина не реагирует с фенольными гидроксилами, но этерифицирует первичные и вторичные спирты [16]. Поскольку фталевый ангидрид из-за своего строения менее реакционноспособен, чем уксусный, то количество стандартов, использующих его для определения гидроксильного числа, также меньше. В работе [17] фталированием в течение 35 мин при температуре 182 °С в пиридине успешно определено гидроксильное число сложного полиэфира после его синтеза (методика разработана Bayer Corp.). Для полиоксиалкильных конденсатов

алифатических и алициклических соединений применяют также фталирующую смесь, в которой на 100 мл пиридина приходится 14 г ангидрида. Реакция фталирования проходит при температуре кипения пиридина (~115 °С). Гидролиз и титрование проводят при комнатной температуре одновременно. Аналогично в отечественном стандарте определяют массовую долю гидроксильных групп в простых полиэфирах для полиуретанов [18]. Для сложных полиэфиров в указанном стандарте рекомендуется применение ангидрида уксусной кислоты, однако причины отказа от этого реактива указаны ранее.

Материалы и методы

В данной работе исследованы два образца полиэфира 24К после продолжительного хранения в течение 45 и 15 мес с момента изготовления. Гарантийный срок хранения продукта составляет 2 года, однако ГОСТ допускает применение полиэфира после этого срока при соответствии его свойств требованиям стандарта. Производителем проверены показатели качества указанных образцов, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Свойства исследуемых образцов полиэфира 24К

Свойства	Значения свойств для образцов		
	по ГОСТ 22234–76	после 45 мес с момента изготовления (1)	после 15 мес с момента изготовления (2)
Внешний вид	Парафиноподобная масса от серого до темно-серого или коричневого цвета	Парафиноподобная масса серого цвета	
Плотность 50 %-ного раствора полиэфира в ацетоне при 20 °С, г/см ³	0,93–0,94	0,937	0,936
Динамическая вязкость раствора полиэфира в ацетоне с массовой долей 50 % при 20 °С, мПа·с	20–30	27	27
Кислотное число, мг КОН на 1 г полиэфира	8–18	17,0	17,5
Массовая доля гидроксильных групп, %	5,2–8,0	5,3	5,3
Массовая доля воды, %	Не более 0,3	0,1	0,1

Для определения массовой доли гидроксильных групп в полиэфире химическим методом в данной работе в методиках использован ангидрид фталевой кислоты.

Методика 1. Реакционную смесь готовили следующим образом: к 14 г фталевого ангидрида добавляли 100 мл безводного свежеперегнанного пиридина и тщательно перемешивали при комнатной температуре. Для реакции использовали ~1,0 г полиэфира, взятого с точностью до 0,0001 г, и 20 мл фталирующей смеси, добавленные пипеткой. После растворения полиэфира колбу с реакционной смесью устанавливали на песчаную баню, закрывали обратным холодильником и нагревали до температуры кипения пиридина (115 °С)*. Далее, не отсоединяя колбу, через холодильник в нее сливали 20 мл дистиллированной воды и продолжали нагрев**. Затем колбу снимали с бани, охлаждали до комнатной температуры и титровали до появления розовой окраски водным раствором гидроксида натрия с концентрацией 1 моль/л в присутствии 1%-ного спиртового раствора фенолфталеина.

* В табл. 2 этот процесс указан как время реакции фталирования.

** В табл. 2 этот процесс указан как время гидролиза.

Методика 2. Реакционную смесь готовили аналогично методике 1. В 20 мл смеси растворяли ~1,0 г полиэфира 24К, взятого с точностью до 0,0001 г, после чего колбу плотно закрывали притертой пробкой и нагревали в сушильном шкафу при температуре 60 °С в течение 2 ч. Далее колбу с реакционной смесью устанавливали на песчаную баню, закрывали обратным холодильником и нагревали до температуры кипения пиридина. Реакцию проводили в течение 1 ч. По окончании реакции, не отсоединяя колбу, через холодильник в нее сливали 10 мл пиридина, снимали колбу и добавляли 100 мл дистиллированной воды. Момент добавления воды считали началом гидролиза фталевого ангидрида, который проводили в течение 20 ч при комнатной температуре, затем раствор титровали и хорошо перемешивали в колбе. В качестве титранта применяли водный раствор гидроксида натрия с концентрацией 1 моль/л, в качестве индикатора: 1 %-ный спиртовой раствор фенолфталеина. Конечной точкой титрования считали появление розовой окраски, не исчезающей в течение 30 с.

Поскольку в образовании трехмерной матрицы полимера участвуют также остаточные гидроксильные группы себаценовой кислоты, то их содержание определяют простым прямым титрованием и именуют кислотным числом [3]. Для полноты информации о качестве полиэфира это число в виде массовой доли кислотных гидроксильных групп прибавляли к массовой доле спиртовых гидроксильных групп, определенных описанным ранее методом фталирования.

Для того чтобы удостовериться в полноте протекания реакции фталирования, получены ИК-спектры исходного полиэфира и полиэфира после реакции с фталевым ангидридом. Раствор фталевого ангидрида в пиридине добавляли к полиэфире, проводили реакцию как описано ранее и после реакции высушивали реакционную смесь в течение 1 сут в следующих условиях: при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 30 %, далее выдерживали непосредственно перед снятием спектра 30 мин в сушильном шкафу при температуре 40 °С. Образец высушивали, так как при проведении исследования раствора полосы поглощения растворителя мешают расшифровке спектра. Высушенные образцы помещали в ИК-спектрометр с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения для записи спектров.

Поскольку количество функциональных групп в полиэфире должно показывать, насколько он реакционноспособен, то проконтролировать это свойство помогают другие показатели качества, описанные в стандарте на продукт, – время пастообразования и жизнеспособность клея на основе полиэфира. В качестве отвердителя применяют толуиленизотиоцианат – бифункциональный изотиоцианат, образующий с гидроксильными группами прочную химическую связь. Время пастообразования – это время между смешением компонентов (50 %-ный раствор полиэфира в ацетоне, отвердитель, портландцемент и вода в качестве катализатора отверждения в соотношении соответственно 16:8:2:0,1) и потерей текучести этой смеси. Непосредственно после смешивания система имеет очень низкую вязкость, а по истечении времени при регулярном перемешивании визуально наблюдается заметный переход в пастообразное состояние.

После этого замеряется жизнеспособность, которую проверяют при нанесении образовавшейся пасты на металлическую пластину. Отсчитывается время от момента пастообразования до потери способности наноситься на означенную пластину вследствие отверждения композиции. Композиция перестает наноситься на пластину, так как теряется адгезия, которая зависит от функциональности компонентов.

Результаты и обсуждение

Как видно из данных табл. 2, полученных по методике 1, в результате повторения методики из ГОСТ 22234–76 с простой заменой уксусного ангидрида фталевым, реакция не протекает и не дает понимания о содержании гидроксильных групп в образце.

Поэтому метод анализа модифицировали, исходя из информации из других научно-технических литературных источников. В стандарте ASTM D4274–11 [19] при анализе сырья для полиуретанов предлагается выбрать из нескольких методов – в их числе три варианта фталирования. В одном из них гидроксильные группы этерифицируют раствором фталевого ангидрида в пиридине в закрытой колбе при температуре 98 °С, в другом же – над реакционной колбой находится холодильник, а температура реакции равна температуре кипения пиридина. Принято решение скомбинировать эти подходы, получив методику 2. Температуру проведения реакции в закрытой колбе в сушильном шкафу снизили во избежание вылета пробки из-за повышения давления внутри сосуда.

Таблица 2

Результаты титриметрического определения массовой доли гидроксильных групп в полиэфире 24К после реакции фталирования

Объем воды, взятой для гидролиза, мл	Время реакции фталирования	Время гидролиза	Массовая доля спиртовых гидроксильных групп, найденная в результате обратного титрования, %, для образца		Суммарная массовая доля гидроксильных групп, %, для образца	
			1	2	1	2
20	30 мин	30 мин	0	0	0,5	0,5
20	1 ч	1 ч	0	0	0,5	0,5
20	2 ч	2 ч	0	0	0,5	0,5
20	2 ч	16 ч	0	0	0,5	0,5
20	2 ч	20 ч	1,1	0,9	1,6	1,4
100	2 ч	20 ч	2,4	2,8	2,9	3,3
100	См. методику 2	20 ч	5,0	5,0	5,5	5,5

Таким образом, выявлено, что полнота протекания реакции значительно зависит от времени, затраченного на саму реакцию фталирования, и от времени, отведенного на последующий гидролиз.

Результаты ИК-спектроскопии высушенных образцов после проведения реакции фталирования приведены на рис. 3.

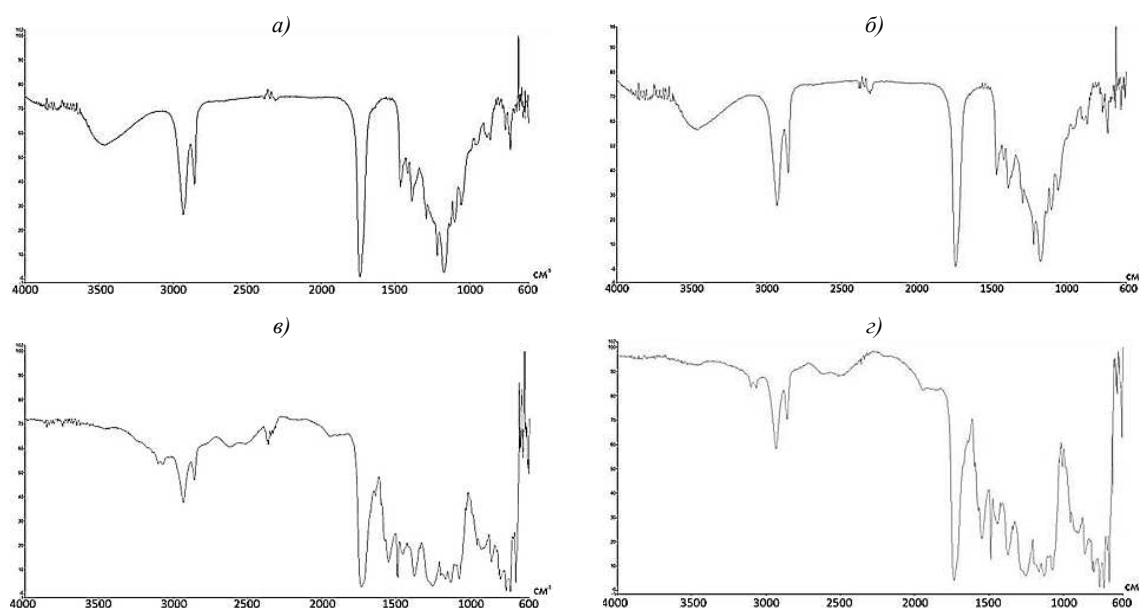


Рис. 3. Инфракрасные спектры полиэфира 24К в исходном состоянии для образцов 1 (а) и 2 (б), а также после реакции фталирования образцов 1 (в) и 2 (з)

Как видно из показанных спектров, у исходных образцов наблюдается широкая полоса поглощения с пиком в области длины волны 3450 см^{-1} (рис. 3, а, б), что является характеристической частотой для гидроксильной группы. Полоса поглощения расширена, по-видимому, вследствие образования гидроксильными группами водородных связей. Указанный пик исчезает со спектра после проведения реакции фталирования (рис. 3, в, г), что свидетельствует о достаточно полном ее протекании.

В результате проверки времени пастообразования и жизнеспособности клея на основе полиэфира, проведенной в соответствии со стандартом на продукт, получены данные, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Результаты проверки реакционной способности исследуемых образцов полиэфира 24К

Свойства	Значения свойств для образцов		
	по ГОСТ 22234–76	после 45 мес с момента изготовления (1)	после 15 мес с момента изготовления (2)
Время пастообразования клея на основе полиэфира, мин	10–60	42	33
Жизнеспособность клея на основе полиэфира, ч	3–12	6,5	5,0

Полученные данные свидетельствуют о том, что реакционная способность полиэфира со временем хотя и снижается, но еще остается на уровне, достаточном для признания продукта годным по этому показателю качества.

Заключения

При помощи анализов и дополнительных исследований материала проверена гипотеза о возможности применения фталевого ангидрида для анализа массовой доли гидроксильных групп в полиэфире 24К, что не отмечалось ранее в научно-технической литературе. Несмотря на то что методика анализа требует более длительного по времени эксперимента, чем предлагается в стандарте на продукт, она применима в условиях отсутствия основного используемого реактива – ангидрида уксусной кислоты. Дальнейшее исследование может расширить применение описанного метода анализа и модифицировать его с целью уменьшения времени проведения реакций и увеличения точности результатов: вследствие использования для титрования раствора высокой концентрации снижается точность определения. Однако описанной методики достаточно для оценки качества продукта, а ее точность совпадает с точностью методики из исходного стандарта. Кроме того, полученные результаты дают дополнительную информацию о жизнеспособности полиэфира после окончания его гарантийного срока годности. Будущие исследования в этой области могут быть также направлены на замену указанных ангидридов другими веществами, способными реагировать со спиртовыми гидроксильными группами в полимерных или олигомерных структурах.

Список источников

1. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10/18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
2. Kablov E.N. Chemistry in Aviation Materials Science (Химия в авиационном материаловедении) // Russian Journal of General Chemistry. 2011. Vol. 81. No. 5. P. 967–969.

3. ГОСТ 22234–76. Полиэфир 24К. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1989. 10 с.
4. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник РАН. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12.
5. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
6. Эпоксиполиэфирная лакокрасочная композиция: пат. 2472830 Рос. Федерация. № 2011140686/05; заявл. 07.10.11; опубл. 20.01.13.
7. Полимерная радиопрозрачная композиция: пат. 2570446 Рос. Федерация. № 2014137816/05; заявл. 18.09.14; опубл. 10.12.15.
8. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
9. Семенова Л.В., Нефедов Н.И., Белова М.В., Лаптев А.Б. Системы лакокрасочных покрытий для вертолетной техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
10. Перов Н.С. Конструирование полимерных материалов на молекулярных принципах. I. Создание полимерных материалов с дополнительными механизмами диссипации механической энергии при низких температурах // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-50-55.
11. Яковлев А.Д. Порошковые краски. Л.: Химия, 1987. 216 с.
12. ГОСТ 17555–72. Пластмассы. Методы определения содержания гидроксильных групп в эпоксидных смолах и эпоксидированных соединениях. М.: Изд-во стандартов, 1979. 11 с.
13. Наканиси К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений. М.: Мир, 1965. 219 с.
14. Сиггиа С. Инструментальные методы анализа функциональных групп органических соединений. М.: Мир, 1974. 464 с.
15. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений: справочные материалы. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 55 с.
16. Клайн Г. Аналитическая химия полимеров. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. Т. 1. 592 с.
17. Kline B.J., Beckman E.J., Russell A.J. One-step biocatalytic synthesis of linear polyesters with pendant hydroxyl groups // Journal of the American chemical society. 1998. Vol. 120. No. 37. P. 9475–9480. DOI: 10.1021/ja9808907.
18. ГОСТ 25261–82. Полиэфиры простые и сложные для полиуретанов. Метод определения гидроксильного числа. М.: Изд-во стандартов, 1982. 5 с.
19. ASTM D4274–11. Standard Test Methods for Testing Polyurethane Raw Materials: Determination of Hydroxyl Numbers of Polyols. ASTM International, 2011. 9 с.

References

1. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
2. Kablov E.N. Chemistry in Aviation Materials Science. Russian Journal of General Chemistry, 2011, vol. 81, no. 5. P. 967–969.
3. State standart 22234–76. Polyester 24K. Specifications. Moscow: Publishing house of standards, 1989, 10 p.
4. Kablov E.N. Aviation materials science: results and prospects. Vestnik RAN, 2002, vol. 72, no. 1, pp. 3–12.
5. Petrova A.P., Malysheva G.V. Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
6. Epoxypolyester paint composition: pat. 2472830 Rus. Federation, no. 2011140686/05; filed 07.10.11; publ. 20.01.13.
7. Polymer radiotransparent composition: pat. 2570446 Rus. Federation, no. 2014137816/05; filed 18.09.14; publ. 10.12.15.

8. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
9. Semenova L.V., Nefedov N.I., Belova M.V., Laptev A.B. Systems of paint coatings for helicopter equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
10. Perov N.S. Design of polymer materials on the molecular principles. I. The development of polymer materials with additional mechanisms of dissipation of mechanical energy at low temperatures. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-50-55.
11. Yakovlev A.D. Powder paints. Leningrad: Khimiya, 1987, 216 p.
12. State Standard 17555–72. Plastics. Methods for determining the content of hydroxyl groups in epoxy resins and epoxidized compounds. Moscow: Publishing house of standards, 1979, 11 p.
13. Nakanishi K. Infrared spectra and structure of organic compounds. Moscow: Mir, 1965, 219 p.
14. Siggia S. Instrumental methods for the analysis of functional groups of organic compounds. Moscow: Mir, 1974, 464 p.
15. Tarasevich B.N. IR spectra of the main classes of organic compounds: reference materials. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2012, 55 p.
16. Kline G. Analytical chemistry of polymers. Moscow: Publ. of foreign literature, 1963, vol. 1, 592 p.
17. Kline B.J., Beckman E.J., Russell A.J. One-step biocatalytic synthesis of linear polyesters with pendant hydroxyl groups. *Journal of the American chemical society*, 1998, vol. 120, no. 37, pp. 9475–9480. DOI: 10.1021/ja9808907.
18. State Standard 25261–82. Polyethers are simple and complex for polyurethanes. Method for determining the hydroxyl number. Moscow: Publishing house of standards, 1982, 5 p.
19. ASTM D4274-11. Standard Test Methods for Testing Polyurethane Raw Materials: Determination of Hydroxyl Numbers of Polyols. ASTM International, 2011, 9 p.

Информация об авторах

Прокопова Лилия Александровна, инженер
2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» –
ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Lilia A. Prokopova, Second Category Engineer,
NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, ad-
min@viam.ru

Статья поступила в редакцию 09.11.2021; одобрена после рецензирования 11.11.2021; принята к публикации 11.11.2021.
The article was submitted 09.11.2021; approved after reviewing 11.11.2021; accepted for publication 11.11.2021.

Научная статья

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-44-52

ПОЛУЧЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ ГРАНУЛ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МОЛИБДЕНА

А.П. Бобровский¹, И.Ю. Ефимочкин¹, А.Н. Большакова¹, А.А. Худнев¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Рассматривается процесс получения гранул сферической формы металлического композиционного материала (МКМ) на основе молибдена с исходной фракцией размером 40–63 мкм. Результаты, полученные в ходе исследований, показали принципиальную возможность сфероидизации гранул высокотемпературных МКМ на основе тугоплавких металлов, армированных частицами керамических соединений. Однако выявлена необходимость более глубокого изучения и тщательного подбора режимов сфероидизации для минимизации образования сателлитов на гранулах в процессе обработки в плазме электродугового разряда.

Ключевые слова: металлические композиционные материалы, механическое легирование, порошковая металлургия, сфероидизация, агломерация, аддитивные технологии, металлические композиционные материалы

Для цитирования: Бобровский А.П., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н., Худнев А.А. Получение сферических гранул высокотемпературного металлического композиционного материала на основе молибдена // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-44-52.

Scientific article

PRODUCTION OF SPHERICAL GRANULES OF A HIGH-TEMPERATURE METAL COMPOSITE MATERIAL BASED ON MOLYBDENUM

Andrey P. Bobrovskiy¹, Ivan Yu. Efimochkin¹, Alexandra N. Bolshakova¹, Alexey A. Khudnev¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: Discusses the process of obtaining spherical granules of a metal composite material based on molybdenum with an initial fraction of 40–63 microns. The results obtained during the research showed the fundamental possibility of spheroidization of granules of high-temperature metal composite materials based on refractory metals reinforced with particles of ceramic compounds. However, the need for a more thorough study and selection of spheroidization modes to minimize the formation of satellites on granules during processing in an electric arc discharge plasma is revealed.

Keywords: metal composite materials, mechanical alloying, powder metallurgy, spheroidization, agglomeration, additive technologies, metal composite materials

For citation: Bobrovskiy A.P., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N., Khudnev A.A. Production of spherical granules of a high-temperature metal composite material based on molybdenum. Trudy VIAM, 2022, no. 1 (107), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-44-52.

Введение

С развитием научно-технического прогресса повышаются требования к механическим и физическим свойствам деталей и изделий [1, 2]. Развитие всех отраслей промышленности невозможно представить без создания новых уникальных материалов и технологий производства [3, 4].

При создании современных летательных аппаратов требуется замена традиционных материалов на новые, сочетающие высокую сопротивляемость температурному воздействию и относительно низкую плотность. Исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными в области никелевых жаропрочных сплавов, показали, что альтернативой могут стать сплавы и композиционные материалы, в основе которых должен быть один из тугоплавких металлов, таких как ниобий, тантал, вольфрам, молибден, хром и гафний, а в качестве армирующей фазы – керамические частицы, например силициды перечисленных металлов [4–9]. Из данного класса материалов перспективным является металлический композиционный материал (МКМ) на основе молибдена, армированный частицами тугоплавких соединений. Путем армирования молибденовой матрицы частицами тугоплавких соединений удастся добиться снижения плотности материала и увеличения высокотемпературного сопротивления ползучести благодаря блокированию дислокаций при механическом воздействии [10]. Следует также отметить способность некоторых МКМ на основе молибдена работать при высоких температурах в окислительной среде без нанесения дополнительных покрытий. Наличие данного свойства можно объяснить образованием силицида молибдена при добавлении кремния в состав композиционного материала, что в свою очередь приводит к формированию защитной силикатной пленки оксида кремния (SiO_2) [11]. Благодаря этому использование МКМ на основе молибдена в летательных аппаратах авиационного и космического назначения позволит уменьшить массу элементов конструкции, а также повысить их конструкционную надежность, жесткость и температурную устойчивость.

Ввиду армирования частицами тугоплавких соединений МКМ на основе молибдена обладают высокой твердостью. По этой причине они плохо поддаются механической обработке, что сказывается на продолжительности изготовления деталей из них и на конечной стоимости материалов из-за необходимости использования дорогостоящего обрабатывающего инструмента и его большого расхода. Одним из перспективных направлений для решения данной проблемы является применение для изготовления деталей из МКМ на основе молибдена аддитивных технологий, которые позволяют получать заготовки с минимальным припуском на механическую обработку [12]. Благодаря возможности получения заготовок, близких по геометрической форме к конечным деталям, удастся сократить продолжительность производственного цикла и увеличить финансовую эффективность, поскольку отсутствует необходимость использования большого количества дорогостоящего обрабатывающего инструмента. Кроме того, применение аддитивных технологий позволяет минимизировать образование поверхностных трещин и дефектов, образующихся при грубой механической обработке, поскольку, как правило, постобработка после использования технологий селективного лазерного спекания (СЛС) и селективного электронно-лучевого сплавления (СЭЛС) заключается в газостатировании и шлифовании.

Для использования порошка в аддитивных технологиях гранулы должны иметь сферическую форму и обладать определенным спектром технологических свойств. Одним из методов изготовления МКМ на основе молибдена, при котором удастся получить мультифазные гранулы порошка за счет механической диффузии, происходящей между частицами исходных компонентов, является механохимический синтез. Гранулы

порошка после механохимического синтеза имеют осколочную форму и низкий уровень технологических свойств, что не позволяет их использовать в аддитивном производстве. Решением данной проблемы может являться процесс сфероидизации, при котором под воздействием плазмы электродугового разряда, сил поверхностного натяжения и силы тяжести гранулы приобретают сферическую форму.

Однако следует учитывать, что из-за своей высокой хрупкости, а также специфики процесса механохимического синтеза гранулы МКМ на основе молибдена обладают размером <10 мкм, который не подходит для применения в аддитивных технологиях. Согласно данным научно-технической литературы [13, 14], для метода СЛС используют гранулы размером 10–63 мкм, а для метода СЭЛС – размером 40–100 мкм. Получить гранулы необходимого размера возможно с помощью процесса агломерации, при котором порошок после механохимического синтеза спекают в вакуумной печи и происходит укрупнение частиц благодаря высокотемпературной диффузии, и последующего размолла на мельницах-дробилках полученных «спеков».

В данной работе исследован технологический процесс получения гранул сферической формы размером 40–63 мкм из высокотемпературного МКМ на основе молибдена.

Материалы и методы

Исследуемые гранулы представляли собой дисперсноупрочненные частицы на основе системы Mo–Si–B, произведенные из элементарных порошков. Гранулы получали по следующей технологической схеме: навеска исходных порошков, смешивание шихты из исходных порошков, механохимический синтез, сушка полученной смеси в вакуумном шкафу, агломерация полученных гранул в вакуумной печи, размол полученного спека с последующим рассевом гранул и отбором нужной фракции, сфероидизация гранул. Размер гранул исходных порошков – менее 50 мкм. Содержание молибдена в общей массе материала составляло >70 %. Смешивание шихты из исходных порошков проводили на валковой мельнице Daihan BML-6 фирмы Daihan Scientific со скоростью и продолжительностью смешивания, достаточными для получения гомогенизированной однородной смеси. Механохимический синтез проводили в шестикамерной установке высокоэнергетического смешивания фирмы Union Process Inc. в среде этилового спирта с добавлением размольных тел в виде шаров в необходимом количестве. Объем спирта выбирали, исходя из объема загружаемого порошка. Спирт использовали в качестве защитной среды, предотвращающей возможное окисление порошка при локальном разогреве во время проведения механического легирования. Кроме того, добавление спирта минимизирует вероятность оседания частиц порошка на дне камеры под размольным валом. Скорость вращения вала выбирали достаточной для гомогенизации смеси и получения композиционных гранул. Агломерацию гранул МКМ на основе молибдена проводили в высокотемпературной вакуумной печи. Для дробления спеков после агломерации использовали дисковую мельницу DM 400 компании Retsch. Отсев мелкой фракции после дробления проводили на воздушно-центробежном классификаторе ИГ-6УМ. Для последующего разделения на фракции применяли просеивающую машину HAVER EML 200 компании Haver & Boecker и комплект сит с ячейками разного размера. Сфероидизацию гранул МКМ на основе молибдена проводили на установке плазменной сфероидизации металлического порошка. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон.

На каждом этапе технологического процесса исследованы фракционный состав гранул и их форма. Определение размера частиц проводили по дифракции лазерного излучения на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц Analysette 22 в

среде жидкости (дистиллированная вода) по ГОСТ Р 57923–2017. Исследование формы гранул осуществляли методом сканирующей электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Hitachi SU8010.

Результаты и обсуждение

Шихтовую смесь из элементарных порошков подвергали механическому легированию в установке высокоэнергетического смешивания для получения композиционных гранул. Легирование выполняли по режиму, обеспечивающему получение композиционных гранул, состоящих из частиц исходных порошков. По результатам процесса провели анализ фракционного состава (рис. 1) и формы гранул (рис. 2).

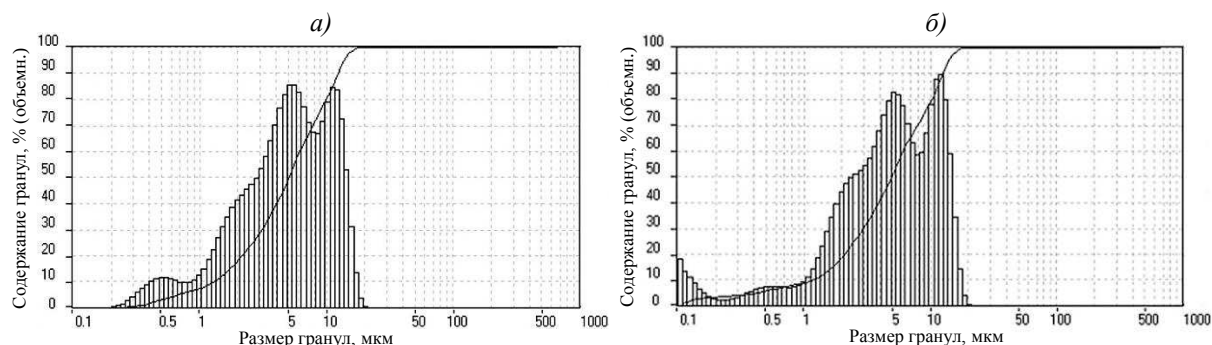


Рис. 1. Дифференциальная (а) и интегральная кривые (б) распределения гранул МКМ на основе молибдена после механического легирования

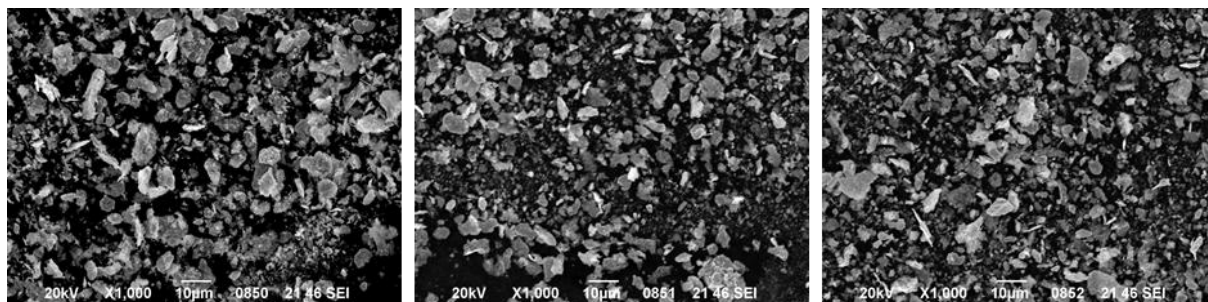


Рис. 2. Фотографии (РЭМ, $\times 1000$) гранул МКМ на основе молибдена после механического легирования

На рис. 1 представлены дифференциальная и интегральная кривые распределения гранул МКМ на основе молибдена после механического легирования. Видно, что 85 % гранул имеют размер не более 10 мкм, который по меркам аддитивных технологий является непригодным для дальнейшего применения. Такой размер обусловлен как размерами частиц исходных компонентов, не превышающих 50 мкм, так и добавлением этилового спирта к порошку во время проведения механохимического синтеза для минимизации вероятности его окисления, что в свою очередь способствует более интенсивному измельчению гранул.

На рис. 2 представлены фотографии гранул МКМ на основе молибдена после механического легирования. Видно, что гранулы имеют осколочную форму. Исходя из размера, который не превышает 10 мкм, и осколочной формы частиц, можно сделать вывод, что порошок МКМ на основе молибдена не обладает необходимыми для дальнейшего использования в аддитивном производстве свойствами.

Для получения гранул необходимого размера (10–63 мкм – для метода СЛС и 40–100 мкм – для метода СЭЛС) можно прибегнуть к процессу агломерации, в результате которого из исходных мелкодисперсных частиц удастся получить гранулы большего размера. Решением проблемы осколочной формы частиц может служить процесс плазменной сфероидизации, при котором в результате воздействия плазмы электродугового разряда частицы приобретают сферическую форму.

С целью получения гранул необходимого размера порошок из МКМ на основе молибдена агломерировали в вакуумной печи. В данном процессе укрупнения гранул достигают благодаря их взаимной диффузии, происходящей при воздействии высокой температуры. Мелкие гранулы порошка, взаимодействуя друг с другом, образуют более крупные гранулы, которые в свою очередь взаимодействуют с другими аналогичными гранулами. В результате этого процесса получают твердый спек порошка, состоящий из гранул, «склепленных» между собой.

После агломерации полученный спек раздробили на дисковой мельнице. Получившийся порошок просеяли на воздушно-центробежном классификаторе для удаления «пыльной» фракции, затем разделили на фракции на вибропросеивающей машине. Для дальнейших исследований выбрали гранулы с фракцией размером 40–63 мкм как подходящие для обоих методов (СЭЛС, СЛС) аддитивного производства.

Как видно из результатов фракционного анализа, представленных на рис. 3, несмотря на отсев сторонней фракции на классификаторе и вибропросеивающей машине, в порошке присутствуют гранулы с фракцией размером как <40 мкм, так и >63 мкм. Причем количество гранул с фракциями размером <40 мкм в предоставленной пробе находится на уровне 7 %, а количество гранул с фракциями размером >63 мкм – на уровне ~30 %. Если обратить внимание на фотографии гранул, представленных на рис. 4, то можно увидеть, что их поверхность неровная, поскольку облеплена «пылью». Исходя из этих двух факторов, можно предположить, что в процессе деления на фракции на вибропросеивающей машине оставшаяся после просева на воздушно-центробежном классификаторе «пыльная» фракция оседает на гранулах «годного» размера, затем в процессе фракционного анализа отделяется и всплывает. Именно этим обусловлено наличие фракции размером <40 мкм в пробе порошка. Гранулы МКМ на основе молибдена после агломерации, так же как и после механического легирования, имеют осколочную форму и, как следствие, разные размеры в различных направлениях, один из которых превышает 63 мкм. Это можно объяснить наличием в пробе порошка фракций размером >63 мкм.

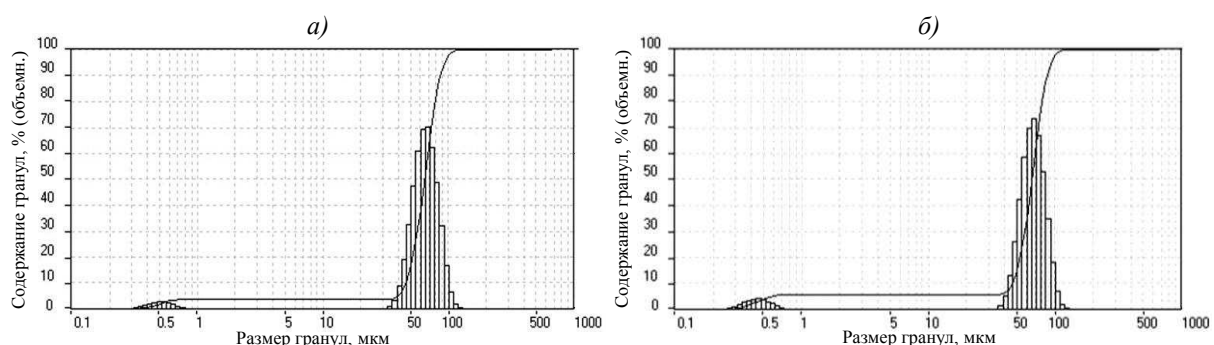


Рис. 3. Дифференциальная (а) и интегральная кривые (б) распределения гранул МКМ на основе молибдена после агломерации с последующим дроблением и просевом через сита с ячейками размером 40 и 63 мкм

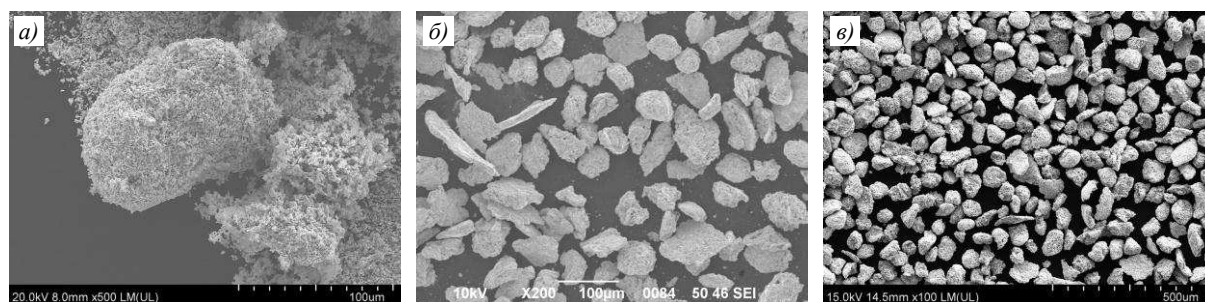


Рис. 4. Фотографии (РЭМ, *a* – $\times 500$; *б* – $\times 200$; *в* – $\times 100$) гранул МКМ на основе молибдена после агломерации с последующим дроблением и просевом через сита с ячейками размером 40 и 63 мкм

Сфероидизацию гранул на основе молибдена проводили при воздействии плазмы электродугового разряда по нескольким режимам (меняя расход транспортирующего и дополнительного газов) на установке плазменной сфероидизации металлического порошка. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон.

На рис. 5 представлены дифференциальная и интегральная кривые распределения агломерированных гранул МКМ на основе молибдена после сфероидизации. Следует отметить, что интегральная кривая распределения гранул после сфероидизации по сравнению с интегральной кривой распределения гранул после агломерации сдвинута ближе к началу координат и берет начало ближе к оси абсцисс. Высота пиков дифференциальной кривой распределения гранул после сфероидизации меньше высоты пиков дифференциальной кривой распределения гранул после агломерации. По итогам исследований гранул зафиксирован их максимальный размер: 107 мкм – после агломерации и 88 мкм – после сфероидизации. Кроме того, в пробе порошка после агломерации присутствовали гранулы с фракциями размером от 0,05 до 1 мкм в количестве 3,74 %, а в пробе порошка после сфероидизации количество гранул с фракциями такого размера уменьшилось и составило 0,19 %. Все это обусловлено выгоранием мелких и частичным испарением более крупных гранул в процессе их обработки при воздействии плазмы электродугового разряда [15]. Указанную особенность необходимо учитывать при подборе размера исходных гранул для получения сфероидизированных частиц с заданным фракционным составом.

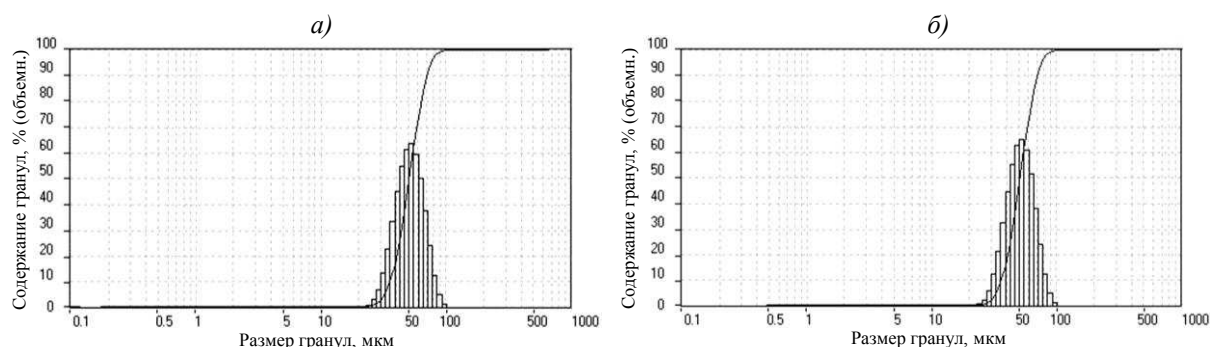


Рис. 5. Дифференциальная (*a*) и интегральная кривые (*б*) распределения агломерированных гранул МКМ на основе молибдена после сфероидизации

Из данных, представленных на рис. 6, видно, что гранулы после сфероидизации имеют преимущественно округлую форму. На некоторых гранулах находятся наросты – так называемые сателлиты. В данном случае сателлиты представляют собой керамические

частицы, «сплавленные» с матричным материалом. Образование сателлитов обусловлено тем, что керамические частицы, введенные в матричный сплав путем механического легирования, имеют меньшую плотность относительно матрицы и при расплавлении композиционной частицы при воздействии плазмы электродугового разряда «всплывают» на поверхность. На образование сателлитов оказывает влияние и то, что температура плавления керамических частиц больше температуры плавления матричных компонентов. В связи с этим в процессе сфероидизации, по-видимому, керамические частицы не удается полностью перевести из твердого состояния в состояние расплава, что также влияет на их взаимосвязь с матричными частицами.

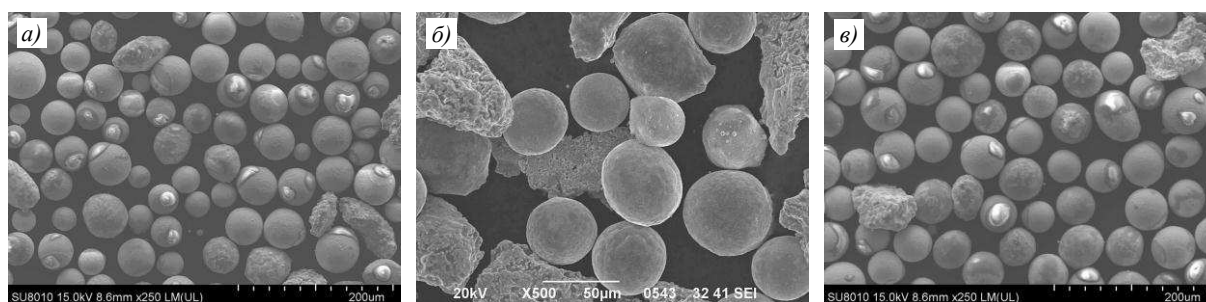


Рис. 6. Фотографии (РЭМ; а, в – $\times 250$; б – $\times 500$) агломерированных гранул МКМ на основе молибдена после сфероидизации

Заключения

В ходе проведенных исследований удалось установить, что порошок МКМ на основе молибдена, полученный методом механохимического синтеза, невозможно использовать в аддитивных технологиях без проведения дополнительных технологических операций и обработки, исходя из размера и формы гранул.

Получить гранулы с фракциями требуемого размера для применения в аддитивных технологиях возможно методом высокотемпературной диффузии.

Установлена принципиальная возможность получения гранул сферической формы из МКМ на основе молибдена при воздействии плазмы электродугового разряда. Однако ввиду наличия в составе материала частиц керамических соединений требуется корректировка режимов сфероидизации для минимизации образования сателлитов на гранулах конечного продукта.

Выявлено, что процесс сфероидизации в плазме электродугового разряда влияет на размер получаемых гранул из МКМ на основе молибдена относительно исходного сырья. В процессе сфероидизации фракционный состав частиц уменьшается благодаря полному испарению мелкой и частичному испарению крупной фракций.

Список источников

1. Кашин Д.С., Дергачева П.Е., Стехов П.А. Жаростойкие покрытия, наносимые шликерным методом (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 5 (65). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-64-75.
2. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
3. Гращенков Д.В., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Высокотемпературные металломатричные композиционные материалы, армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 318–328. DOI: 10.18577/2071-9240-2017-0-S-318-328.

4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. Светлов И.Л. Высокотемпературные Nb–Si-композиты // Материаловедение. 2010. № 9. С. 29–38.
6. Светлов И.Л. Высокотемпературные Nb–Si-композиты (окончание) // Материаловедение. 2010. № 10. С. 18–27.
7. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
8. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
9. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
10. Ершова И.О., Федотенкова О.Б. Порошковые композиционные материалы на основе молибдена // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 1. С. 93–98.
11. Титов Д.Д., Каргин Ю.Ф., Лысенков А.С. и др. Влияние содержания WSi_2 и добавок алюмосиликатов магния на окисление и прочностные свойства композитов $MoSi_2$ – WSi_2 // Материаловедение. 2012. № 7. С. 45–49.
12. Климкина А.А. Изучение структуры и свойств молибденовых сплавов, полученных методами аддитивных технологий // XLVII Гагаринские чтения: сб. трудов Междунар. молодежной науч. конф. М., 2021. С. 81.
13. Дубинкин Д.М., Исмаилова Ш.Я., Искандарова Е.И., Усаченко О.И. Современное состояние, пути развития, области применения селективного лазерного спекания (SLS) // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева, 2019. С. 174–177.
14. Залесский В.Г., Поболь И.Л., Бакиновский А.А., Губко А.Д. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2018. Т. 63. № 2. С. 169–180.
15. Родионов А.И., Ефимочкин И.Ю., Самохин А.В., Синайский М.А. Влияние процесса сфероидизации на фракционный состав и морфологию сплава ВКНА-4У, армированного частицами Al_2O_3 – Y_2O_3 // Труды ВИАМ. 2019. № 11 (83). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-12-21.

References

1. Kashin D.S., Dergacheva P.E., Stekhov P.A. Heat resistant slurry coatings (review). Trudy VIAM, 2018, no. 5 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-64-75.
2. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Problems of creation and prospects for the use of heat-resistant high-entropy alloys. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2018, no. 2 (51), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
3. Grashchenkov D.V., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. High-temperature metal-matrix composite materials reinforced with particles and fibers of refractory compounds. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2017, no. S, pp. 318–328. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-318-328.
4. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. Vestnik Rossiyskoy akademii nauk, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
5. Svetlov I.L. High-temperature Nb – Si-composites. Materialovedenie, 2010, no. 9, pp. 29–38.
6. Svetlov I.L. High-temperature Nb – Si-composites (end). Materialovedenie, 2010, no. 10, pp. 18–27.
7. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. Krylya Rodiny, 2019, no. 7-8, pp. 54–58.
8. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. Intellect i tekhnologii, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.

9. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
10. Ershova I.O., Fedotenkova O.B. Powder composite materials based on molybdenum. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2015, no. 1, pp. 93–98.
11. Titov D.D., Kargin Yu.F., Lysenkov A.C. et al. Influence of WSi_2 content and magnesium aluminosilicate additives on oxidation and strength properties of $MoSi_2$ – WSi_2 composites. *Materialovedenie*, 2012, no. 7, pp. 45–49.
12. Klimkina A.A. Study of the structure and properties of molybdenum alloys obtained by the methods of additive technologies. XLVII Gagarin readings: collection of articles. Proceedings of Mezhdunar. youth scientific. conf. Moscow, 2021, p. 81.
13. Dubinkin D.M., Ismailova Sh.Ya., Iskandarova E.I., Usachenko O.I. Current state, development paths, areas of application of selective laser sintering (SLS). Innovations in information technologies, mechanical engineering and motor transport: materials III Intern. scientific-practical conf. Kemerovo: Kuzbass state tech. un-t them T.F. Gorbachev, 2019, pp. 174–177.
14. Zalesky V.G., Pobol I.L., Bakinovskiy A.A., Gubko A.D. Obtaining metal products using electron-beam additive technologies. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi, A series of physical and technical sciences*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 169–180.
15. Rodionov A.I., Efimochkin I.Yu., Samokhin A.V., Sinayskiy M.A. The influence of the spheroidization process on the fractional composition and morphology of alloy VKNA-4u in a particle-reinforced sheath Al_2O_3 – Y_2O_3 . *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-12-21.

Информация об авторах

Бобровский Андрей Павлович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ефимочкин Иван Юрьевич, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Большакова Александра Николаевна, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Худнев Алексей Александрович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Andrey P. Bobrovskiy, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ivan Y. Efimochkin, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexandra N. Bolshakova, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey A. Khudnev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.09.2021; одобрена после рецензирования 12.11.2021; принята к публикации 12.11.2021.

The article was submitted 28.09.2021; approved after reviewing 12.11.2021; accepted for publication 12.11.2021.

Научная статья

УДК 678

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-53-65

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ (обзор)

М.И. Валуева¹, А.А. Евдокимов¹, А.В. Начаркина¹, А.М. Губин¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Представлен обзор научно-технической литературы в области применения полимерных композиционных материалов в автомобилестроении. Приведены история вопроса, а также современные тенденции в области материалов, технологий и технических решений, применяемых для решения поставленных задач. С учетом мирового опыта рассмотрены примеры и показана перспективность использования в автомобилестроении полимерных композиционных материалов и технологий их переработки, разрабатываемых для авиационно-космической отрасли.

Ключевые слова: материаловедение, автомобилестроение, неметаллические материалы, композиционные материалы, полимерные композиционные материалы, технологии

Для цитирования: Валуева М.И., Евдокимов А.А., Начаркина А.В., Губин А.М. Полимерные композиционные материалы и технологии в автомобилестроении (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-53-65.

Scientific article

POLYMER COMPOSITE MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY (review)

Maria I. Valueva¹, Anton A. Evdokimov¹, Anastasia V. Nacharkina¹, Anton M. Gubin¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: Provides an overview of scientific and technical literature in the field of application of polymer composite materials in the automotive industry. The paper presents the history of the issue, as well as current trends in the field of materials, technologies and the technical solutions used to solve the assigned tasks. Taking into account world experience, examples are given and the prospects of using polymer composite materials and technologies for their processing developed for the aerospace industry in automotive industry are shown.

Keywords: materials science, automotive industry, non-metallic materials, composite materials, polymer composite materials, technologies

For citation: Valueva M.I., Evdokimov A.A., Nacharkina A.V., Gubin A.M. Polymer composite materials and technologies in the automotive industry (review). Trudy VIAM, 2022, no. 1 (107), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-53-65.

Введение

Технические решения для сложных технических систем и конструкций изделий современного транспортного машиностроения являются ноу-хау компаний-производителей, для реализации которых может быть использован широкий спектр современных металлических и неметаллических материалов, выбираемых с учетом требуемых характеристик [1–8].

В автомобильной промышленности, особенно в спортивной индустрии, совместно с обеспечением необходимых прочностных и ресурсных показателей применяемых материалов актуальной является задача реализации весовой эффективности, что позволит обеспечить экономное расходование горючего и снижение негативного воздействия на окружающую среду, а в случае электромобилей – повышение запаса хода. В этой связи широкое распространение получило применение полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Ранее в работах [9, 10] был представлен аналитический обзор в области композиционных материалов в автомобильной промышленности, а также рассмотрены некоторые применяемые технологические процессы.

В данной статье эта тематика находит продолжение – представлен обзор российской и зарубежной научно-технической литературы, патентов на изобретения в области свойств, истории и современного состояния применения ПКМ и технологий их переработки для автомобильной отрасли.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Полимерные композиционные материалы в автомобилестроении

Согласно экспертной оценке, в 2021 г. объем мирового рынка ПКМ достигнет ~13 млн т, что в стоимостном выражении составит ~105 млрд долл., а к 2023 г. достигнет ~14 млн т, что в стоимостном выражении составит ~120 млрд долл. [11]. В структуре мирового рынка доля ПКМ в количестве ~(28–30) % приходится на транспортное машиностроение [11], в том числе перспективным является применение таких материалов в автомобилестроении.

Наиболее перспективными ПКМ применительно к конструкции автомобиля являются углепластики. По прогнозам, к 2022 г. годовая выручка от реализации углеродных композитов в мире достигнет 4,9 млрд долл. (4,21 млрд евро), что соответствует 20000 т углеродного волокна. В таблице сегментов рынка потребления углепластиковых материалов автомобильная промышленность выйдет на второе место, опередив ветряные турбины [12]. К 2023 г. потребление углеродных ПКМ в мире ожидается на уровне 197 тыс. т [13].

Одной из движущих сил развития мирового рынка является кооперация производителей исходных компонентов (композиционных материалов) с автопроизводителями – компаниями BASF и SGL Carbon, Toray и Nissan, Honda, GM и Teijin, JRL и Cytec, Ford и Dow Automotive, BMW и SGL Carbon, Daimler и Toray, SGL Group и Benteler Automotive и др. [12, 14].

История вопроса

Начало применения ПКМ в автомобильном секторе относится к 1940-м гг., когда был изготовлен прототип композитного автомобиля с корпусом из стекловолокна и с пневматической подвеской [12].

В 1950-х гг. в Англии несущую систему из стеклопластика использовали в конструкции компактных автомобилей (например, в автомобиле Rochdale Olympic со снаряженной массой 650 кг, в Lotus Elite со снаряженной массой 504 кг и в Mini Marcos со снаряженной массой 476 кг), имеющих, как правило, передний привод и двухместный кузов типа купе. Несущую систему каркасно-панельного типа с панелями из стеклопластика также использовали в конструкции автомобилей Chevrolet Corvette и Pontiac Firebird 1953 и 1967 гг. выпуска соответственно. В качестве примера может служить

создание в тот же период отечественного экспериментального автомобиля, созданного специалистами лаборатории «Колесные машины» Московского высшего технического училища им. Н.Э. Баумана. Полученный при изготовлении этого автомобиля опыт был в последующем применен в автомобилях ЗИЛ-135Л. В настоящее время стеклопластик в автомобилестроении находит широкое применение при создании элементов обшивки легковых автомобилей, а также в производстве несущих систем автобусов, кабин грузовых автомобилей и автомобилей-амфибий [15]. Мировые поставщики стеклопластика для автомобильного рынка – компании Owens Corning, Millfield Group, Vetrotex, Lanxess и Ahlstrom [12].

Начиная с 1970-х гг. происходит широкое внедрение углеродных волокон в качестве наполнителя для производства ПКМ, в том числе и для создания изделий автомобильной промышленности. Например, в 1978 г. на гоночном автомобиле McLaren MP4 британской фирмы применена несущая система из углепластика, что позволило повысить жесткость корпуса [15].

В 1992 г. из углепластика изготовлена несущая система автомобиля McLaren F1 – первой серийной модели спортивного автомобиля в мире. В 1995 г. углепластик использован в конструкции автомобиля Ferrari F50 с несущим корпусом в виде трехслойных панелей со средним слоем из арамидных сот [15].

Дальнейшее применение углепластиков в конструкции автомобилей только увеличивалось, о чем свидетельствует динамика выпуска автомобилей с несущей системой из ПКМ (рис. 1).

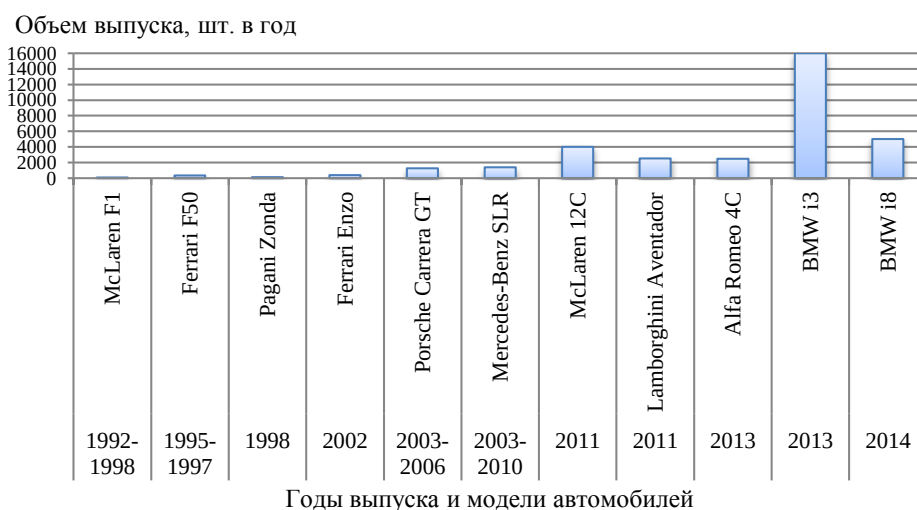


Рис. 1. Динамика выпуска автомобилей с несущей системой из полимерных композиционных материалов [15]

В настоящее время ПКМ являются неотъемлемой частью как спортивных автомобилей, так и массового сегмента автомобилестроения, включая электромобили. Так, благодаря применению ПКМ произошло снижение массы электромобиля BMW i3 (рис. 2) на 300 кг; снаряженная масса автомобиля составила 1195 кг. Несущая система из углепластика стала легче аналогичных систем – алюминиевой и стальной – на 30 и 50 % соответственно [15]. Масса алюминиевого и стального капотов автомобиля серийного производства составляет приблизительно 12 и 20 кг соответственно, углепластикового капота при обеспечении заданной жесткости и прочности конструкции – 8 кг [16]. При изготовлении капотов, дверей, крыш и деталей пола из ПКМ может быть обеспечено снижение массы изделия на 28–47 % [17, 18].



Несущая система McLaren MP4



Несущая система BMW i3



Колесный диск Porsche 911 Turbo S Exclusive Series

Рис. 2. Элементы автомобилей, изготовленные из углепластика [15, 20, 21]

В то же время полностью отказаться от использования металлических элементов несущей системы автомобиля не представляется возможным. Поэтому зачастую сочетают применение ПКМ и металлических материалов в конструкции. Так, совместное использование углепластика и алюминия в конструкции корпуса автомобиля Mercedes-Benz G 63 AMG позволило снизить массу изделия на 200 кг; масса автомобиля составила 2350 кг [19].

Существенное уменьшение массы автомобиля, обеспечиваемое применением ПКМ, приводит к значительной экономии горючего и, соответственно, снижению объема вредных выхлопов. Так, согласно расчетным данным, при уменьшении массы автомобиля на 7 кг повышение его экономичности может достигать 0,0042 км/л [22]. Устойчивость элементов из углепластика на высоких скоростях и способность поглощать энергию удара позволяют обеспечить необходимый уровень безопасности [23].

За рубежом одну из лидирующих позиций в производстве материалов для автомобильного сектора занимает компания Toray [13]. Карданные валы, изготовленные компанией Toray уже используются приблизительно в 1 млн автомобилей. Среди автомобильных применений – также шины с боковинами из углеродного волокна для улучшения устойчивости на поворотах, уже доступные для обычных легковых автомобилей [23].

Компанией Porsche разработаны колесные диски, полностью выполненные из углепластика на основе плетеного наполнителя (рис. 2 и 3). Масса одного полученного диска на 2,1 кг меньше стандартных легкосплавных колес при одновременном повышении прочности на 20 % [20, 21].

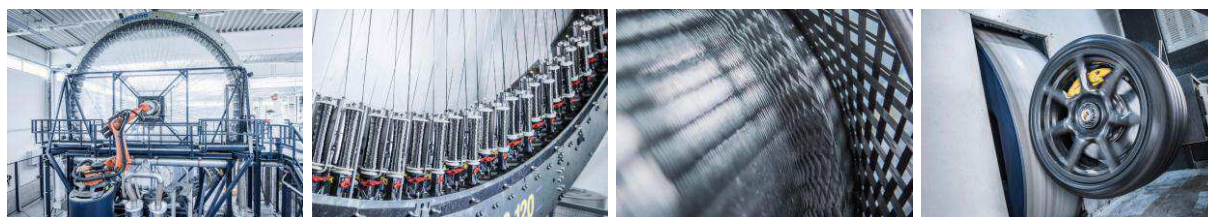


Рис. 3. Плетение углеволоконной основы колесного диска и его испытания [20, 21]

Вопросом повышения удельной мощности автомобиля за счет применения ПКМ занимаются также разработчики компании Automobili Lamborghini, при этом больше внимания уделяется ударопрочности и методам ремонта композиционных материалов. В автомобиле Aventador монокок спроектирован как цельная углеволоконная конструкция. В суперкаре Lamborghini Sesto Elemento («Шестой элемент») из углепластика изготовлены несущий кузов, передняя часть, наружные панели кузова, амортизаторы,

основные компоненты подвески, колесные диски и вал коробки передач, благодаря чему автомобиль обладает высокими характеристиками разгона, управляемости и меньшим тормозным путем [24]. Благодаря сотрудничеству компаний Lamborghini и Boeing в автомобильной отрасли появляются авиакосмические технологии [24].

В автомобилях будущего салон будет представлять собой многофункциональное рабочее пространство с применением более тонких, легких, жестких и прочных материалов. Примером оснащения интерьера является столик модульной конструкции из термопластичных углепластиков – столик имеет массу 690 г и выдерживает нагрузку до 50 кг [25]; при этом к числу преимуществ применения термопластичных композитов относится возможность вторичной переработки [23]. Пример технического решения по использованию отходов углепластика после вторичной переработки при изготовлении автомобильного спойлера представлен в изобретении [26]. Процесс состоит из нагрева углепластикового сырья (отходов), смешанных с АБС-пластиком, поликарбонатом, полиглицидилметакрилатом, порошком слюды и изопреновым каучуком, и экструдирования полученной смеси из двухшнековой машины.

Технологии переработки ПКМ в автомобилестроении

На начальном этапе применения ПКМ в автомобилестроении производство было малотоннажным, неавтоматизированным, использовался, как правило, ручной труд, изготовление несущей системы занимало до 3000 ч. Несущие системы современных автомобилей, например BMW i3, могут быть произведены за 4 ч [15].

При изготовлении эксклюзивных и дорогостоящих спортивных автомобилей может быть использован трудоемкий процесс отверждения пакета препрега углепластика в автоклаве при температуре до 100 °С и давлении 8 ат (0,8 МПа) [15]. На серийное производство дисков автомобилей из препрегов ориентированы компании Ford и BASF [21].

При изготовлении автомобилей массового сегмента, включая BMW i3, применяется RTM-технология при нагреве оснастки до температуры 100 °С [15].

Высокая стоимость производства деталей из ПКМ в настоящее время продолжает оставаться ограничивающим фактором их применения в автомобилестроении. Перспективными решениями являются автоматизация производства, а также применение новых технологий и материалов [27]. Так, возможна реализация автоматизированной технологии изготовления деталей из углепластиков для серийного производства, например листовых капотов двигателей автомобилей, за 15 мин [28]. Однако использование ПКМ для изготовления внешних обшивок транспортных средств должно производиться с учетом упруго-прочностных характеристик конструкции. Так, при описании способа реализации автоматизированного производства крыши автомобиля в патенте [29] предложено в качестве основных считать характеристики при изгибе и применительно к конструкции производить расчет с использованием метода конечных элементов. Выполнять математические расчеты при проектировании углепластиковых элементов конструкций автомобиля целесообразно при помощи метода компьютерного моделирования, как это показано в изобретении [30].

В патенте [31] описан процесс формования пола автомобиля в автоклаве, включающий отверждение при температуре 120 °С в течение 30 мин. Технология, используемая компаниями Volkswagen, Renault и Volvo, позволяет производить до 50 ед. панелей пола из углепластика в день [32].

Применение высокоскоростного впрыскивания и сверхвысокоскоростных технологий термоотверждения значительно сокращает время, необходимое для производства комплектующих из углепластика [16]. Например, продолжительность отверждения

препрега Hexcel HexPly® M77, используемого в автомобилях BMW 7 серии, составляет <2 мин (при температуре 150 °C), что позволяет изготавливать до 500 деталей в день [33].

В научно-технической литературе в области материалов и технологий для автомобилестроения наиболее часто встречается описание применения эпоксидных связующих [34], но также рассматриваются связующие других классов, например бензоксазиновые [35]. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ имеется опыт разработки быстроотверждаемых связующих для препреговой технологии формования ПКМ на основе фенолформальдегидных смол – например, фенолформальдегидное связующее ВСФ-16М, которое является модификацией связующего РС-Н. Оптимальный режим отверждения разработанного фенолформальдегидного связующего: выдержка в течение 20 мин при температуре 140 °C [36].

Патенты на изобретения в области автомобилестроения касаются как непосредственно материалов и технологий их переработки, так и технологий механической обработки деталей автомобилей из углеродных композиционных материалов. Например, в патенте [37] представлена технология обработки для крышки-кожуха двигателя переменной толщины.

В изобретении [38] показан способ изготовления конструкции автомобильного топливного бака с применением армирования стекловолоконной ровницей. Данное изобретение предполагает укрепление металлического корпуса топливного бака стеклянными волокнами, при этом сам металлический корпус используется в качестве оснастки для изготовления конструкций и служит прежде всего для герметизации топливного бака. Подобные системы перспективны также и для хранения сжиженного газообразного топлива, в том числе водородного, с целью замены применяемых в настоящее время цельнометаллических резервуаров на резервуары из ПКМ.

Изобретение, представленное в патенте [39], относится к способу защиты внутреннего пространства пассажирского салона от резервуара с водородом. Основной корпус изготовлен из волокнистого композиционного материала с покрытием, содержащим пигменты Cu и/или Al и препятствующим проникновению водорода, и выполнен в виде стенки или части стенки пассажирского салона. Изобретение может быть использовано для транспортных средств, применяющих альтернативные источники энергии.

Примером изобретения в области материалов для конструкций электромобилей является патент [40], посвященный высокопрочному легкому корпусу автомобильного аккумулятора и процессу его производства. Для создания корпуса используется сочетание металлического и углекомпозитного материалов, что позволяет создать легкую конструкцию. Сквозное отверстие, расположенное в корпусе углепластикового сердечника, может применяться в качестве отверстия для сброса давления, а при слишком высоких температуре или внутреннем давлении аккумуляторной батареи – для снижения риска взрыва в результате расплавления алюминия. Изобретение, представленное в патенте [41], направлено на создание нижней защитной пластины днища аккумуляторной батареи из углеродного ПКМ, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к эксплуатационным характеристикам, и обеспечивающей весовую эффективность.

Следует также отметить, что патенты на изобретения на создание автомобилей с применением ПКМ подаются как крупными компаниями-производителями, так и индивидуальными изобретателями. Например, в изобретении [42] представлено техническое решение по созданию автомобиля, копирующего спорткар Lotus Seven. Основой разработки стала сварная трубчатая рама с наружными панелями из углепластика, а силовой установкой послужил 1,7-литровый бензиновый двигатель с пятиступенчатой механической коробкой передач от вазовской «Нивы».

Для обеспечения требуемого уровня свойств (необходимых прочности и жесткости) находит распространение изготовление элементов конструкции в виде трехслойных панелей, внешние из которых работают преимущественно на растяжение и сжатие [15].

В работе [43] показано, что при использовании для облегченных опорных узлов и систем автомобилей ПКМ на основе различных армирующих наполнителей (например, на основе угле- и стекловолокна) максимальную прочность при сжатии отмечают при чередовании слоев, а максимальную прочность при изгибе – при содержании углеволокна в количестве 50 % (по массе) и при его расположении во внешних слоях.

Современные технологии восстановления элементов конструкций позволяют уменьшить износ, а также повысить послеремонтный технический ресурс деталей. В рамках работ по оценке методов восстановления изношенных корпусных деталей автомобилей за счет применения полимерных покрытий в статье [44] представлены данные по исследованию терморadiационного нагрева корпусных деталей агрегатов трансмиссий автомобилей с применением математического моделирования. Показано, что в результате подобной обработки может быть уменьшена площадь разрушенного покрытия [45]. Исследования [44, 45] проведены для металлических материалов, однако представляет интерес выполнение подобных исследований и для конструкций из ПКМ.

Согласно данным, указанным в «Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года» [46], импортозависимость в производстве легковых автомобилей в России оценивается на уровне $>60\%$, в сегменте грузовых автомобилей – на уровне $>25\%$, а в области автокомпонентов – на уровне 26% , в связи с чем необходимо целевое развитие исследований и разработок для автомобильной промышленности, включая конструкторско-технологические компетенции по разработке продуктов и компонентов, а также достижение конкурентоспособности результатов интеллектуальной деятельности. В области материаловедения следует расширить применение новых конструкционных и эксплуатационных материалов, включая ПКМ, для снижения массы транспортных средств [46]. Возможно также и использование ПКМ, разработанных для иных отраслей промышленности, в частности для авиации.

Материалы и технологии, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [47–50] в интересах авиационно-космической отрасли, позволяют создавать конструкции, обладающие требуемым уровнем эксплуатационных характеристик и отвечающие требованиям по пожаробезопасности, являются перспективными для применения и в автомобильном секторе – например, разработанные в институте обрешеченные натяжные подвесные изоляторы из стеклопластика для контактных сетей троллейбусов и трамваев [51, 52].

Важным элементом автомобильной инфраструктуры, непосредственно влияющим на износ и сохранение целостности конструкции автомобиля, являются в том числе автомобильные дороги. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана технология получения ПКМ и несущих строительных конструкций из них на основе углеродных (углепластик ВКУ-51) и стеклянных (стеклопластик ВПС-58) армирующих волокнистых наполнителей для применения при строительстве быстровозводимых арочных мостов. Такие материалы нашли практическую реализацию при возведении автомобильного моста в Ульяновской области [53, 54].

С целью снижения рисков возникновения негативных последствий, связанных с санкционными ограничениями на импорт на территорию РФ сырьевых компонентов для производства ПКМ, в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ налажено собственное производство полимерных связующих и углеродных армирующих наполнителей, клеев и лакокрасочных покрытий, а также имеется комплекс технологического оборудования для получения и переработки ПКМ.

Заключения

Вопрос снижения массы изделия и обеспечения его эксплуатационной надежности в настоящее время является актуальным для автомобилей, работающих на всех видах энергоносителей, как эксклюзивного, так и массового сегмента.

Наиболее широкое применение в автомобилестроении из числа ПКМ нашли угле- и стеклопластики; используются как автоклавная, так и безавтоклавные технологии переработки в изделия, различные текстильные формы армирующих наполнителей.

Благодаря применению ПКМ масса отдельных деталей автомобиля может быть уменьшена на 80 %, что в целом позволяет на 8 % повысить топливную эффективность, снизить на 0,3–0,6 л расход топлива на 100 км пути при уменьшении массы на каждые 100 кг, сократить время разгона и тормозной путь, понизить уровни шума и вибрации, а также повысить управляемость автомобилем [55].

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Гирш Р.И., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н. Конструируемые слоистые материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков в конструкциях летательных аппаратов нового поколения // Вестник машиностроения. 2020. № 12. С. 46–52.
2. Каблов Е.Н., Сагомонова В.А., Сорокин А.Е., Целикин В.В., Гуляев А.И. Исследование структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 3. С. 2–9.
3. Каблов Е.Н., Шульдешов Е.М., Петрова А.П., Лаптева М.А., Сорокин А.Е. Зависимость комплекса свойств звукопоглощающего материала типа ВЗМК от концентрации гидрофобизирующего состава на основе кремнийорганического герметика // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
4. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
5. Коврижкина Н.А., Кузнецова В.А., Силаева А.А., Марченко С.А. Способы улучшения свойств лакокрасочных покрытий с помощью введения различных наполнителей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
6. Кузнецова В.А., Марченко С.А., Емельянов В.В., Железняк В.Г. Исследование влияния молекулярной массы эпоксидных олигомеров и отвердителей на эксплуатационные свойства лакокрасочных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.09.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
7. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.09.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
8. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
9. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 6 (54). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.
10. Борщев А.В., Гусев Ю.А. Разработка и внедрение ПКМ в автомобильную промышленность. Разновидности HP-RTM процессов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 4. С. 48–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-48-52.
11. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37.

12. Komornicki J., Bax L., Vasiliadis H., Magallon I., Ong K. Polymer composites for automotive sustainability. Brussels: SusChem (European technology platform for sustainable chemistry), 2017. 56 p. URL: <http://www.suschem.org/publications> (дата обращения: 10.09.2021).
13. Зауэр М. Мировой рынок углеродных волокон и композитов // Полимерные материалы. 2020. № 10. URL: <https://polymerbranch.com/d2d2c6e2445eef2bcff6bf0fdf69846c/f90e3aea9d69d3da52e7d874caca9cea/magazineclause.pdf> (дата обращения: 10.09.2021).
14. Composite Materials Market for Automotive by Material Type (PMC, MMC, & CMC), Application & their Sub-Components (Structural, Powertrain, Interior, Exterior, & Others), Vehicle Type (PC, LCV, HCV, & Rolling Stock), & by Region-Global Forecast to 2020 // Market research report. 2015. Oct. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/automotive-composite-materials-market-6114278.html> (дата обращения: 10.09.2021).
15. Арутюнян Г.А., Карташов А.Б. Анализ истории развития и актуальности применения несущих систем из композиционных материалов // Журнал автомобильных инженеров. 2015. № 5. С. 60–66.
16. Automotive component // Torayca. URL: https://www.torayca.com/en/lineup/composites/com_011.html (дата обращения: 10.09.2021).
17. The BMW i8 Production // BMW Medien-information. 2014. Vol. 08. P. 1–8. URL: <https://www.press.bmwgroup.com> (дата обращения: 10.09.2021).
18. Schlarb A.K. Loesungspotenziale fuer die Automobilindustrie // Kunststoffe. 2011. Vol. 7. S. 82–89.
19. Qinglong AN, Jie Chen, Weiwei Ming, Ming Chen. Machining of SiC ceramic matrix composites: A review // Chinese Journal of Aeronautics. 2021. Vol. 34 (4). S. 540–567.
20. World première: Braided carbon wheels // Porsche. URL: <https://newsroom.porsche.com/en/products/porsche-carbon-wheels-braided-world-premiere-911-turbo-s-exclusive-series-14064.html> (дата обращения: 10.09.2021).
21. Marsh G. Composites conquer with carbon supercars // Reinforced Plastics. 2006. Vol. 50. No. 1. S. 20–24.
22. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
23. VehiclesCars // Torayca: офиц. сайт. URL: https://www.torayca.com/en/activity/act_006.html (дата обращения: 10.09.2021).
24. Технологические материалы // Lamborghini: офиц. сайт. URL: <https://www.lamborghini.com/ru> (дата обращения: 10.09.2021).
25. Дорин Ф., Тринквальтер Б., Вольфсбергер К., Цвикльхубер П. Концепция модульного столба для автомобиля будущего // Полимерные материалы. 2021. № 2. URL: <https://polymerbranch.com/7f6caf1f0ba788cd7953d817724c2b6e/3524ace8b7b3c240bbb74b1374c1a9c7/magazineclause.pdf> (дата обращения: 10.09.2021).
26. Composite material for automobile spoiler and preparation method thereof: pat. CN 112731173A No. 202110125113.4A; filed 29.01.21; publ. 25.05.21.
27. Mit Kostensenken wächst erleichtern // VDI-Nachr. 2012. No. 21. P. 8.
28. Advanced in the bonnet moving as fast as those under it // European Tool and Mould Making. 2013. Vol. 15. No. 10. P. 38–39.
29. Production method for automobile roof made of fiber reinforced composite material: pat. CN 102922621A. No. 201210484676.3A; filed 23.11.12; publ. 13.02.13.
30. Design method of automobile carbon fiber reinforced composite reinforcement: pat. CN 110781603A. No. 201911069730.6A; filed 05.11.19; publ. 11.02.20.
31. Carbon fiber composite material automobile front floor, manufacturing method and automobile: pat. CN 111516761A. No. 202010313244.0A; filed 20.04.20; publ. 11.08.20.
32. Othman R., Ismail N.I., Ab Hamid Pahmi M.A. et al. Application of carbon fiber reinforced plastics in automotive industry: a review // Journal of Mechanical Manufacturing. 2018. Vol. 1. P. 144–154.
33. Hexcel Composite Materials. Automotive Product Focus // Hexcel Corporation: офиц. сайт. URL: <https://www.hexcel.com/Markets/automotivestructuralparts> (дата обращения: 10.09.2021).
34. Preparation method of automobile carbon fiber composite material B column reinforcement: pat. CN 111169039A. No. 202010027167.2A; filed 10.01.20; publ. 19.05.20.

35. Benzoxazine combined material new energy automobile lightweight battery box lower box body: pat. CN 210224090U. No. 201920155754.2U; filed 29.01.19; publ. 31.03.20.
36. Застрогина О.Б., Швец Н.И., Постнов В.И., Серкова Е.А. Фенолформальдегидные связующие нового поколения для материалов интерьера // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 265–272.
37. Manufacturing method of automobile engine cover made of carbon fiber composite materials: pat. CN 105383070A. No. 201510660669.8A; filed 12.10.15; publ. 09.03.16.
38. New type automobile gasoline tank and forming method thereof: pat. CN 105253011A. No. 201510756346.9A; filed 06.11.15; publ. 20.01.16.
39. Shielding device, passenger compartment, motor vehicle and shielding method: pat. DE 102015201710A1. No. 102015201710.9A; filed 02.02.15; publ. 04.08.16.
40. High-strength lightweight new energy automobile battery shell and production process thereof: pat. CN 111224021A. No. 202010110909.8A; filed 21.02.20; publ. 02.06.20.
41. Backplate and electric automobile at bottom of carbon-fibre composite battery: pat. CN 111301184A. No. 202010201570.2A; filed 20.03.20; publ. 19.06.20.
42. Патент на мечту // Klaxonnew. URL: <https://klaxonnew.ru/patent-na-mechtu-34329-9872> (дата обращения: 10.09.2021).
43. Jin Z., Khunlavit Ch., Shuai H. et al. Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures // *Materials and Design*. 2012. No. 36. P. 75–80.
44. Ли Р.И., Псарев Д.Н., Быконя А.Н., Киба М.Р. Математическая модель терморadiационной обработки полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей автомобилей // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2021. № 2. С. 29–35.
45. Ли Р.И., Ризаева Ю.Н., Псарев Д.Н., Быконя А.Н., Киба М.Р. Метод расчета параметров установки терморadiационной обработки полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей автомобилей // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2021. № 5. С. 38–43.
46. Стратегия развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2018 г. № 831-р // Правительство России: Документы. URL: <http://government.ru/docs/32547/> (дата обращения: 10.09.2021).
47. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
48. Раскутин А.Е., Соколов И.И. Углепластики и стеклопластики нового поколения // *Труды ВИАМ*. 2013. № 4. Ст. 9. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2021).
49. Курносов А.О., Мельников Д.А., Соколов И.И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения // *Труды ВИАМ*. 2015. № 8. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
50. Гуняева А.Г., Курносов А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
51. Наша история. URL: https://viam.ru/history_1 (дата обращения: 10.09.2021).
52. Наш вектор задач и свершений – будущее. URL: <https://viam.ru/interview/4343> (дата обращения: 10.09.2021).
53. Евдокимов А.А., Раскутин А.Е., Мишкин С.И., Михалдыкин Е.С. Арочные мосты с применением углепластиковых арочных элементов // *Конструкции из композиционных материалов*. 2019. № 2. С. 22–29.
54. Мишкин С.И., Раскутин А.Е., Евдокимов А.А., Гуляев И.Н. Технологии и основные этапы строительства первого в России арочного моста из композиционных материалов // *Труды ВИАМ*. 2017. № 6 (54). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5.
55. Automobile opening part and manufacturing method thereof: pat. CN 103552610A. No. 201310582706.9A; filed 19.11.13; publ. 05.02.14.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N. Constructed laminated materials based on sheets of aluminum-lithium alloys and fiberglass in the designs of new generation aircraft. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 12, pp. 46–52.
2. Kablov E.N., Sagomonova V.A., Sorokin A.E., Tselikin V.V., Gulyaev A.I. Investigation of the structure and properties of a polymer composite material with an integrated vibration-absorbing layer. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 3, pp. 2–9.
3. Kablov E.N., Shuldeshov E.M., Petrova A.P., Lapteva M.A., Sorokin A.E. Dependence of complex of sound-proof VZMK type material properties on concentration of hydrophobizing composition on the basis of organosilicon sealant. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
4. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2020-0-4-47-58.
5. Kovrizhkina N.A., Kuznetsova V.A., Silaeva A.A., Marchenko S.A. Ways to improve the properties of paint coatings by adding different fillers (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
6. Kuznetsova V.A., Marchenko S.A., Emelya-nov V.V., Zheleznyak V.G. Study of the influence of molecular mass of epoxy oligomers and hardeners on the operational properties of paint coatings. *Aviation materials and technology*, 2021. no. 1 (62). paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: 10, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
7. Tkachuk A.I., Donetskyy K.I., Terekhov I.V., Kara-vaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021. no. 1 (62). paper no. 03. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: September 10, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
8. Imametdinov E.S., Valueva M.I. Composites for piston engines (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
9. Timoshkov P.N., Khrulkov A.V., Yazvenko L.N. Composite materials in automotive industry (review). *Trudy VIAM*, 2017, no. 6 (54), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.
10. Borshchev A.V., Gusev Y.A. Development and implementation of PCM in automotive industry, varieties of HP-RTM processes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 4, pp. 48–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-48-52.
11. Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-67-29-37.
12. Komornicki J., Bax L., Vasiliadis H., Magallon I., Ong K. Polymer composites for automotive sustainability. Brussels: SusChem (European technology platform for sustainable chemistry), 2017, 56 p. Available at: <http://www.suschem.org/publications> (accessed: September 10, 2021).
13. Zauer M. World market of carbon fibers and composites. *Polymer materials*, 2020, no. 10. Available at: <https://polymerbranch.com/d2d2c6e2445eef2bcff6bf0fdf69846cf90e3aea9d69d3da52e7d874caca9cea/magazineclause.pdf> (accessed: September 10, 2021).
14. Composite Materials Market for Automotive by Material Type (PMC, MMC, & CMC), Application & their Sub-Components (Structural, Powertrain, Interior, Exterior, & Others), Vehicle Type (PC, LCV, HCV, & Rolling Stock), & by Region-Global Forecast to 2020. Market research report. Oct., 2015. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/automotive-composite-materials-market-6114278.html> (accessed: September 10, 2021).
15. Arutyunyan G.A., Kartashov A.B. Analysis of the history of development and relevance of the use of load-bearing systems made of composite materials. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov*, 2015, no. 5, pp. 60–66.
16. Automotive component. Available at: https://www.torayca.com/en/lineup/composites/com_011.html (accessed: September 10, 2021).

17. The BMW i8 Production. BMW Medien-information, 2014, vol. 08, pp. 1–8. Available at: <https://www.press.bmwgroup.com> (accessed: September 10, 2021).
18. Schlarb A.K. Loesungspotenziale fuer die Automobilindustrie. Kunststoffe, 2011, vol. 7, pp. 82–89.
19. Qinglong AN, Jie Chen, Weiwei Ming, Ming Chen. Machining of SiC ceramic matrix composites: A review. Chinese Journal of Aeronautics., 2021, vol. 34 (4), pp. 540–567.
20. World première: Braided carbon wheels. Available at: <https://newsroom.porsche.com/en/products/porsche-carbon-wheels-braided-world-premiere-911-turbo-s-exclusive-series-14064.html> (accessed: September 10, 2021).
21. Marsh G. Composites conquer with carbon supercars. Reinforced Plastics, 2006, vol. 50, no. 1, pp. 20–24.
22. Kablov E.N. Composites: Today and Tomorrow. Metally Evrazii, 2015, no. 1, pp. 36–39.
23. VehiclesCars. Available at: https://www.torayca.com/en/activity/act_006.html (accessed: September 10, 2021).
24. Technological materials. Available at: <https://www.lamborghini.com/ru> (accessed: September 10, 2021).
25. Doreen F., Trinkvalter B., Wolfsberger K., Zwicklhuber P. The concept of a modular table for the car of the future. Polimernye materialy, 2021, no. 2. Available at: <https://polymerbranch.com/7f6caf1f0ba788cd7953d817724c2b6e/3524ace8b7b3c240bbb74b1374c1a9c7/magazineclause.pdf> (accessed: September 10, 2021).
26. Composite material for automobile spoiler and preparation method thereof: pat. CN 112731173A, no. 202110125113.4A; filed 29.01.21; publ. 25.05.21.
27. Mit Kostensenken wächst erleichtern. VDI-Nachr, 2012, no. 21, pp. 8.
28. Advanced in the bonnet moving as fast as those under it. European Tool and Mould Making, 2013, vol. 15, no. 10, pp. 38–39.
29. Production method for automobile roof made of fiber reinforced composite material: pat. CN 102922621A, no. 201210484676.3A; filed 23.11.12; publ. 13.02.13.
30. Design method of automobile carbon fiber reinforced composite reinforcement: pat. CN 110781603A, no. 201911069730.6A; filed 05.11.19; publ. 11.02.20.
31. Carbon fiber composite material automobile front floor, manufacturing method and automobile: pat. CN 111516761A, no. 202010313244.0A; filed 20.04.20; publ. 11.08.20.
32. Othman R., Ismail N.I., Ab Hamid Pahmi M.A. et al. Application of carbon fiber reinforced plastics in automotive industry: a review. Journal of Mechanical Manufacturing, 2018, vol. 1, pp. 144–154.
33. Hexcel Composite Materials. Automotive Product Focus. Available at: <https://www.hexcel.com/Markets/automotivestructuralparts> (accessed: September 10, 2021).
34. Preparation method of automobile carbon fiber composite material B column reinforcement: pat. CN 111169039A, no. 202010027167.2A; filed 10.01.20; publ. 19.05.20.
35. Benzoxazine combined material new energy automobile lightweight battery box lower box body: pat. CN 210224090U, no. 201920155754.2U; filed 29.01.19; publ. 31.03.20.
36. Zastrogina O.B., Shvets N.I., Postnov V.I., Serkova E.A. Phenolformaldehyde binding new generation for interior materials. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2012, no. 5, pp. 265–272.
37. Manufacturing method of automobile engine cover made of carbon fiber composite materials: pat. CN 105383070A, no. 201510660669.8A; filed 12.10.15; publ. 09.03.16.
38. New type automobile gasoline tank and forming method thereof: pat. CN 105253011A, no. 201510756346.9A; filed 06.11.15; publ. 20.01.16.
39. Shielding device, passenger compartment, motor vehicle and shielding method: pat. DE 102015201710A1, no. 102015201710.9A; filed 02.02.15; publ. 04.08.16.
40. High-strength lightweight new energy automobile battery shell and production process thereof: pat. CN 111224021A, no. 202010110909.8A; filed 21.02.20; publ. 02.06.20.
41. Backplate and electric automobile at bottom of carbon-fibre composite battery: pat. CN 111301184A, no. 202010201570.2A; filed 20.03.20; publ. 19.06.20.
42. Dream patent. Available at: <https://klaxonnew.ru/patent-na-mechtu-34329-9872> (accessed: September 10, 2021).

43. Jin Z., Khunlavit Ch., Shuai H. et al. Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. *Materials and Design*, 2012, no. 36pp. 75–80.
44. Li R.I., Psarev D.N., Bykonya A.N., Kiba M.R. Mathematical model of thermo-radiation treatment of polymer coatings during restoration of car body parts // *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2021, no. 2, pp. 29–35.
45. Li R.I., Rizaeva Yu.N., Psarev D.N., Bykonya A.N., Kiba M.R. Method of calculating the parameters of the installation of thermo-radiation treatment of polymer coatings during the restoration of car body parts // *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2021, no. 5, pp. 38–43.
46. Strategy for the development of the automotive industry of the Russian Federation for the period up to 2025, approved by the order of the Government of the Russian Federation dated April 28, 2018 No. 831-r. Available at: <http://government.ru/docs/32547/> (accessed: September 10, 2021).
47. Kablov E.N. Trends and guidelines for innovative development in Russia: collection of articles. *inform. materials*. 3rd ed., Rev. and add. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.
48. Sokolov I.I., Raskutin A.E. Carbon plastics and fibreglasses of new generation. *Trudy VIAM*, 2013, no. 4, paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2021).
49. Kurnosov A.O., Melnikov D.A., Sokolov I.I. Structural glass-reinforced plastics purposed for aviation industry. *Trudy VIAM*, 2015, no. 8, paper no. 08. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: September 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
50. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aero-space engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
51. Our history. Available at: https://viam.ru/history_1 (accessed: September 10, 2021).
52. Our vector of tasks and accomplishments is the future. Available at: <https://viam.ru/interview/4343> (accessed: September 10, 2021).
53. Evdokimov A.A., Raskutin A.E., Mishkin S.I., Mikhaldykin E.S. Arched bridges with the use of carbon-fiber arched elements. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2019, no. 2, pp. 22–29.
54. Mishkin S.I., Raskutin A.E., Evdokimov A.A., Gulyaev I.N. Technologies and the main stages of construction of the arch bridge first in Russia from composite materials. *Trudy VIAM*, 2017, no. 6 (54), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5.
55. Automobile opening part and manufacturing method thereof: pat. CN 103552610A, no. 201310582706.9A; filed 19.11.13; publ. 05.02.14.

Информация об авторах

Валуева Мария Игоревна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Евдокимов Антон Андреевич, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Начаркина Анастасия Витальевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Губин Антон Михайлович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maria I. Valueva, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anton A. Evdokimov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anastasia V. Nacharkina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anton M. Gubin, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2021; одобрена после рецензирования 01.11.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 30.09.2021; approved after reviewing 01.11.2021; accepted for publication 01.11.2021.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-66-75

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЫЛЬЕВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ САМОЛЕТОВ (обзор)

П.Н. Тимошков¹, В.А. Гончаров¹, М.Н. Усачева¹, А.В. Хрульков¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Крылья самолетов Boeing 787 и Airbus A350 изготавливают методом автоматизированной выкладки из препрегов с последующим автоклавным формованием. В ближайшие годы компании Boeing и Airbus планируют замену самолетов 737 и A320, поэтому необходимо разработать новые материалы и технологии, чтобы обеспечить производство воздушных судов в количестве 100 шт. в месяц. Для внедрения новых процессов и материалов проводятся исследования по выбору связующего и наполнителей, отработке процесса вакуумной пропитки, отверждения и автоматизации с целью повышения надежности, ускорения процесса и сокращения продолжительности цикла.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, вакуумная инфузия, автоматизированная выкладка, препреги, автоклавное формование, продолжительность цикла

Для цитирования: Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Особенности технологии и полимерные композиционные материалы для изготовления крыльев перспективных самолетов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-66-75.

Scientific article

FEATURES OF TECHNOLOGY AND POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF WINGS OF ADVANCED AIRCRAFT (review)

Pavel N. Timoshkov¹, Vitaly A. Goncharov¹, Maria N. Usacheva¹, Alexander V. Khrulkov¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: Today, the wings of Boeing 787, Airbus A350 aircraft are made by automated laying out of prepregs with subsequent autoclave molding. Boeing and Airbus plan to replace the 737 and A320 aircraft in the coming years, and new materials and technologies need to be developed to ensure the production of these aircraft in the amount of 100 pieces per month. To introduce new processes and materials, research is being carried out on the selection of a binder, reinforcing fillers, development of the vacuum impregnation process, curing and automation in order to increase reliability, speed up the process and reduce cycle time.

Keywords: polymer composite materials, vacuum infusion, automated laying out, prepregs, autoclave molding, cycle time

For citation: Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Features of technology and polymer composite materials for the manufacture of wings of advanced aircraft (review). Trudy VIAM, 2022, no. 1 (107), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-66-75.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) чрезвычайно привлекательны по своим весовым характеристикам. Их стоимость значительно выше стоимости алюминия и его сплавов, однако когда речь идет об экономии массы изделия, то экономическая эффективность от применения углепластиков однозначно более высокая. Поэтому применение ПКМ в конструкции крыла давно привлекало конструкторов. Так, в самолете Су-47 крылья обратной стреловидности изготовлены из углепластика. Основные преимущества крыла обратной стреловидности – это значительное увеличение маневренности, большая подъемная сила по сравнению с крылом прямой стреловидности такой же площади, увеличение дальности полета на дозвуковой скорости благодаря меньшему сопротивлению, а также лучшая управляемость на малых скоростях. При этом для борьбы с упругой дивергенцией крыла необходимо придать ему повышенную жесткость. Металлическая конструкция крыла приводит к значительному увеличению массы изделия, поэтому применен углепластик, который обеспечил требуемую жесткость. Одновременно «интеллектуальные» ПКМ позволили создать самоадаптирующуюся конструкцию [1]. Из углепластика изготовлены детали мотогондолы двигателя ПД-14, элементы механизации крыла, арочные элементы моста и другие конструкции. Совершенствуются связующие, осваиваются новые способы получения армирующих наполнителей, внедряются автоматизированные технологии, осваивается вакуумная инфузия с последующим безавтоклавным формованием [2–10]. Так, в АО «ОНИП «Технология» им. А.Г. Ромашина» в Обнинске из композиционных материалов по автоклавной технологии изготавливают хвостовое оперение для самолета МС-21. На этом же предприятии освоена и технология вакуумной инфузии с последующим формованием в термопечи. По этой технологии производят формообразующую оснастку, ненагруженные детали, а также крупногабаритные обшивки космического назначения [11].

В настоящее время из ПКМ по препреговой технологии изготавливают детали крыла и фюзеляжа самолетов Boeing 787 и Airbus A350. В перспективе до 2035 г. необходимо построить более 30 тыс. самолетов типа Boeing 737, A320 и МС-21. Однако при применении современных циклов изготовления отсутствуют возможности реализовать такие планы. Поэтому, для того чтобы в месяц выпускать до 100 самолетов каждой из этих марок, требуется создание новых технологий, которые позволили бы каждый день изготавливать до трех комплектов композитных крыльев.

Каждое крыло самолета имеет две обшивки – нижнюю и верхнюю, которые обеспечивают его аэродинамику. Внутренняя поверхность обшивки включает ряд параллельных стрингеров, идущих от корня до кончика и обеспечивающих структурную поддержку. В идеале стрингеры должны быть отверждены вместе с обшивкой, однако могут быть закреплены и механически. Обшивки и стрингеры окружают нервюры крыла, а также передний и задний лонжероны, которые тоже прикреплены к нервюрам и проходят по всей длине крыла. Лонжерон является основным элементом конструкции крыла, выдерживает полетные нагрузки и поддерживает крыло, когда самолет находится на земле (рис. 1).

На предприятии АО «АэроКомпозит-Ульяновск» из отечественных материалов уже изготавливают по технологии вакуумной инфузии центроплан и крыло самолета МС-21. Применение ПКМ в конструкции обеспечило возможность производства крыла большего удлинения, что в свою очередь повысило аэродинамические качества и эффективность при эксплуатации.

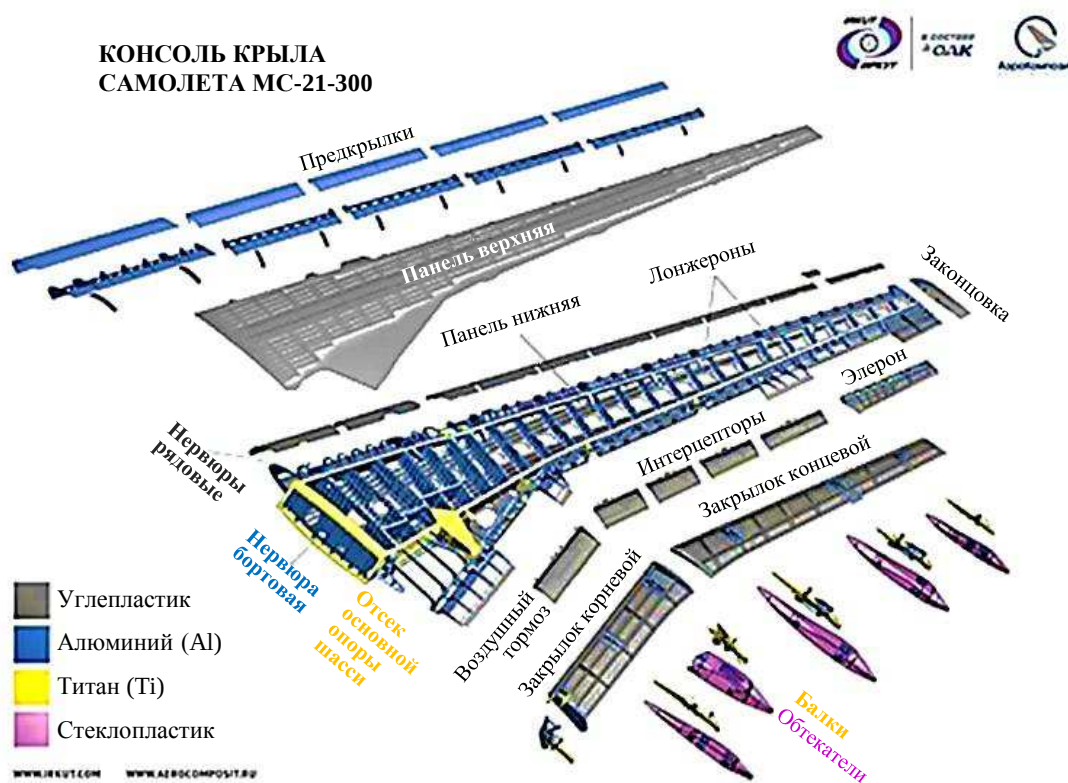


Рис. 1. Консоль крыла самолета MC-21-300 [12]

Особенности технологии изготовления деталей крыла самолета по вакуумной технологии

Авиационная промышленность считается одним из самых инновационных и прогрессивных технологических секторов во всем мире. В настоящее время в разработке новых технологий производства крыла заинтересованы все мировые производители. Фирма Airbus запустила в 2015 г. программу «Крыло завтрашнего дня», по которой разрабатывается технология изготовления деталей крыла с использованием вакуумной инфузии [12].

Фирма Airbus распределила работу между несколькими партнерами, каждый из которых сосредоточился на разработке различных комбинаций материалов и процессов для разных структур [13]. Данная компания работает над обшивкой верхнего крыла, кессоном крыла, нервюрами кессона крыла, закрывками и шарниром складывающейся законцовки крыла; компания Spirit AeroSystems (Шотландия) – над обшивкой нижнего крыла, неподвижной передней кромкой и предкрылком, а компания GKN Aerospace (Великобритания) – над задним лонжероном, задней кромкой и нервюрами кессона крыла совместно с фирмой Airbus. Национальный центр композитов (Великобритания) также сотрудничает с Airbus в производстве прототипов крыльев самолетов. В рамках проекта «Крыло завтрашнего дня» фирма Fischer Advanced Composite Components (FACC) трудится над разработкой инновационных производственных процессов, которые будут использовать при изготовлении трех основных компонентов крыла: нижних кожухов кессона крыла, закрывков и панелей спойлера. Компонент крыла имеет очень цельную конструкцию, однако благодаря продуманным решениям с точки зрения материалов, процессов и дизайна компания FACC предлагает фирме Airbus доступную легкую конструкцию, обеспечивая при этом высокую пригодность для серийного производства.

Разрабатываемая технология предназначена для изучения и разработки лучших материалов, методов производства и сборки, а также новых решений в аэродинамике и архитектуре крыла, что позволит снизить затраты на оборудование и оснастку, а также повысить производительность – это особенно важно для возможного использования при производстве больших самолетов. При этом разрабатываются многочисленные технологии и варианты конструкций как внутри компаний, так и на уровне поставщиков и партнеров, что позволит в дальнейшем принимать обоснованные решения, когда придется выбирать окончательный вариант. Цель состоит в том, чтобы производить сложные конструкции быстрее, проще и экономичнее.

Оценивается несколько передовых композитных технологий, среди которых вакуумная инфузия связующего для обшивки нижней части крыла, разработанная компанией Spirit AeroSystems (Великобритания).

При проектировании и производстве новых поколений крыльев просматривается стремление к высокой степени интеграции конструкции, чтобы максимально сократить количество деталей и продолжительность их производства и сборки, обеспечивая таким образом более высокую рентабельность. Интегральная конструкция позволяет избежать последующих высоких затрат на сборку и достичь высокой степени готовности производственных процессов при высоких скоростях. Помимо сложной технологии изготовления и использования новых материалов, так называемых многоосных тканей, конструкция оснастки также оказалась в высшей степени инновационным достижением [14].

В настоящее время процесс изготовления обшивки крыла из композиционных материалов на самолетах Airbus A350 и Boeing 787 осуществляется по технологии автоматизированной выкладки препрегов (Automated Tape Laying – ATL) и является привлекательным, поскольку позволяет относительно быстро размещать существенное количество материала на большой площади, особенно если деталь имеет небольшую кривизну. Однако после выкладки заготовки детали необходимо отверждать в автоклаве, что требует длительного производственного времени. При изготовлении самолетов 787 и A350 в количестве ~10 шт. в месяц существующие технологии и оборудование обеспечивали требуемое количество деталей. Однако при попытке заглянуть в будущее оказывается, что производство самолетов следующего поколения (например, нового узкофюзеляжного самолета компании Airbus для замены A320) может составлять 60–100 шт. в месяц. Для производственного процесса, зависящего от автоклава, потребуются большие капиталовложения и производственные площади, чтобы соответствовать этим темпам, и, следовательно, процесс ATL станет неприемлемым и с практической, и с экономической точек зрения.

Именно по такой причине предполагается выбрать процессы безавтоклавной технологии. При этом особое внимание уделяется обшивке крыльев. Хотя первые составные обшивки крыла (для самолетов A350 и 787) были изготовлены по технологии ATL с последующим автоклавным формованием, использование безавтоклавных процессов не ново. Для узкофюзеляжного самолета MC-21 (Россия) обшивку крыла изготавливают по технологии вакуумной инфузии. В Ульяновске производят выкладку сухого наполнителя, пропитанного для связки биндеров на станках с автоматической выкладкой. После этого осуществляют пропитку преформы жидким связующим под воздействием вакуумной инфузии, что позволяет получить интегральную конструкцию и минимизировать последующие операции сборки, а следовательно, снизить трудоемкость и повысить производительность.

Другой самолет, у которого есть подобная обшивка крыла, – это Airbus A220. Крылья для него производит компания Bombardier Aerospace (Северная Ирландия) с использованием вакуумной инфузии в сочетании с автоклавным формованием.

Вакуумная инфузия имеет большое значение, когда дело доходит до изготовления обшивки крыла. Основными преимуществами являются безавтоклавное отверждение, возможность совместного отверждения обшивок и стрингеров, изготовление почти готовой формы обшивки и возможность экономичного производства с высокой скоростью (60–100 комплектов в месяц). Вакуумная инфузия также имеет несколько недостатков, один из которых – потенциально долгое время нахождения на оснастке.

Как отмечено ранее, разработка инфузионной обшивки нижней части крыла ведется компанией Spirit AeroSystems на своем предприятии в Великобритании. С начала 2018 г. работа компании над данной технологией была сосредоточена на изготовлении и тестировании 7-метрового прототипа. К середине июля 2020 г. компания Spirit AeroSystems находилась в процессе перехода к следующему этапу программы по изготовлению 17-метрового полномасштабного демонстратора.

Демонстратор имеет приблизительно такие же форму и размер обшивки нижней части крыла и может являться прототипом для обшивки крыла нового узкофюзеляжного коммерческого самолета, который заменит A320. Максимальная ширина обшивки составляет 3,3 м, а ширина на кончике – 1,1 м. Толщина обшивки составляет 5 мм у носка и 30 мм на стыке обшивки с деталями основного шасси.

Обшивку крыла будут производить с использованием набора технологий, разработанных компанией Spirit AeroSystems, под названием Intelligent Resin Infusion System (IRIS), включающего специализированные оснастки (рис. 2), автоматизированную выкладку материала, интегрированное формование стрингеров и строго контролируруемую температуру процесса. В основе этой системы лежит встроенная технология нагрева оснастки, элементы нагрева которой расположены близко к поверхности формы, где используют низковольтный нагрев для обеспечения быстрого и точного контроля температуры. Уровня нагрева достигают за счет управления и регулирования потребляемой мощности. В оснастке из углеродного волокна, включающей крышку с подогревом и полугибкий многоразовый вакуумный мешок, используют специализированную технологию контроля температуры пресс-формы [14].



Рис. 2. Полномасштабная 17-метровая оснастка для обшивки нижней части крыла [14]

Существует несколько мест нагрева, которые управляются и контролируются индивидуально. Это позволяет каждой зоне работать при заданных температурах на протяжении всего цикла инфузии и отверждения, что очень важно, поскольку каждая зона детали требует разного подводимого тепла в зависимости от ее размера и объема. Эта усовершенствованная система нагрева является неотъемлемой частью оснастки и обеспечивает тесный контакт с деталью для уменьшения требуемых мощности и продолжительности цикла.

Полимерные композиционные материалы для изготовления деталей крыла

Углеродный наполнитель с промежуточным модулем упругости, жгутом волокна 24K для обшивки крыла поставляется компанией Teijin Carbon Europe GmbH (Германия). Форматы волокна включают однонаправленные (UD), а также двухосные и трехосные ткани (NCF). Кроме того, в комплект входят вставки из стекловолокна, для избежания расслоения при сверлении и для защиты от гальванической коррозии.

Компания Spirit AeroSystems работала в сотрудничестве с немецкой компанией, чтобы выбрать типы тканей NCF, а также сбалансировать конструктивные характеристики и стоимость производства. Часть обшивки будут производить из однонаправленных тканей или жгутов, что позволяет повысить структурные характеристики. Использование этих двух типов материалов демонстрирует способность вводить различные материалы с помощью технологии IRIS.

Этот же наполнитель NCF компании Teijin можно применить в стрингерах, которые будут изготавливать с использованием специальной машины для формования непрерывных стрингеров, разработанной компанией Broetje-Automation GmbH (Германия). Машина для формования стрингеров будет способна изготавливать стрингеры различных толщины, кривизны и углов.

Связующее, выбранное для обшивки крыла, представляет собой однокомпонентную эпоксидную систему от компании Solvay Composite Materials' (США). Связующее будет доставляться к сухому наполнителю через «множественные» точки впрыска, тщательно выбранные для максимальной скорости впрыска и смачивания. Инжекционное оборудование предоставлено компанией Composite Integration Ltd (Великобритания). Конструкция будет снабжена полугибким многоразовым мешком, на котором будет установлена массивная крышка с подогревом.

После отработки технологии компания Spirit AeroSystems передаст ее компании National Composite Center (NCC) для изготовления полномасштабного демонстратора: компания NCC будет программировать и эксплуатировать новую машину для выкладки слоев под руководством компании Spirit, а также проводить неразрушающий контроль. Все остальные операции (подготовка оснастки, установка стрингеров и мешка, трубок подачи связующего, выкладка на оснастку и работа на инфузионном оборудовании) будут выполняться в компании NCC самостоятельно.

Особенности технологии выкладки заготовок деталей

Выкладку слоев в компании NCC будут выполнять с помощью установки сверхвысокой скорости выкладки (рис. 3, а), роботизированной системой на базе портала, в которой используется технология автоматизации, предоставленная компанией Güdel (Швейцария).

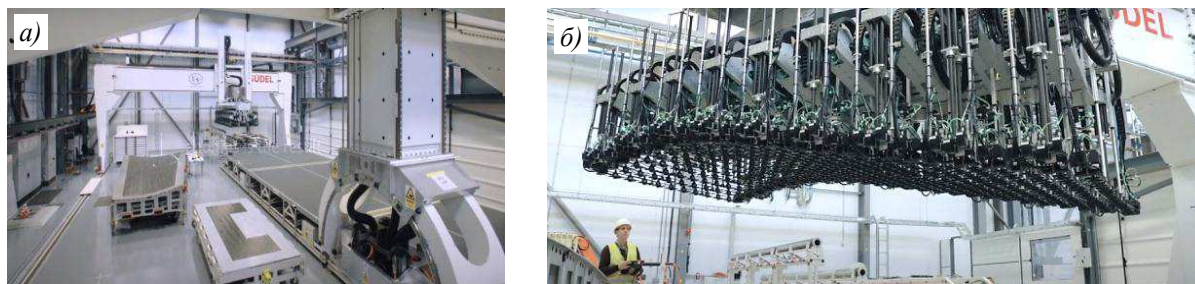


Рис. 3. Роботизированный комплекс Gudel: общий вид (а), а также захват раскрытой заготовки с помощью манипулятора с 270 вакуумными присосками и перенос ее на форму (б)

Раскрой заготовок осуществляется на установке для раскроя (рис. 3, б). Далее двумя системами будет произведена выкладка тканей NCF в оснастку при изготовлении заготовки обшивки. Первая система, называемая FibreFORM, состоит из плотного набора присосок, которые собирают и размещают раскроенные слои тканей NCF. Вторая система, называемая FibreROLL, наматывает длинные слои на барабан, а затем раскатывает их на оснастку.

Такие технологии, как сверхвысокоскоростная выкладка, должны обеспечить наилучшие шансы на соблюдение требований к скорости, стоимости и качеству крыльев самолетов гражданской авиации нового поколения, сохраняя при этом конкурентоспособность.

Самый главный вопрос, который должен быть решен компаниями Spirit AeroSystems и NCC, – это пропускная способность. Чтобы конкурировать с процессами на основе технологии ATL [15, 16] с последующим отверждением в автоклаве, не только инфузия должна быть более производительной, но и обшивка крыла, появляющаяся в результате процесса, должна требовать минимальной последующей обработки. Для повышения производительности в эксплуатацию вводится крупномасштабная машина для выкладки, которая способна укладывать ткани.

Использование специальной технологии контроля температуры пресс-формы в сочетании с однокомпонентной системой смол от компании Airtech International (Калифорния, США) и герметизирующим слоем ускорит подачу смолы и пропитку наполнителя. Сначала смола пропитает обшивку, а в последнюю очередь – стрингеры. Пока неизвестно, сколько времени займет этот процесс, однако при учете того, что обшивка 7-метрового крыла пропитывается приблизительно за 4 ч, ожидается, что 17-метровая обшивка пропитается за такое же время.

Как отмечалось ранее, потенциально ограничивающим фактором при инфузии является относительно продолжительное время нахождения материала на оснастке, которое делает производственный цикл слишком длительным. Однако с помощью моделирования и запатентованного инструмента Trade Tool производства Spirit AeroSystems компания смогла смоделировать технологический процесс, что позволило выбрать его оптимальные режимы, а также обеспечило возможность автоматизировать управление этим процессом.

Выкладка ткани происходит быстрее, поскольку используются широкие заготовки тканей NCF по сравнению с узкой лентой для AFP, но требуется больше времени для инфузии. Однако ключевым преимуществом является продолжительность выкладки тканей NCF. В целом время использования оснастки должно быть сопоставимым по времени с применяемым на данный момент процессом или сокращаться по мере совершенствования технологии выкладки и процесса инфузии. Мультиаксиальные ткани уже используют при изготовлении таких самолетных деталей, как гермошпангоут А-380, створки люка самолета А400М [17]. Роботизированная выкладка многослойных тканей позволит не только механизировать процесс, но и обеспечит производство необходимого количества деталей для будущих больших программ выпуска летательных аппаратов [18].

Производственных мощностей, необходимых для изготовления крыльев при количестве 60 комплектов и более, потребуется значительно меньше при использовании процесса IRIS с обогреваемой оснасткой, а также при применении автоматизированного процесса выкладки заготовок из тканей NCF и машины для непрерывного формования стрингеров. Программа по выпуску 60 крыльев в месяц требует изготовления комплекта через каждые 3 ч. В том случае, если бы использовались современные технологии, количество машин ATL и автоклавов привело бы к значительным первоначальным

затратам и текущим расходам. Одновременно проводятся исследования по внедрению ПКМ из термопластов. Для крыльев предполагается производить нервюры, а в перспективе применять термопласты при изготовлении фюзеляжа.

Заключения

В настоящее время детали крыльев самолетов в основном изготавливают по автоклавной технологии, что на данном этапе хорошо освоено и гарантирует требуемое качество и надежность конструкций.

В перспективе элементы крыла будущих авиалайнеров планируют изготавливать по новым технологиям – вакуумной инфузии с последующим безавтоклавным способом отверждения. Для этого потребуются создание нового производства, оснащенного высокопроизводительными установками выкладки армирующих наполнителей, в том числе с использованием как однонаправленных, так и многослойных тканей.

Для пропитки сухой заготовки из углеродного наполнителя разрабатывают специальные связующие, обладающие низкой вязкостью, что обеспечит смачиваемость и пропитку углеродных волокон во всем объеме преформы.

Необходимо также будет применять оснастку, которая обеспечивает нагрев поверхности формы с быстрым и точным контролем температуры. Уровень нагрева должен достигаться за счет управления и регулирования потребляемой мощности.

Создание таких интегральных конструкций снизит цикл изготовления и позволит производить фирмам до 100 узкофюзеляжных самолетов в месяц.

Список источников

1. Уголок неба. Су-47 «Беркут» // Авиационная энциклопедия. URL: <http://www.airwar.ru/enc/fighter/s37.html> (дата обращения: 10.09.2021).
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
4. Каблов Е.Н. ВИАМ: Материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморепактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (95). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.02.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
7. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Панина Н.Н. Свойства угле- и стеклопластиков на основе плетеных преформ // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 4. С. 54–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-54-59.
8. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
9. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 2 (41). С. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.

10. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Постнова М.В., Баранников А.А. Опыт применения вакуум-инфузионных технологий в производстве конструкций из ПКМ // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4 (3). С. 344–350.
11. Как в России делают суперлегкие детали для самолетов и ракет // РИА новости: сайт. URL: <https://ria.ru/20190522/1553632826.html> (дата обращения: 08.09.2021).
12. Крыло из российских композиционных материалов установлено на самолет MC-21-300 // Композитный мир. 2021. № 3. С. 7.
13. «Wing of Tomorrow»: FACC and Airbus develop wings of the future. URL: <https://newsroom.aviator.aero/wing-of-tomorrow-facc-and-airbus-develop-wings-of-the-future> (дата обращения: 10.09.2021).
14. GKN Aerospace Manufactures First Parts for Wing of Tomorrow Program. URL: <https://www.compositesworld.com/news/gkn-aerospace-manufactures-first-demonstrator-parts-for-wing-of-tomorrow-program> (дата обращения: 10.09.2021).
15. Update: Lower wing skin, Wing of Tomorrow. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/update-lower-wing-skin-wing-of-tomorrow> (дата обращения: 13.09.2021).
16. Large, high-volume, infused composite structures on the aerospace horizon. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/large-high-volume-infused-composite-structures-on-the-aerospace-horizon> (дата обращения: 07.09.2021).
17. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.09.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-106.
18. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Григорьева Л.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Роботизированная выкладка препрега как альтернатива технологиям ATL и AFP (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-87-98.

References

1. Corner of the sky. Su-47 "Berkut". Available at: <http://www.airwar.ru/enc/fighter/s37.html> (accessed: September 10, 2021).
2. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. Vestnik Rossiyskoy akademii nauk, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. Vestnik RFBR, 2017, no. 3, pp. 97–105.
4. Kablov E.N. VIAM: New generation materials for PD-14. Krylya Rodiny, 2019, no. 7–8. pp. 54–58.
5. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». Aviacionnye materialy i tehnologii, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Kara-vaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. Aviation materials and technology, 2021. no. 1 (62). paper no. 03. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: February 19, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
7. Doneckij K.I., Karavaev R.Yu., Raskutin A.E., Panina N.N. Properties of carbon fiber and fiberglass on the basis of braiding preforms. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2016, no. 4 (45), pp. 54–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-54-59.
8. Belinis P.G., Donetskiy K.I., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Mayer Yu., Bystrikova D.V. Volume reinforcing solid-woven preforms for manufacturing of polymer composite materials (review). Aviacionnye materialy i tehnologii, 2019, no. 4 (57), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
9. Timoshkov P.N. Equipment and materials for the technology of automated calculations prepregs. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2016, no. 2, pp. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.

10. Veshkin E.A., Postnov V.I., Postnova M.V., Barannikov A.A. Experience in the use of vacuum infusion technologies in the production of PCM structures. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2018, vol. 20, no. 4 (3). pp. 344–350.
11. How superlight parts for aircraft and missiles are made in Russia. Available at: <https://ria.ru/20190522/1553632826.html> (accessed: September 8, 2021).
12. A wing made of Russian composite materials was installed on the MS-21-300 aircraft. *Composite World*, 2021, no. 3, pp. 7.
13. "Wing of Tomorrow": FACC and Airbus develop wings of the future. Available at: <https://newsroom.aviator.aero/wing-of-tomorrow-facc-and-airbus-develop-wings-of-the-future> (accessed: September 10, 2021).
14. GKN Aerospace Manufactures First Parts for Wing of Tomorrow Program. Available at: <https://www.compositesworld.com/news/gkn-aerospace-manufactures-first-demonstrator-parts-for-wing-of-tomorrow-program> (accessed: September 10, 2021).
15. Update: Lower wing skin, Wing of Tomorrow. Available at: <https://www.compositesworld.com/articles/update-lower-wing-skin-wing-of-tomorrow> (accessed: September 13, 2021).
16. Large, high-volume, infused composite structures on the aerospace horizon. Available at: <https://www.compositesworld.com/articles/large-high-volume-infused-composite-structures-on-the-aerospace-horizon> (accessed: September 7, 2021).
17. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 13, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-106.
18. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Grigoreva L.N., Usacheva M.N., Hrulkov A.V. Robotic laying out of prepregs as an alternative to technology to ATL and AFP (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-87-98.

Информация об авторах

Тимошков Павел Николаевич, советник генерального директора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Гончаров Виталий Александрович, начальник научно-исследовательского отделения, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Усачева Мария Николаевна, техник 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Хрульков Александр Владимирович, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Pavel N. Timoshkov, Counselor of Director General, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vitaly A. Goncharov, Head of Scientific-Research Bureau, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria N. Usacheva, Second Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Khrulkov, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 09.11.2021; одобрена после рецензирования 22.11.2021; принята к публикации 22.11.2021.

The article was submitted 09.11.2021; approved after reviewing 22.11.2021; accepted for publication 22.11.2021.

Научная статья

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-76-87

ГИБРИДНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ (обзор)

В.М. Серпова¹, А.Н. Няфкин¹, Е.И. Курбаткина¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Представлены научно-технический литературный обзор гибридных композиционных материалов (КМ) на основе меди, а также распространенные сочетания армирующих компонентов для изготовления гибридных КМ. Кратко упомянуты основные методы изготовления гибридных КМ на основе меди. Рассмотрено влияние сочетания различных видов армирующих компонентов и их объемного или массового содержания на механические, теплофизические и трибологические свойства гибридных КМ на основе меди. Приведено сравнение характеристик гибридных КМ с матричными сплавами или металлическими КМ подобных систем.

Ключевые слова: композиционный материал, гибридный композиционный материал, армирующий компонент, нитевидные волокна, частицы, карбид кремния, оксид графита, борид титана, графен, нитрид алюминия

Для цитирования: Серпова В.М., Няфкин А.Н., Курбаткина Е.И. Гибридные металлические композиционные материалы на основе меди (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-76-87.

Scientific article

HYBRID METAL MATRIX COMPOSITES BASED ON COPPER (review)

Viktoriya M. Serpova¹, Andrey N. Nyafkin¹, Elena I. Kurbatkina¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: The article presents a scientific and technical literature review of copper-based hybrid composite materials (CM). Common combinations of reinforcing components for the manufacture of hybrid composite materials are presented. The main methods for fabricating copper-based hybrid CMs are briefly mentioned. The influence of a combination of various types of reinforcing components and their volume or mass content on the mechanical, thermo-physical and tribological properties of hybrid CMs based on copper is considered. A comparison of the characteristics of hybrid CMs with matrix alloys or metallic CMs of similar systems is given.

Keywords: composite material, hybrid composite material, reinforcing component, whiskers, particles, silicon carbide, graphite oxide, titanium boride, graphene, aluminum nitride

For citation: Serpova V.M., Nyafkin A.N., Kurbatkina E.I. Hybrid metal matrix composites based on copper (review). Trudy VIAM, 2022, no. 1 (107), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-76-87.

Введение

Разработка и производство перспективных изделий и техники различного назначения сопряжено с необходимостью создания новых материалов [1–4].

Медь и ее сплавы широко применяются в качестве конструкционных материалов в машиностроении из-за их высокой электропроводности, теплопроводности и химической

стойкости. Однако эти материалы не обладают высокой прочностью и износостойкостью. Повышение их характеристик все чаще требуется для разработки новых конструкционных материалов с целью расширения сферы их применения. В последнее время для решения вышеперечисленных задач зарубежные научно-исследовательские учреждения проводят материаловедческие изыскания в области разработки композиционных материалов (КМ). Одним из таких направлений являются гибридные КМ на основе меди. К гибридным (полиармированным) относятся КМ, содержащие два или более различных по составу армирующих компонентов, распределенных в матричном материале. За счет введения различных армирующих компонентов в матрицу получается требуемое сочетание таких характеристик, как теплопроводность, электропроводность, износостойкость и прочность [5–11].

Цель данной работы – анализ научно-технической литературы в области исследований гибридных металлических композиционных материалов на основе меди с применением различных технологий, а также исследование структуры и свойств гибридных КМ.

Гибридные металлические композиционные материалы на основе меди

По способам формирования гибридные КМ разделяют на КМ, в которых армирующую фазу вводят искусственно в матрицу с применением различных технологий, и на КМ, в которых армирующую фазу синтезируют в матрице посредством химических реакций, протекающих в процессе изготовления. В настоящее время проводятся исследования формирования гибридных КМ на основе меди методами порошковой металлургии с последующей консолидацией искровым плазменным спеканием или горячим прессованием, а также синтезом армирующих компонентов непосредственно в расплаве (*in situ*) и сваркой трением с перемешиванием. В качестве армирующей фазы в гибридных КМ на основе меди применяют следующие компоненты и их смеси: AlN, BN, TiB, TiB₂, оксид графена (ОГ), SiC, углеродные нанотрубки (УНТ), Ag [5–12].

В данной статье рассмотрены следующие системы гибридных КМ на основе меди: Cu/AlN + BN, Cu/TiB₂ (порошок) + TiB_w (нитевидные волокна), Cu/SiC + УНТ, Cu/ОГ + SiO₂, Cu/Mo₂C + ОГ, Cu/ОГ + Ag, Cu/ОГ + SiO₂.

В работе [13] исследовали влияние объемного содержания армирующих частиц нитрида алюминия и нитрида бора в гибридном КМ системы Cu/AlN + BN на скорость износа при испытаниях на сухое скольжение, а также на предел прочности при растяжении, модуль упругости и пластичности гибридного КМ на основе меди. Изготовление гибридного КМ осуществляли сваркой трением с перемешиванием. Перед технологической стадией сваркой трением с перемешиванием проводят перемешивание частиц нитрида алюминия дисперсностью 10 мкм с нитридом бора дисперсностью 1 мкм в среде аргона с использованием магнитной мешалки. После чего полученную смесь порошков сушат и укладывают в канавку, сделанную в медной подложке, и далее проводят непосредственно процесс обработки трением с перемешиванием. Микроструктура полученного гибридного КМ системы Cu/AlN + BN с различным объемным содержанием армирующих компонентов представлена на рис. 1.

Отмечается, что с увеличением объемной доли армирующих частиц с 5 до 15 % (объемн.) предел прочности при растяжении повышается на ~17 %, а модуль упругости – на 12 %, при этом пластичность снижается на ~40 %. Полученные результаты авторы работы [13] связывают с эффектом деформационного упрочнения.

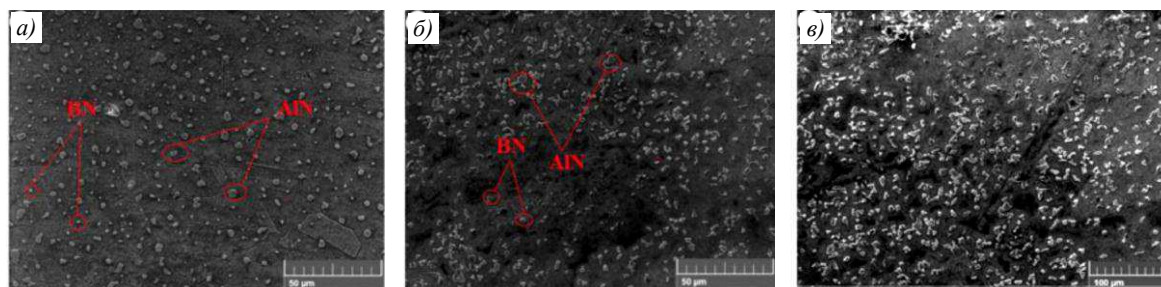


Рис. 1. Микроструктура гибридного композиционного материала на основе меди с объемным содержанием армирующих частиц 5 (а), 10 (б) и 15 % (объемн.) (в) [13]

Подобная зависимость прослеживается и при испытаниях на сухое скольжение, т. е. минимальному износу подвержен гибридный КМ с 15 % (объемн.) содержанием армирующих частиц (рис. 2). При этом скорость износа гибридного КМ меньше на 30 % по сравнению с матричным материалом.

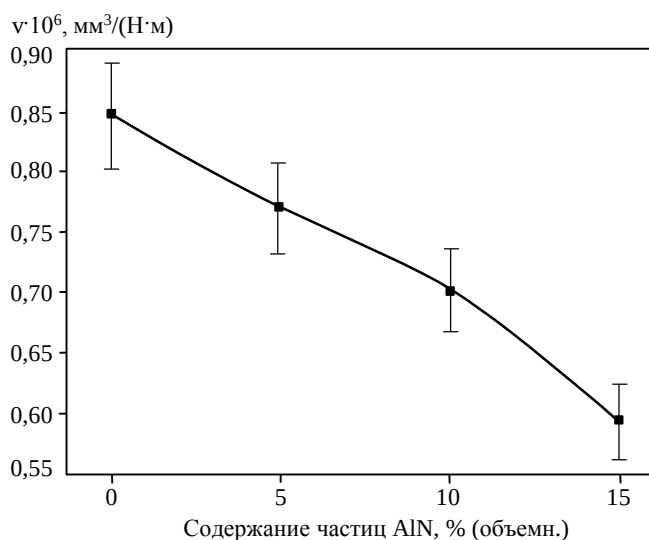


Рис. 2. Зависимость скорости износа от объемного содержания армирующих частиц в гибридном композиционном материале системы Cu/AlN + BN [13]

Медь, которая является пластичным материалом, при воздействии сухого скольжения в результате пластической деформации претерпевает адгезионный износ, а в гибридном КМ системы Cu/AlN + BN происходит сочетание адгезионного и абразивного износа. При этом за счет присутствия частиц нитрида бора на поверхности образуется самосмазывающийся слой, что способствует снижению скорости износа.

В работе [14] методом литья с перемешиванием получен гибридный КМ на основе меди, армированный частицами TiB_2 и нитевидными кристаллами TiB , которые формируются в результате протекания химических реакций между Ti и B в процессе изготовления. Для получения однородной структуры и уменьшения пористости в материале, после литья применяли обработку давлением – прокатку, а также термическую обработку – отжиг. Типичная структура полученного гибридного КМ на основе меди в литом состоянии и после прокатки и отжига представлена на рис. 3.

Исследование влияния различного соотношения массовых долей армирующей фазы гибридного КМ системы $\text{Cu}/\text{TiB}_2 + \text{TiB}_w$ на предел прочности при растяжении, модуль упругости и электрическое сопротивление проводили на трех соотношениях

армирующих фаз в материале, % (по массе): 0,7 TiB_2 + 0,6 TiB_w , 1,0 TiB_2 + 0,9 TiB_w и 1,4 TiB_2 + 1,2 TiB_w .

Для сравнения механических характеристик также изготовлен КМ на основе меди, армированный частицами 1,4 % (по массе) TiB_2 .

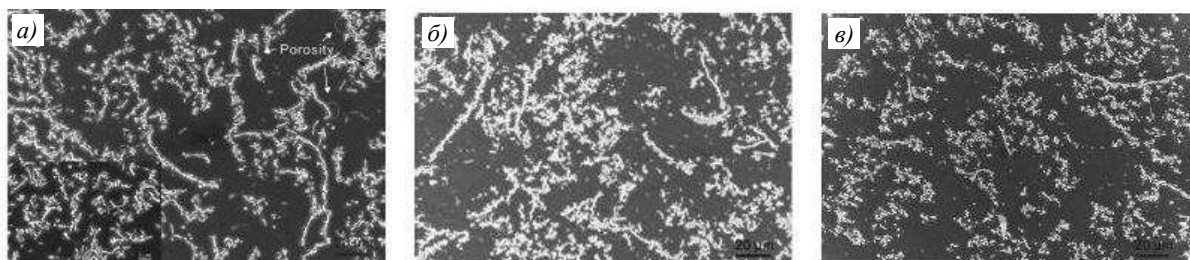


Рис. 3. Типичная структура гибридного композиционного материала на основе меди, армированного частицами TiB_2 и нитевидными кристаллами TiB в литом состоянии (а), после прокатки (б) и отжига (в) [14]

После прокатки и отжига гибридные КМ имеют плотную и однородную микроструктуру. Степень микросегрегации в литом гибридном КМ на основе меди, армированном частицами TiB_2 и нитевидными кристаллами TiB , меньше по сравнению с КМ на основе меди, армированным частицами 1,4 % (по массе) TiB_2 . Это связано с ингибированием путем гетерогенного зарождения.

С увеличением массовой доли армирующих компонентов в гибридных КМ без термической обработки и обработки давлением предел прочности при растяжении и модуль упругости увеличиваются на 30 и 44 % соответственно. Предел прочности при растяжении гибридного КМ по сравнению с аналогичной характеристикой для матрицы увеличился на 54 %, а модуль упругости – в ~2 раза. Отметим, что КМ на основе меди, армированный частицами 1,4 % (по массе) TiB_2 , как в литом состоянии, так и после прокатки и отжига обладает уменьшенными пределом прочности (на 7–13 %) и модулем упругости (на 15 %) по сравнению с гибридным КМ. Электрическое сопротивление КМ по сравнению с матрицей снижается в зависимости от массовой доли содержания армирующих фаз (с 5 до 33 %) как в литом гибридном КМ, так и после прокатки и отжига. Исходя из результатов приведенных исследований, авторы работы [14] делают вывод, что применение сочетания армирующих частиц диборида титана и нитевидных кристаллов борида титана в гибридном КМ на основе меди позволяет увеличить механические характеристики, а также электрическое сопротивление, по сравнению с КМ на основе меди, армированным частицами диборида титана.

Для формирования гибридных КМ на основе меди также применяют углеродные наполнители, такие как одномерные углеродные нанотрубки и двухмерный графен. Известно, что графен представляет собой двухмерную аллотропную модификацию углерода, образованную слоем атомов углерода толщиной в один атом. Использование графена в качестве армирующего компонента для КМ связано с возможностью повышения механических и теплофизических характеристик материала. Тем не менее как углеродные нанотрубки, так и графен склонны к агломерации в процессе изготовления КМ и обладают плохой смачиваемостью в медной матрице. Таким образом, для эффективного упрочнения КМ с применением углеродных наполнителей необходимо учитывать следующие факторы: формирование прочной межфазной связи между углеродными наполнителями и металлической матрице, а также предотвращение их агломерации. Кроме того, известно, что при содержании армирующего компонента в виде УНТ более 2 % (объемн.) проявляется склонность их к агломерации. Для решения этой проблемы,

помимо различных методов и способов изготовления КМ, применяют как методы порошковой металлургии с использованием шаровой мельницы, синтезирование армирующих компонентов в процессе изготовления (метод *in situ*), сварку трением с перемешиванием, так и добавление второго армирующего компонента.

Например, в работе [15] методом порошковой металлургии формировали гибридный КМ, армированный частицами карбида кремния и УНТ, и исследовали влияние объемного содержания армирующих компонентов на механические свойства и равномерность структуры. Способ изготовления заключался в следующем: чешуйки меди, частицы карбида кремния и УНТ смешивали и механически легировали в планетарной мельнице с использованием стеариновой кислоты, после чего консолидировали методом горячего прессования при температуре 700 °С и давлении 150 МПа с выдержкой 30 мин. Исследование пористости сформированного гибридного КМ на основе меди показало, что при увеличении содержания армирующего компонента УНТ с 2 до 6 % (объемн.) при постоянном объемном содержании частиц карбида кремния (2 % (объемн.)) увеличивается пористость – с 1,2 до 2,6 % соответственно, а также микротвердость – с 46 до 71 %. Модуль упругости увеличивается на 31 % при добавлении 2 % (объемн.) УНТ по сравнению с матричным материалом, при этом при добавлении 4 и 6 % (объемн.) УНТ модуль упругости увеличивается незначительно и находится на одинаковом уровне. Это объясняется тем, что гибридный композит с объемным армированием 2 % (объемн.) УНТ обладает более однородным распределением армирующего компонента в матрице, а при его большем содержании в структуре наблюдаются кластеры УНТ со слабой межфазной связью. С увеличением объемного содержания армирующих компонентов в гибридном КМ на основе меди предел текучести увеличивается в 3 раза по сравнению со значением для матричного материала.

Влияние объемного наполнения армирующих компонентов, таких как УНТ и ОГ, в гибридном КМ на основе меди на предел прочности изучали в работе [16]. Формирование данного гибридного КМ, проведенное как и в предыдущей работе, отличается тем, что консолидацию осуществляли с помощью искрового плазменного спекания. На рис. 4 представлены диаграммы растяжения «напряжение–деформация», полученные для гибридных КМ с различным объемным наполнением армирующих компонентов в сравнении с матричным сплавом; КМ на основе меди, армированных УНТ, и КМ на основе меди, армированного графеном.

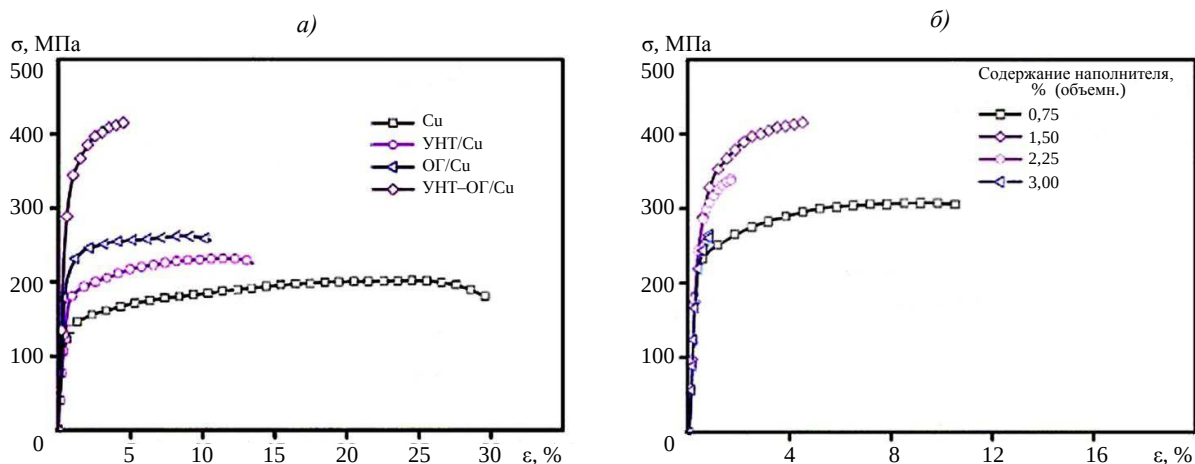


Рис. 4. Диаграммы растяжения «напряжение σ –деформация ϵ » [16] материалов на основе чистой меди (а), армированной углеродными нанотрубками (УНТ) и оксидом графена (ОГ), а также гибридного материала (б) с различным объемным наполнением УНТ + ОГ

Как видно из данных рис. 4, предел прочности гибридного КМ составляет ~400 МПа, что на 43 и 35 % больше по сравнению с пределами прочности КМ на основе меди, армированного УНТ, и КМ на основе меди, армированного ОГ, соответственно и в ~1,5 раза больше по сравнению с пределом прочности матричного материала. Отмечено также, что с увеличением объемной доли армирующих компонентов в гибридном КМ пластичность снижается.

В работе [17] исследованы механические и теплофизические характеристики гибридного КМ на основе меди, армированного ОГ и наночастицами Mo_2C . Для изготовления такого гибридного КМ в качестве армирующего компонента использован ОГ размером 0,5–4 мкм толщиной 2–4,4 нм. При этом наночастицы Mo_2C синтезированы в процессе отжига с использованием молибдата аммония в качестве прекурсора молибдена. Технологический процесс заключался в следующем: получение суспензии ОГ в дистиллированной воде с применением ультразвуковой обработки; добавление в полученную суспензию молибдата аммония с последующей ультразвуковой обработкой; сушка полученной смеси и отжиг в атмосфере аргона, в процессе чего получили систему $\text{Mo}_2\text{C} + \text{ОГ}$; получение суспензии в безводном этаноле из $\text{Mo}_2\text{C} + \text{ОГ}$ и чешуек меди, а также гибридных композиционных гранул в шаровой мельнице в атмосфере аргона; фильтрацию и сушку в вакуумной печи; консолидация гибридного КМ методом искрового плазменного спекания с последующим вакуумным отжигом. Для сравнения механических характеристик по той же технологии изготовлен КМ на основе меди, армированный 1 % (объемн.) ОГ, и образцы меди. Технологическая схема получения данного гибридного материала представлена на рис. 5. Отмечено, что наночастицы Mo_2C позволили обеспечить прочную связь на границе разделов.

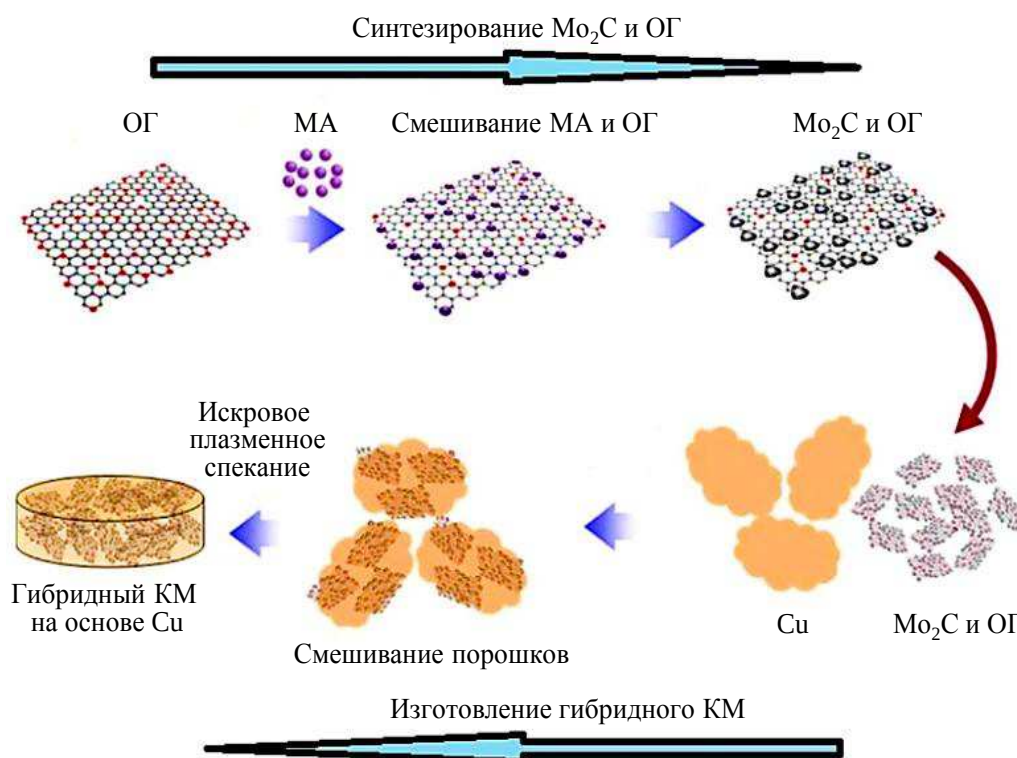


Рис. 5. Технологическая схема изготовления гибридного композиционного материала (КМ) на основе меди (МА – молибдат аммония), армированного углеродными нанотрубками и оксидом графена (ОГ) [17]

Исследования механических характеристик гибридного КМ на основе меди, армированного 1 % (объемн.) Mo_2C и ОГ, показали, что предел текучести составил 238 МПа, т. е. на 58 % и в 1,3 раза больше по сравнению с КМ на основе меди, армированным 1 % (объемн.) ОГ, и матричным материалом соответственно.

Результаты исследования теплофизических характеристик гибридного КМ на основе меди, армированного 1 % (объемн.) Mo_2C и ОГ, в сравнении с матричным материалом и КМ на основе меди, армированным 1 % (объемн.) ОГ, представлены на рис. 6.

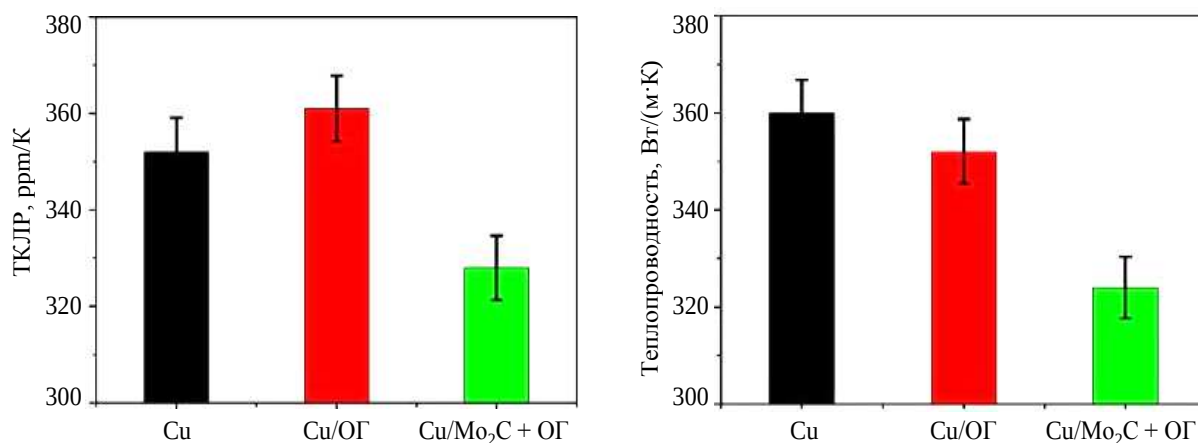


Рис. 6. Гистограммы температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и теплопроводности для гибридного композиционного материала (КМ) на основе меди, армированного 1 % (объемн.) Mo_2C и оксидом графена (ОГ), в сравнении с матричным материалом и КМ на основе меди, армированным 1 % (объемн.) ОГ [17]

Видно, что гибридный КМ на основе меди, армированный 1 % (объемн.) Mo_2C и ОГ, обладает пониженными значениями ТКЛР и теплопроводности по сравнению с матричным материалом и КМ на основе меди, армированным 1 % (объемн.) ОГ.

Для предотвращения агломерации графена в работе [18] для изготовления гибридного КМ на основе меди использован восстановленный оксид графена, модифицированный наночастицами серебра. Данный гибридный КМ изготовлен с применением методов одностадийного восстановления ОГ и нитрата серебра с последующим получением композитных гранул в шаровой мельнице и консолидацией вакуумным горячим прессованием. Для сравнения теплопроводности и электрического сопротивления изготовлены образцы гибридного КМ при различных технологических параметрах – давлении вакуумного горячего прессования 30, 40, 50 и 60 МПа, а также образцы меди методом вакуумного горячего прессования из исходных чешуек меди. Полученные результаты представлены на рис. 7.

Видно, что гибридный КМ на основе меди, армированный ОГ и частицами Ag, изготовленный при давлении консолидации 50 МПа, обладает повышенными на 19 и 22 % теплопроводностью и электрическим сопротивлением по сравнению с чистой медью. При этом микротвердость достигла максимальных значений в гибридном материале, изготовленном при максимальном давлении консолидации, что на 27 % больше, чем у чистой меди. Повешение теплопроводности, электрического сопротивления и микротвердости авторы работы [18] объясняют образованием оптимальной связи на границе разделов Ag–Cu и Ag–ОГ.

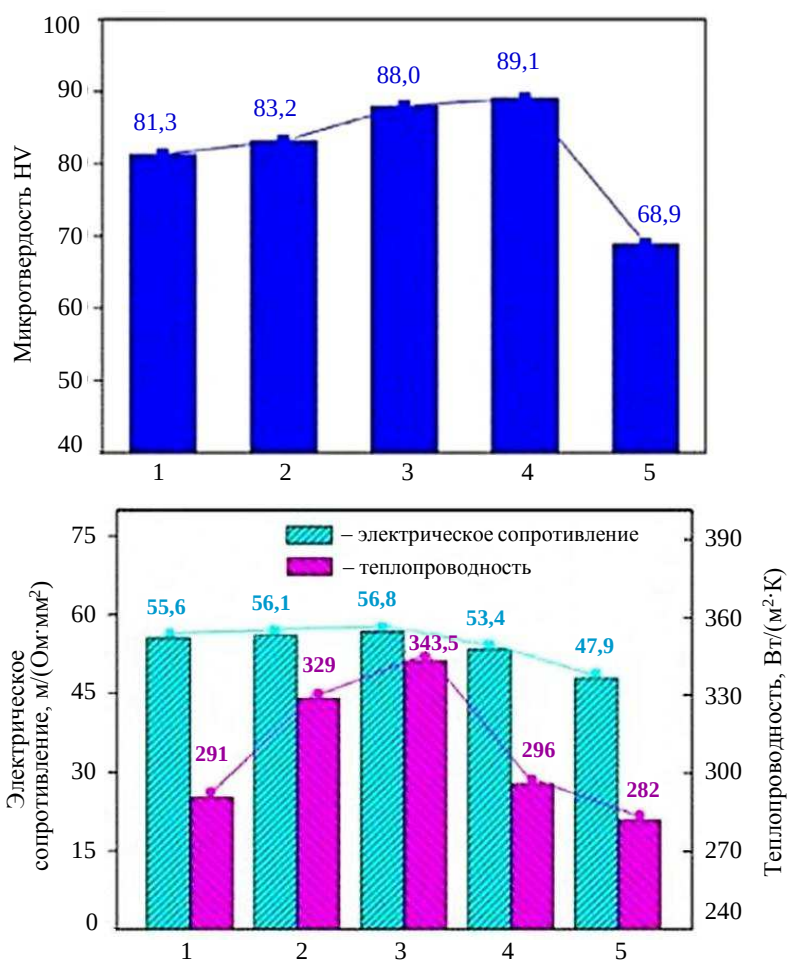


Рис. 7. Гистограммы микротвердости, теплопроводности и электрического сопротивления гибридного композиционного материала на основе меди, армированного оксидом графена и частицами серебра (1–4), при различных технологических параметрах изготовления (давление прессования: 30 (1), 40 (2), 50 (3) и 60 МПа (4)) в сравнении с матричным материалом (5 – чистая медь) [18]

В аналогичной работе [19] исследовали влияние армирующих наночастиц SiO_2 в гибридном КМ на основе меди, армированном восстановленным ОГ и наночастицами диоксида кремния, на механические характеристики материала. Гибридный КМ получали по технологии, аналогичной описанной в работе [18], отличающейся использованием дополнительной технологической операции – холодного прессования до проведения искрового плазменного спекания. Отмечено, что увеличение массовой доли частиц диоксида кремния приводит к увеличению агломерации восстановленного ОГ в матричном материале. Для сравнения механических характеристик изготовили КМ на основе меди, армированный восстановленным ОГ с содержанием 2,5 % (по массе), и гибридный КМ на основе меди, армированный ОГ и наночастицами диоксида кремния, а также образцы из меди в литом состоянии. В гибридном КМ содержание диоксида кремния составляет от 0,5 до 2,5 % (по массе) при постоянном содержании восстановленного ОГ: 2,5 % (по массе). Определено, что предел текучести при сжатии повышается: в ~1,8 раза при увеличении содержания частиц диоксида кремния, в ~2 раза по сравнению с КМ без армирующих частиц диоксида кремния и в ~6 раз по сравнению с чистой медью. При этом микротвердость незначительно увеличивается в зависимости

от содержания диоксида кремния в гибридном КМ, а по сравнению с КМ без содержания армирующего компонента диоксида кремния – на 30 % и в 2 раза по сравнению с чистой медью. Отмечено, что с увеличением содержания диоксида кремния пластичность снижается.

Заключения

В настоящее время в зарубежной научно-технической литературе представлены исследования в области изучения, разработок и создания гибридных КМ на основе меди.

К наиболее распространенным методам формирования гибридных КМ на основе меди относят методы порошковой металлургии с последующей консолидацией искровым плазменным спеканием или горячим прессованием, синтезом армирующих компонентов непосредственно в расплаве (*in situ*), сваркой трением с перемешиванием. В качестве армирующей фазы в гибридных КМ на основе меди применяют следующие компоненты и их смеси: нитрид алюминия, нитрид бора, борид титана, диборид титана, оксид графена, карбид кремния, углеродные нанотрубки и серебро.

Сочетание различных видов армирующих компонентов позволяет получать гибридные КМ с повышенными механическими, теплофизическими и трибологическими характеристиками по сравнению с матричными материалами и металлическими КМ подобных систем.

По результатам анализа свойств гибридных КМ установлено, что скорость износа гибридного КМ системы Cu/AlN + BN уменьшается с увеличением объемного содержания армирующего компонента. По сравнению с матричным материалом гибридный КМ системы Cu/AlN + BN при содержании 15 % (объемн.) армирующих компонентов обладает уменьшенной на 30 % скоростью износа по сравнению с матричным материалом. Образование армирующих частиц TiB₂ и нитевидных кристаллов TiB в процессе изготовления гибридного КМ на основе меди позволяет увеличить предел прочности при растяжении на 54 %, модуль упругости – в ~2 раза по сравнению с матричным материалом. Композиционный материал подобной системы Cu–TiB₂ по сравнению с гибридным КМ системы Cu/TiB₂ + 0,6 TiB_w обладает меньшим пределом прочности на 13 % и модулем упругости – на 15 %.

Исследование гибридного КМ системы Cu/УНТ + SiC с различным объемным наполнением армирующего компонента показало, что с увеличением содержания армирующего компонента УНТ с 2 до 6 % (объемн.) при постоянном объемном содержании частиц карбида кремния 2 % (объемн.) увеличивается пористость с 1,2 до 2,6 %. Гибридный КМ с объемным армированием 2 % (объемн.) УНТ обладает более однородным распределением армирующего компонента в матрице, а при его увеличении в структуре наблюдаются кластеры УНТ со слабой межфазной связью. При этом модуль упругости возрастает на 31 % при добавлении 2 % (объемн.) УНТ по сравнению с матричным материалом, а при добавлении 4 и 6 % (объемн.) УНТ увеличивается незначительно и находится на одинаковом уровне. Исследование гибридного КМ системы Cu/УНТ + ОГ показало, что его предел прочности составляет ~400 МПа, что на 43 и 35 % больше по сравнению с пределами прочности КМ систем Cu–УНТ и Cu–ОГ соответственно и в ~1,5 раза больше по сравнению с пределом прочности матричного материала. Применение наночастиц Mo₂C в качестве армирующего компонента позволяет получить гибридный КМ системы Cu/Mo₂C + ОГ, обладающий пределом текучести на 58 % и в 1,3 раза больше по сравнению с КМ системы Cu–ОГ и матричного материала соответственно, а также пониженными значениями ТКЛР и теплопроводности.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
4. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
5. Карашаев М.М., Базылева О.А., Шестаков А.В., Овсепян С.В. Технологические основы создания металлических композиционных материалов, армированных оксидными и интерметаллидными частицами // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 29–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-29-36.
6. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-186-194.
7. Серпова В.М., Сидоров Д.В., Няфкин А.Н., Курбаткина Е.И. Гибридные металлические композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 3 (97). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-68-77.
8. Chawla N., Chawla K.K. *Metal Matrix Composites*. New York: Springer Science + Business Media, Inc., 2006. P. 351–379.
9. Chu K., Jia C.C., Jiang L.K., Li W.S. Thermal conductivity enhancement in carbon nanotube/Cu–Ti composites // *Applied Physics A*. 2013. Vol. 110. P. 269–273. DOI: 10.1007/s00339-012-7450-0.
10. Dong S.J., Zhou Y., Shi Y.W., Chang B.H. Formation of a TiB₂-Reinforced Copper-Based Composite by Mechanical Alloying and Hot Pressing // *Metallurgical and materials transactions A*. 2002. Vol. 33A. P. 1275–1280. DOI: 10.1007/s11661-002-0228-9.
11. Jia L., Yang M., Lu Z. et al. Microstructure evolution and reaction behavior of Cu–Ni alloy and B₄C powder system // *Progress in Natural Science: Materials International*. 2021. Vol. 31. P. 55–62. DOI: 10.1016/j.pnsc.2020.12.002.
12. Zhang X., Shi C., Liu E. In-situ space-confined synthesis of well-dispersed three-dimensional graphene/carbon nanotube hybrid reinforced copper nanocomposites with balanced strength and ductility // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 103. P. 178–187. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.
13. Thankachan T., Prakash K., Kavimani S. Investigating the effects of hybrid reinforcement particles on the microstructural, mechanical and tribological properties of friction stir processed copper surface composites // *Composites. Part B: Engineering*. 2019. Vol. 174. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107057.
14. Liang S., Li W., Jiang Y. et al. Microstructures and properties of hybrid copper matrix composites reinforced by TiB whiskers and TiB₂ particles // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 797. P. 589–594. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.05.1.
15. Akbarpour M.R., Salahi E., Alikhani H.F. et al. Fabrication, characterization and mechanical properties of hybrid composites of copper using the nanoparticulates of SiC and carbon nanotubes // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 572. P. 83–90. DOI: 10.1016/j.msea.2013.02.039.
16. Chen X., Tao J., Liu Y. et al. Interface interaction and synergistic strengthening behavior in pure copper matrix composites reinforced with functionalized carbon nanotube-graphene hybrids // *Carbon*. 2019. Vol. 146. P. 736–755. DOI: 10.1016/j.carbon.2019.02.048.

17. Chu K., Wang F., Li Y. et al. Interface and mechanical/thermal properties of graphene/copper composite with Mo₂C nanoparticles grown on grapheme // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 109. P. 267–279. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.
18. Luo H., Sui Y., Qi J. et al. Copper matrix composites enhanced by silver/reduced graphene oxide hybrids // *Materials Letters*. 2017. Vol. 196. P. 354–357. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.03.08.
19. Zhang X., Dong P., Zhang B. et al. Preparation and characterization of reduced graphene oxide/copper composites incorporated with nano-SiO₂ particles // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 671. P. 465–472. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.02.06.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing - the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
3. Kablov E.N., Valueva M.I., I.V. Zelenina, Khmel'nikskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
4. Imametdinov E.S., Valueva M.I. Composites for piston engines (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
5. Karashaev M.M., Bazyleva O.A., Shestakov A.V., Ovsepyan S.V. Technological principles for the development of metal composite materials reinforced with oxide and intermetallic particles. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 29–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-29-36.
6. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 5, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.
7. Serpova V.M., Sidorov D.V., Nyafkin A.N., Kurbatkina E.I. Hybrid metal matrix composites based on aluminum alloys (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-68-77.
8. Chawla N., Chawla K.K. *Metal Matrix Composites*. New York: Springer Science + Business Media, Inc., 2006, pp. 351–379.
9. Chu K., Jia C.C., Jiang L.K., Li W.S. Thermal conductivity enhancement in carbon nanotube/Cu–Ti composites. *Applied Physics A*, 2013, vol. 110, pp. 269–273. DOI: 10.1007/s00339-012-7450-0.
10. Dong S.J., Zhou Y., Shi Y.W., Chang B.H. Formation of a TiB₂-Reinforced Copper-Based Composite by Mechanical Alloying and Hot Pressing. *Metallurgical and materials transactions A*, 2002, vol. 33A, pp. 1275–1280. DOI: 10.1007/s11661-002-0228-9.
11. Jia L., Yang M., Lu Z. et al. Microstructure evolution and reaction behavior of Cu–Ni alloy and B₄C powder system. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2021, vol. 31, pp. 55–62. DOI: 10.1016/j.pnsc.2020.12.002.
12. Zhang X., Shi C., Liu E. In-situ space-confined synthesis of well-dispersed three-dimensional graphene/carbon nanotube hybrid reinforced copper nanocomposites with balanced strength and ductility. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, vol. 103, pp. 178–187. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.
13. Thankachan T., Prakash K., Kavimani S. Investigating the effects of hybrid reinforcement particles on the microstructural, mechanical and tribological properties of friction stir processed copper surface composites. *Composites, Part B: Engineering*, 2019, vol. 174. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107057.
14. Liang S., Li W., Jiang Y. et al. Microstructures and properties of hybrid copper matrix composites reinforced by TiB whiskers and TiB₂ particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 797, pp. 589–594. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.05.1.

15. Akbarpour M.R., Salahi E., Alikhani H.F. et al. Fabrication, characterization and mechanical properties of hybrid composites of copper using the nanoparticulates of SiC and carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 572, pp. 83–90. DOI: 10.1016/j.msea.2013.02.039.
16. Chen X., Tao J., Liu Y. et al. Interface interaction and synergistic strengthening behavior in pure copper matrix composites reinforced with functionalized carbon nanotube-graphene hybrids. *Carbon*, 2019, vol. 146, pp. 736–755. DOI: 10.1016/j.carbon.2019.02.048.
17. Chu K., Wang F., Li Y. et al. Interface and mechanical/thermal properties of graphene/copper composite with Mo₂C nanoparticles grown on grapheme. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, vol. 109, pp. 267–279. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.
18. Luo H., Sui Y., Qi J. et al. Copper matrix composites enhanced by silver/reduced graphene oxide hybrids. *Materials Letters*, 2017, vol. 196, pp. 354–357. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.03.08.
19. Zhang X., Dong P., Zhang B. et al. Preparation and characterization of reduced graphene oxide/copper composites incorporated with nano-SiO₂ particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 671, pp. 465–472. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.02.06.

Информация об авторах

Серпова Виктория Михайловна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Няфкин Андрей Николаевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Курбаткина Елена Игоревна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Viktoriya M. Serpova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey N. Nyafkin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elena I. Kurbatkina, Head of laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 09.11.2021; принята к публикации 09.11.2021.

The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 09.11.2021; accepted for publication 09.11.2021.

Научная статья

УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-88-96

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕРМОСТОЙКАЯ БЕССВИНЦОВАЯ ЭМАЛЬ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

О.В. Власова¹, В.С. Денисова¹, А.В. Закалашный¹, С.С. Солнцев¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Исследованы электроизоляционные покрытия на основе стеклообразующей системы $\text{BaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ для использования в электронных схемах на металлической подложке. По химической стойкости синтезированные составы относят к классу устойчивых стекол. Проведенные испытания показали, что экспериментальные составы значительно превосходят известные покрытия по диэлектрическим свойствам. Получены положительные данные по стабильности диэлектрических свойств и по качеству бездефектного слоя покрытия.

Ключевые слова: эмаль, электроизоляционное покрытие, стекло, диэлектрические свойства, электросопротивление, диэлектрик

Для цитирования: Власова О.В., Денисова В.С., Закалашный А.В., Солнцев С.С. Электроизоляционная термостойкая бессвинцовая эмаль для защиты элементов радиоэлектронной аппаратуры // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-88-96.

Scientific article

ELECTRICAL INSULATING HEAT-RESISTANT LEAD-FREE ENAMEL FOR THE PROTECTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT

Olga V. Vlasova¹, Valentina S. Denisova¹, Aleksander V. Zakalashniy¹, Stanislav S. Solntsev¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: In present work electrical insulating coatings based on $\text{BaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass-forming system for use in electronic circuits on a metal substrate were investigated. The synthesized compositions in terms of chemical resistance belong to the class of stabilized glasses. The tests were showed that the experimental compositions significantly exceed the known coatings in terms of dielectric properties. Positive data on the stability of dielectric properties and on the quality of the defect-free coating layer were obtained.

Keywords: enamel, electrical insulating coating, glass, dielectric properties, electrical resistance, dielectric

For citation: Vlasova O.V., Denisova V.S., Zakalashniy A.V., Solntsev S.S. Electrical insulating heat-resistant lead-free enamel for the protection of electronic equipment. Trudy VIAM, 2022, no. 1 (107), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-88-96.

Введение

При разработке радиоэлектронной аппаратуры на основе источников питания гибридных интегральных схем, в состав которых входят высокоомощные транзисторы, возникает проблема отвода тепла. Наряду с широко распространенными подложками из оксидной керамики, прежде всего оксида алюминия, могут быть использованы металлические подложки с покрытиями на основе тугоплавких стекол. Основными

преимуществами таких подложек, по сравнению с керамическими, являются их высокие значения теплопроводности, термостойкости, механической прочности, а также относительно невысокая стоимость при серийном производстве. Металлические подложки с защитным силикатным покрытием позволяют совмещать на одном основании толсто- и тонкопленочные микросхемы, монтировать бескорпусные элементы и интегральные схемы непосредственно на металлическое основание [1–3].

Интерес при разработке стекловидных диэлектриков представляют бесщелочные и бессвинцовые композиции в алюмоборосиликатной системе, содержащие оксиды щелочноземельных металлов. Достоинствами бесщелочных алюмоборосиликатных составов являются высокий уровень диэлектрических характеристик, химическая устойчивость и термостойкость. Введение оксидов щелочноземельных металлов в состав стекол данной системы позволяет улучшить технологические свойства и повысить температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) [4].

Введение оксида бора (B_2O_3) в кремнекислородный каркас приводит к уменьшению проводимости стекол, а введение оксида алюминия (Al_2O_3), напротив, к ее увеличению. Предположено, что влияние оксидов B_2O_3 и Al_2O_3 на проводимость обусловлено степенью упорядоченности распределения модификаторов в матрице стекла. Максимальная гидролитическая устойчивость и теплопроводность боросиликатных стекол достигаются в четверной координации бора. Стекла, обогащенные оксидом бора, склонны к расслоению на фазы, одна из которых представлена тетраэдрической алюмокремнекислородной сеткой, а другая – боратной сеткой, включающей бор в тройной и четверной координациях [5].

Различие величин длины связи B–O (0,148 нм) и Si–O (0,16–0,163 нм) приводит к структурной несовместимости тетраэдров $[BO_4]^-$ и $[SiO_4]$, что является причиной несмешиваемости стекол, содержащих тетраэдрические структурные элементы $[BO_4]^-$ и $[SiO_4]$.

Для совершенствования физико-химических свойств бесщелочных алюмоборосиликатных стекол широко используют оксиды двухвалентных металлов. Для синтеза электроизоляционных покрытий наибольший интерес представляют барийсодержащие алюмоборатные стекла, так как они обладают высоким электрическим сопротивлением и характеризуются одним из самых высоких значений ТКЛР наряду со свинецсодержащими стеклами [6].

Для получения достаточно высокого значения ТКЛР содержание BaO должно быть в количестве не менее 20 % (по массе). Исходя из положения области несмешиваемости в системе BaO– B_2O_3 – SiO_2 , в стеклах с содержанием BaO до 20 % (по массе) максимальное количество оксида B_2O_3 не может превышать 15 % (по массе), поскольку с увеличением содержания оксида бора стекла приобретают склонность к расслаиванию.

Покрытия на основе стекол системы BaO– B_2O_3 – SiO_2 без модифицирующих добавок характеризуются высокой температурой формирования (обжига) – более 900–1000 °C, что может быть причиной коробления металлических подложек. В целях обеспечения надежности диэлектрического слоя требуется получение покрытий толщиной до ~200 мкм, в связи с чем процесс формирования покрытия будет осуществляться в 2–3 раза дольше ввиду особенностей шликерно-обжиговой технологии. При повторных обжигах дальнейшее коробление субстратов неизбежно. Правка металлического основания не допускается, так как это может привести к разрушению диэлектрического слоя покрытия. Нарушение плоскостных характеристик основания не позволяет производить процесс построения электрической схемы. В связи с указанными

ранее ограничениями к качеству поверхности диэлектрического покрытия предъявляются самые высокие требования [7–10].

В данной работе снижение термических характеристик стекла как основы исследуемых электроизоляционных покрытий осуществлялось благодаря введению легкоплавкого оксида бора.

Материалы и методы

В качестве основы исследуемых электроизоляционных покрытий использовали стекло системы $\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ с высоким содержанием BaO .

Оксидный состав используемого стекла, % (по массе):

SiO_2	BaO	$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{ZnO}$ (сумма)	MoO_3
42–45	40–43	10–13	3

Физико-термические свойства стекла:

Свойства	Значения свойств
Плотность, г/см^3	3,5
ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	8,3
Температура начала деформации, $^{\circ}\text{C}$	780
Динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$ (при 900–1020 $^{\circ}\text{C}$)	10^8-10^4

Приготовление шликеров покрытий на основе исследуемых электроизоляционных стекол осуществляли по штатной шликерно-обжиговой технологии путем помола в фарфоровых барабанах алундовыми шарами с добавлением воды в течение 40 ч. Нанесение покрытия выполняли с помощью краскораспылителя (условная вязкость шликера по вискозиметру ВЗ-246 составляла 18–19 с) в 2–3 слоя. Температура формирования покрытия составляла 800–880 $^{\circ}\text{C}$ (в зависимости от состава), толщина защитного диэлектрического слоя – не менее 120–150 мкм.

Для изучения физико-химических свойств покрытий подготовлены сухие шликеры, из которых прессовали образцы для исследования на плавкость, ТКЛР и растекаемость. Растекаемость покрытий оценивали при использовании поворотной рамки, изготовленной в соответствии с требованиями ГОСТ Р 50045–92 (ИСО 4534–80), и пластины для растекания размером 80×60 мм из оксида Al_2O_3 . На пластине для растекания размещали спрессованные образцы исследуемых покрытий, а затем саму пластину помещали в печь, разогретую до температуры испытаний, на установленную в печном пространстве поворотную рамку, находящуюся в горизонтальном положении. После выдержки в течение 1 мин поворотную рамку наклоняли под углом 45 градусов. Через 2 мин пластину для растекания вынимали из печи. За результат принимали показатели трех измерений.

Термостойкость образцов определяли путем термоциклирования. Испытания проводили по режиму 20 $\pm$ 200 $^{\circ}\text{C}$ и 20 $\pm$ 400 $^{\circ}\text{C}$ в течение 300 ч при 15-кратном охлаждении на воздухе в течение 15 мин через равные промежутки времени.

Определение химической стойкости стекол выполнено по методу порошка. Порошок стекла просеивали через сито № 2,5. Конечную пробу для проведения исследования просеивали через сито № 063. Таким образом, размер частиц стекла находился в пределах от 0,63 до 2 мм. Из полученного просеянного порошка стекла отбирали три навески, помещали в колбу объемом 500 мл, заливали дистиллированной водой в количестве 400 мл, накрывали крышкой и подвергали нагреву на водяной бане в течение

3 ч. Далее жидкость сливали и порошок стекла высушивали при температуре 120 °С до постоянной массы. За результат испытания принимали разницу в массе между исходной навеской и порошком после нагрева в воде.

Проведение качественной оценки выщелачивания стекол при нагреве в дистиллированной воде на водяной бане происходило с помощью определения pH раствора. С помощью анализатора жидкости Эксперт-001-2 определяли pH дистиллированной воды перед заливкой в колбы и pH раствора после нагрева проб порошка стекла на водяной бане в течение 3 ч.

Исследование влияния температуры нагрева на электросопротивление покрытий проводили на универсальной пробойной установке УПУ-5М при напряжении электрического поля 1000 В. Нагрев осуществляли до температуры 650 °С.

Результаты и обсуждение

Ввиду слабых молекулярных связей между кольцами оксида бора (B_2O_3) данный оксид обладает низкой температурой плавления, несмотря на высокую прочность единичной связи В–О (496 кДж/моль), при этом прочность связи Si–О (444 кДж/моль) сопоставима с прочностью связи В–О. С увеличением температуры структура боратных стекол приобретает большую однородность, уменьшается число структурных неоднородностей, что способствует процессу формирования покрытий при обжиге. Оксид бора в эмалях действует в качестве флюса, уменьшая продолжительность варки и снижая вязкость при высоких температурах, а также уменьшает поверхностное натяжение. Результаты исследований показали, что введение оксида B_2O_3 в состав стекла приводит к постепенному снижению температуры начала размягчения с 780 до 700 °С (рис. 1).

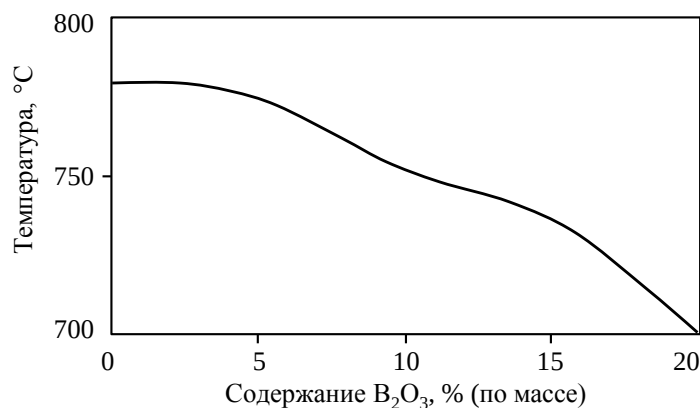


Рис. 1. Влияние содержания оксида бора (B_2O_3) на температуру начала размягчения покрытия

Цинк является тяжелым металлом, его оксид (ZnO) вводится в состав стекол в специальных целях ввиду токсичности данного соединения. Оксид цинка, являясь флюсом, значительно снижает вязкость стекол. Известно, что данный оксид повышает твердость и прочность эмали, уменьшает ТКЛР, повышает термическую и химическую стойкость. В результате исследования установлено, что с введением ZnO в состав исследуемого покрытия в количестве 3 % (по массе) происходит снижение температуры начала размягчения на 25 °С. Дальнейшее увеличение содержания ZnO (до 5 % (по массе)) не приводит к существенному изменению температурного интервала размягчения (рис. 2).

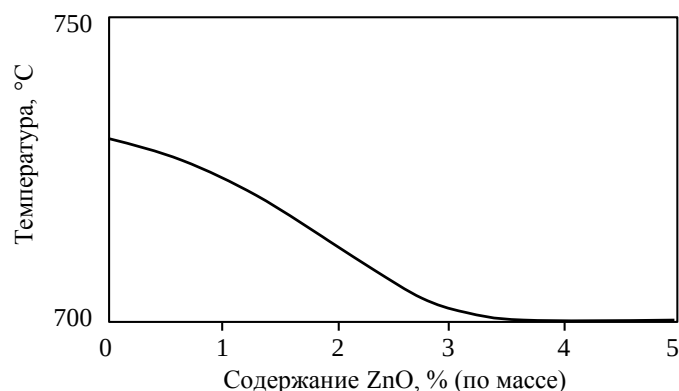


Рис. 2. Влияние содержания оксида цинка (ZnO) на температуру начала размягчения покрытия

Влияние содержания оксида бора на растекаемость аналогично влиянию на температуру начала размягчения. С увеличением содержания оксида B_2O_3 в покрытии наблюдается повышение растекаемости (рис. 3).

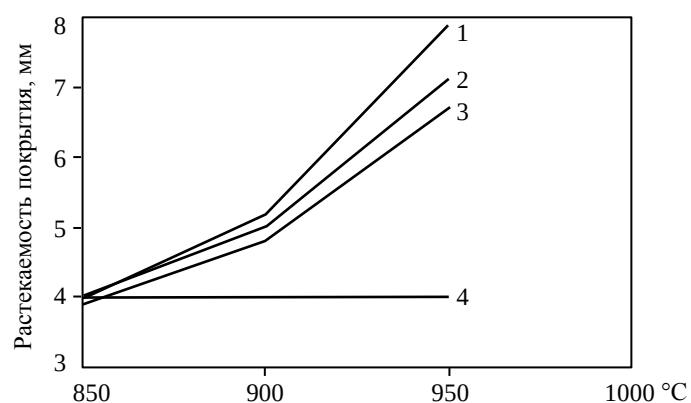


Рис. 3. Влияние температуры и содержания оксида бора (B_2O_3) на растекаемость покрытия, % (по массе): 20 (1); 15 (2); 10 (3); 4 – не содержит B_2O_3

Увеличение содержания оксида B_2O_3 в покрытии также приводит к существенному снижению ТКЛР – с $8,6 \cdot 10^{-6}$ до $6,7 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ (рис. 4).

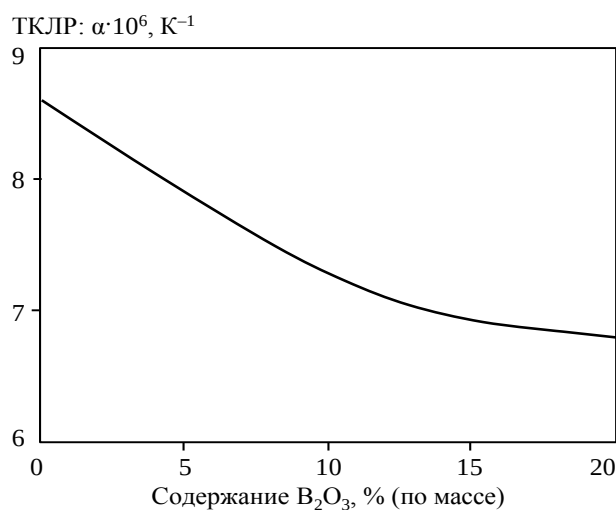


Рис. 4. Влияние содержания оксида бора (B_2O_3) на температурный коэффициент линейного расширения покрытия (ТКЛР)

В таблице представлены результаты исследований химической стойкости покрытия. Согласно классификации гидролитических классов аппаратных стекол, исследуемая композиция относится ко II классу (устойчивые стекла).

Определение химической стойкости стекол

Условный номер навески	Исходная масса, г	Масса после испытания, г	Потери массы, г	Относительное значение потерь массы, %	Отклонение от среднего значения потерь массы, %	Среднее квадратическое отклонение	Средняя относительная ошибка
1	10,0018	9,99130	0,1950	0,115	0,0100	0,00935	8,1
2	10,0022	9,98945	0,1275		–0,0125		
3	10,0000	9,98875	0,1125		0,0025		

В результате испытаний на химическую стойкость порошка стекла установлено, что в ходе кипячения данного состава в течение 3 ч кислотность среды из нейтральной смещена в сторону щелочной среды (значение pH составило 8,2). Данный факт свидетельствует о том, что происходит процесс выщелачивания ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и Ba^{2+} , которые содержатся в составе стекла (содержание последнего в количестве 42,5 % (по массе)). Химическая стойкость силикатных стекол обуславливается содержанием в них щелочных оксидов. Стойкость силикатов двухвалентных металлов значительно больше стойкости щелочных силикатов, особенно это относится к кальциевым и магниевым силикатам. Сравнительно менее химически устойчивы силикаты бария и свинца. Из-за высокого содержания в составе стекла оксида бария, а также небольшого содержания оксидов магния и кальция химическая стойкость к выщелачиванию данного состава относительно невысокая.

Твердые силикатные стекла обладают обычно отличными электроизоляционными свойствами и относятся к числу типичных диэлектриков. Подавляющему большинству силикатных стекол, как и диэлектрикам, свойственна плохая проводимость.

По механизму переноса тока в веществе различают проводимость ионную и электронную. В случае ионной проводимости ток переносится катионами Me^+ , в значительно меньшей степени – катионами Me^{+2} . С повышением температуры эксплуатации применяемых стекол электропроводность резко возрастает [11–13].

Мерой устойчивости к температуре у диэлектриков принято считать температуру вблизи точки Кюри ($T_{\text{K-100}}$), при которой удельное сопротивление $\rho_{\text{уд}} = 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [14–17].

В работе проведены исследования влияния температуры нагрева на электросопротивление покрытий. Для сравнения эффективности синтезированных составов произведены замеры электросопротивлений покрытий ЭВ-300-60М и ЭВК-103, разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и внедренных в конструкции изделий в различных отраслях промышленности. Значения сопротивлений, а также величина $T_{\text{K-100}}$ для синтезированных покрытий находятся в пределах 450–500 °С, в то время как у покрытия ЭВ-300-60М уменьшение электросопротивления наблюдается уже при более низких температурах ($T_{\text{K-100}} = 290 \text{ °С}$). Полученные данные отражают влияние химического состава стекла на электросопротивление. Известно, что повышенное электросопротивление синтезированных составов обусловлено высокими изоляционными свойствами основного компонента покрытия – оксида бора, его компактной упаковкой структурных элементов $[\text{BO}_3]$ и $[\text{BO}_4]^-$ в пространственной сетке.

Электрическую прочность стекла оценивали по способности выдерживать воздействие высоких электрических полей без разрушения и потери изолирующих свойств. Нарушение электрической прочности в том случае, когда сила поля превышает

критическое значение, называют пробоем, а соответствующее значение напряжения электрического поля – пробивным напряжением. Проведенные исследования показали способность экспериментальных составов выдерживать напряжения до 3000 В.

Проведены испытания образцов с покрытиями оптимальных составов на ресурс при суммарной наработке 300 ч при температуре 200 °С и 100 ч при температуре 300 °С. Образцы подвергали термической обработке по указанным режимам, после чего они прошли испытания на электрический пробой при напряжении 1000 В и замер электросопротивления. Установлено, что при воздействии высоких напряжений разрушения диэлектрического слоя не происходит, а значения электросопротивления остаются близкими к первоначальным ($\rho_{уд} = 10^{16}$ Ом·м).

Проведенные испытания на термостойкость образцов при температуре 200–400 °С в течение 300 ч при 15-кратном охлаждении до комнатной температуры через равные промежутки времени показывают, что после испытаний нарушения сплошности эмалевого слоя не происходит, также не наблюдается и других дефектов (сколы, язвы).

Заключения

Определены температурно-временные параметры формирования составов электроизоляционных покрытий.

Исследовано влияние содержания оксидов B_2O_3 и ZnO на растекаемость покрытий, температуру начала размягчения и ТКЛР. Установлено, что с увеличением содержания оксидов B_2O_3 и ZnO в покрытии происходит снижение температуры начала размягчения на 70–80 °С и ТКЛР на 20 % по сравнению с исходным стеклом, а также повышается растекаемость.

Исследованы диэлектрические свойства покрытий, оцениваемые величиной удельного электросопротивления и температурой, при которой начинается снижение сопротивления. Проведенные испытания показали, что экспериментальные составы значительно превосходят известные покрытия по диэлектрическим свойствам. Например, $T_{к-100}$ у покрытия ЭВ-300-60М составляет ~300 °С, а у покрытий системы $BaO-B_2O_3-SiO_2$: 500–580 °С. Величина пробивного напряжения составляет более 1000 В.

Проведены исследования диэлектрических составов на ресурс при суммарной наработке 300 ч при температуре 200 °С и 100 ч при температуре 300 °С, а также испытания на термостойкость образцов с покрытием при температуре 200–400 °С в течение 300 ч при 15-кратном охлаждении до комнатной температуры через равные промежутки времени. В результате проведенных испытаний получены положительные данные по стабильности диэлектрических свойств и по качеству бездефектного слоя покрытия.

Исследование химической стойкости синтезированных составов определяли согласно классификации гидролитических классов аппаратных стекол и установили, что синтезированные составы относятся ко II классу.

В работе исследованы электроизоляционные покрытия в системе $BaO-B_2O_3-SiO_2$ для использования их при изготовлении электронных схем на металлической подложке. Преимуществом синтезированных покрытий является не только наличие высоких диэлектрических свойств, но и более простая технология их применения.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тезисы докладов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-техническое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.

3. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 65. № 6. С. 846–855.
5. Немиллов С.В. Оптическое материаловедение. Оптические стекла: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 175 с.
6. Аппен А.А. Химия стекла. Л.: Химия, 1974. 352 с.
7. Денисова В.С., Власова О.В., Малинина Г.А. Влияние добавки тетраборида кремния на термостойкость реакционноотверждаемых покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-50-55.
8. Беляченков И.О., Щеголева Н.Е., Чайникова А.С., Ваганова М.Л., Шавнев А.А. Влияние спекающих и модифицирующих добавок на процесс спекания и свойства нитридокремниевой керамики // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 70–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-70-78.
9. Баринев Д.Я., Мараховский П.С., Мальцева Е.Ю., Беспрозванный Е.Д., Алясова Е.Е. Исследование теплопроводности печатных плат на основе алюминиевой подложки и алюмооксидного диэлектрика // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 43–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-43-48.
10. Лощинин Ю.В., Будиновский С.А., Размахов М.Г. Теплопроводность теплозащитных легированных оксидами РЗМ покрытий $ZrO_2-Y_2O_3$, полученных магнетронным нанесением // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
11. Шилова О.А., Полякова И.Г., Петрова И.В. и др. Синтез и исследование пленкообразующих композиций на основе кремнезоль и дисперсных оксидов для получения стеклокерамических электроизоляционных покрытий // Физика и химия стекла. 2015. Т. 41. № 6. С. 819–829.
12. Ефимова Л.Н., Иванов Н.В., Шилова О.А. Электроизоляционное стеклокерамическое покрытие на нихромовом проводе малого сечения // Сборник материалов II науч.-техн. конф. с междунар. участием «Наноиндустрия и технологии будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 10 апр. 2014 г.). СПб., 2014. С. 74–76.
13. Структурные превращения в стеклах при повышенных температурах / под ред. Н.А. Торопова, Е.А. Порай-Кошица. М.; Л.: Наука, 1965. 514 с.
14. Шелби Дж. Структура, свойства и технология стекла: пер. с англ. М.: Мир, 2006. 288 с.
15. Krishnan A.T., Bae S., Fonash S.J. Low temperature microcrystalline silicon thin film resistors on glass substrates // Solid-State Electronics. 2000. Vol. 44. No. 7. P. 1163–1168.
16. Bao R., Busta C.M., Su X. et al. Microstructures, phases, and properties of low melting $BaO-B_2O_3-ZnO$ glass films prepared by pulsed laser deposition // Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. Vol. 371. P. 28–32.
17. Технология эмали и защитных покрытий: учеб. пособие / под ред. Л.Л. Брагиной, А.П. Зубехина. Харьков: НТУ «ХПИ»; Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003. 484 с.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. Abstracts of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
2. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technical development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. Innovatsii, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
3. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
4. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. Vestnik Rossiyskoy akademii nauk, 2020, vol. 65, no. 6, pp. 846–855.
5. Nemilov S.V. Optical materials science. Optical glasses: textbook. St. Petersburg: SPbGU ITMO, 2011, 175 p.

6. Appen A.A. Glass chemistry. Leningrad: Khimiya, 1974, 352 p.
7. Denisova V.S., Vlasova O.V., Malinina G.A. Effect of the addition of silicon tetraboride on the thermal stability of reaction cured coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-50-55.
8. Belyachenkov I.O., Schegoleva N.E., Chainikova A.S., Vaganova M.L., Shavnev A.A. The influence of sintering and modifying additives on the sintering process and the properties of silicon nitride ceramics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 70–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-70-78.
9. Barinov D.Ya., Marahovskiy P.S., Maltceva E.Yu., Besprozvanniy E.D., Aliasova E.E. Research of thermal conductivity of printed circuit boards based on aluminum substrate and alumina dielectric. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 43–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-43-48.
10. Loshchinin Yu.V., Budinovskiy S.A., Razmakhov M.G. Heat conductivity of heat-protective coatings ZrO_2 – Y_2O_3 alloyed by REM oxides obtained by magnetronny application. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
11. Shilova O.A., Polyakova I.G., Petrova I.V. et al. Synthesis and study of film-forming compositions based on silica sols and dispersed oxides for obtaining glass-ceramic electrical insulating coatings. *Fizika i khimiya stekla*, 2015, vol. 41, no. 6, pp. 819–829.
12. Efimova L.N., Ivanov N.V., Shilova O.A. Electrical insulating glass-ceramic coating on a small-section nichrome wire. Collection of materials II scientific-technical. conf. with int. participation "Nanoindustry and technologies of the future" for students, graduate students and young scientists. St. Petersburg, 2014, pp. 74–76.
13. Structural transformations in glasses at elevated temperatures. Ed. N.A.. Toropova, E.A. Porai-Kosice. Moscow; Leningrad: Nauka, 1965, 514 p.
14. Shelby J. Structure, properties and technology of glass: trans. from English Moscow: Mir, 2006, 288 p.
15. Krishnan A.T., Bae S., Fonash S.J. Low temperature microcrystalline silicon thin film resistors on glass substrates. *Solid-State Electronics*, 2000, vol. 44, no. 7, pp. 1163–1168.
16. Bao R., Busta C. M., Su X. et al. Microstructures, phases, and properties of low melting BaO – B_2O_3 – ZnO glass films prepared by pulsed laser deposition. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, vol. 371, pp. 28–32.
17. Technology of enamel and protective coatings: textbook. Ed. L.L. Bragina, A.P. Zubekhin. Kharkov: NTU KhPI; Novochoerkassk: YURSTU (NPI), 2003, 484 p.

Информация об авторах

Власова Ольга Викторовна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Денисова Валентина Сергеевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Закалашный Александр Вадимович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Солнцев Станислав Сергеевич, советник генерального директора, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Olga V. Vlasova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valentina S. Denisova, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksander V. Zakalashniy, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav S. Solntsev, Counselor of Director General, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 05.10.2021; одобрена после рецензирования 13.10.2021; принята к публикации 13.10.2021.
The article was submitted 05.10.2021; approved after reviewing 13.10.2021; accepted for publication 13.10.2021.

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-97-110

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО СПЛАВА ВЖ175

*И.А. Ходинев¹, М.А. Горбовец¹, С.А. Монин¹, П.В. Рыжков¹*¹НИИ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Исследована малоцикловая усталость при «жестком» и «мягком» циклах нагружения жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175 при комнатной и двух эксплуатационных температурах и трех коэффициентах асимметрии. Испытания проведены при синусоидальном цикле нагружения с частотой 1 Гц. Проведено сопоставление напряжений при «мягком» и «жестком» циклах нагружения, а также сравнение кривой усталости и априорных кривых, полученных с использованием характеристик кратковременной прочности.

Ключевые слова: малоцикловая усталость (МЦУ), жаропрочный сплав, деформируемый сплав, никелевый сплав, уравнение Баскина–Мэнсона–Коффина, прогнозирование характеристик сопротивления усталости, коэффициент асимметрии

Для цитирования: Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А., Рыжков П.В. Исследование режимов синтеза поддерживающих структур деталей, получаемых методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-97-110.

Scientific article

LOW-CYCLE FATIGUE AT ELEVATED TEMPERATURES OF HEAT-RESISTANT NICKEL-BASED ALLOY MANUFACTURED BY SELECTIVE LASER MELTING

*Ivan A. Hodinev¹, Mikhail A. Gorbovets¹, Sergey A. Monin¹, Petr V. Ryzhkov¹*¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: Low-cycle fatigue has been investigated under a «hard» loading cycle and under a «soft» loading cycle of a heat-resistant deformable VZh175 alloy at room and two operating temperatures at three asymmetry coefficients. The tests were carried out at a sinusoidal loading cycle with a frequency of 1 Hz. Comparison of stresses at «soft» and «hard» loading cycles is carried out. A comparison of the fatigue curve and a priori curves obtained using the characteristics of short-term strength is carried out.

Keywords: low-cycle fatigue (LCF), high-temperature alloy, wrought alloy, nickel alloy, Basquin–Manson–Coffin equation, prediction of fatigue resistance characteristics, asymmetry coefficient

For citation: Hodinev I.A., Gorbovets M.A., Monin S.A., Ryzhkov P.V. Low-cycle fatigue at elevated temperatures of heat-resistant nickel-based alloy manufactured by selective laser melting. Trudy VIAM, 2022, no. 1 (107), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-97-110.

Введение

Жаропрочные никелевые сплавы активно используют при производстве рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей (ГТД), а также лопаток турбин стационарных газотурбинных установок (ГТУ), поскольку эти сплавы обладают соответствующими характеристиками прочности в эксплуатационных условиях. Разработка жаропрочных сплавов на основе никеля является актуальной задачей и связана с требованием

повышения температурной работоспособности и сохранением физико-механических свойств материалов при воздействии различных факторов [1–10]. Исследуемый жаропрочный сплав на основе никеля используют для изготовления дисков турбин, а также других деталей ротора ГТД и ГТУ.

Для деталей, подверженных циклическому нагружению, определяют характеристики мало- и многоциклового усталости. Малоцикловая усталость (МЦУ) характеризуется напряжениями, превышающими предел текучести материала. В процессе проведения испытаний на МЦУ контролируют один из параметров – размах напряжения или полной деформации за цикл. Контролируемый параметр остается неизменным на протяжении всего испытания, а второй параметр меняется. Нагружение при контроле деформации называется «жестким», а при контроле нагрузки – «мягким».

В данной работе определены свойства сплава ВЖ175 при МЦУ как при «жестком», так и «мягком» нагружении при трех коэффициентах асимметрии цикла. После проведения испытаний определены пределы выносливости и получены характеристики рассеяния экспериментальных значений, а также проанализированы зависимости этих величин от температуры испытания и коэффициентов асимметрии. Проведено сопоставление экспериментальных значений долговечности с априорными деформационными кривыми, спрогнозированными на основе характеристик кратковременной прочности, а также сравнение напряжений, задаваемых при «мягком» цикле нагружения, с напряжениями, возникающими при «жестком» цикле нагружения на одинаковых уровнях долговечности.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследование материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5].

Материалы и методы

Исследуемый сплав ВЖ175 на основе никеля относится к классу дисперснотвердеющих. Образцы из сплава получены после вакуумно-индукционной выплавки с переплавом в вакуумной дуговой печи, изотермической штамповкой на воздухе в несколько переходов и по стандартной термической обработке для данного материала (закалки и двойного старения) [11–13].

Испытания на МЦУ проведены в соответствии с ГОСТ 25.502–79 [14] и ASTM E606 [15]. При этих испытаниях использованы гладкие цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 5 мм и длиной рабочей части 15 мм, соответствующие требованиям ASTM E606. Испытания проведены на сервогидравлическом универсальном испытательном оборудовании серии LFV-100 фирмы Walter+Bai. Контроль полной деформации осуществлен с помощью высокотемпературного экстензометра с керамическими щупами. Поддержание заданной температуры испытаний осуществлялось при помощи трехзонных электрических печей [16].

Образцы испытывали при температурах 20; 650 и 750 °С. При одной температуре и одном коэффициенте асимметрии испытано от 15 до 25 образцов на нескольких уровнях амплитуд деформации. Испытания проводили при трех коэффициентах асимметрии (R), равных 0; 0,5; –1, синусоидальной форме цикла с частотой нагружения $f = 1$ Гц как для «мягкого», так и для «жесткого» цикла нагружения. При проведении испытаний определяли число циклов до разрушения N_p . Для испытаний при «жестком» цикле регистрировали напряжения в течение всего испытания – производили запись петель гистерезиса. Критериями окончания испытания являлись:

- падение напряжения более чем на 50 %;
- разделение образца на две части.

Результаты и обсуждение

Для аппроксимации зависимости числа циклов до разрушения от заданной деформации или заданного напряжения, в соответствии с рекомендациями РЦ АП-33.15-1 [17], могут использоваться степенная и экспоненциальная модели:

$$N_f = A \cdot \Delta \varepsilon^B, \quad N_f = C \cdot \Delta \sigma^D, \quad (1)$$

$$N_f = \alpha \cdot \exp(\beta \Delta \varepsilon), \quad N_f = \gamma \cdot \exp(\delta \Delta \sigma), \quad (2)$$

где N_f – число циклов до разрушения; $\Delta \varepsilon$ – размах полной деформации; $\Delta \sigma$ – размах напряжения; $A, B, C, D, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коэффициенты.

В процессе обработки результатов испытаний выявлено, что для большинства испытаний аппроксимация уравнением (1) характеризуется меньшим среднеквадратичным отклонением (СКО) экспериментальных результатов от линии регрессии [17]:

$$S(\lg N) = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\lg N_i - \overline{\lg N_i})^2}, \quad (3)$$

где n – количество экспериментальных точек; $\lg N_i$ – экспериментальные логарифмы долговечностей; $\overline{\lg N_i}$ – логарифмы долговечностей, определенные по регрессионной зависимости для заданного уровня напряжения или деформации.

Поэтому для аппроксимации экспериментальных данных необходимо использовать степенную модель (1). После логарифмирования обеих частей уравнения (1) получена линейная зависимость

$$\lg N_f = a + b \cdot \lg \Delta \varepsilon; \quad \lg N_f = c + d \cdot \lg \Delta \sigma, \quad (4)$$

где a, b, c, d – коэффициенты регрессии.

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных, полученных при девяти режимах испытаний (трех температурах: 20; 650 и 750 °С; трех коэффициентах асимметрии R : 0; 0,5; –1), построены линии средних значений $\lg N_f$, соответствующих вероятности разрушения 50 % (рис. 1 и 2). Определены также коэффициенты линейной регрессии a и b , средние значения предела МЦУ на базе 10^4 циклов и СКО: табл. 1 – для «жесткого» цикла нагружения; табл. 2 – для «мягкого» цикла нагружения.

Таблица 1

Параметры линии регрессии при «жестком» цикле нагружения

Температура испытания, °С	Коэффициент асимметрии R	Коэффициенты линейной регрессии		Предел выносливости $\Delta \varepsilon$, % (на базе $N = 10^4$ циклов)	СКО по формуле (3)
		a	b		
20	–1	5,70	–3,38	1,00	0,263
	0	5,80	–3,96	0,90	0,185
	0,5	5,34	–2,8	0,94	0,107
650	–1	8,4	–9,42	0,96	0,509
	0	7,51	–8,02	0,88	0,523
	0,5	7,91	–9,27	0,84	0,388
750	–1	7,14	–7,32	0,86	0,385
	0	7,70	–8,85	0,84	0,439
	0,5	7,10	–7,99	0,78	0,551

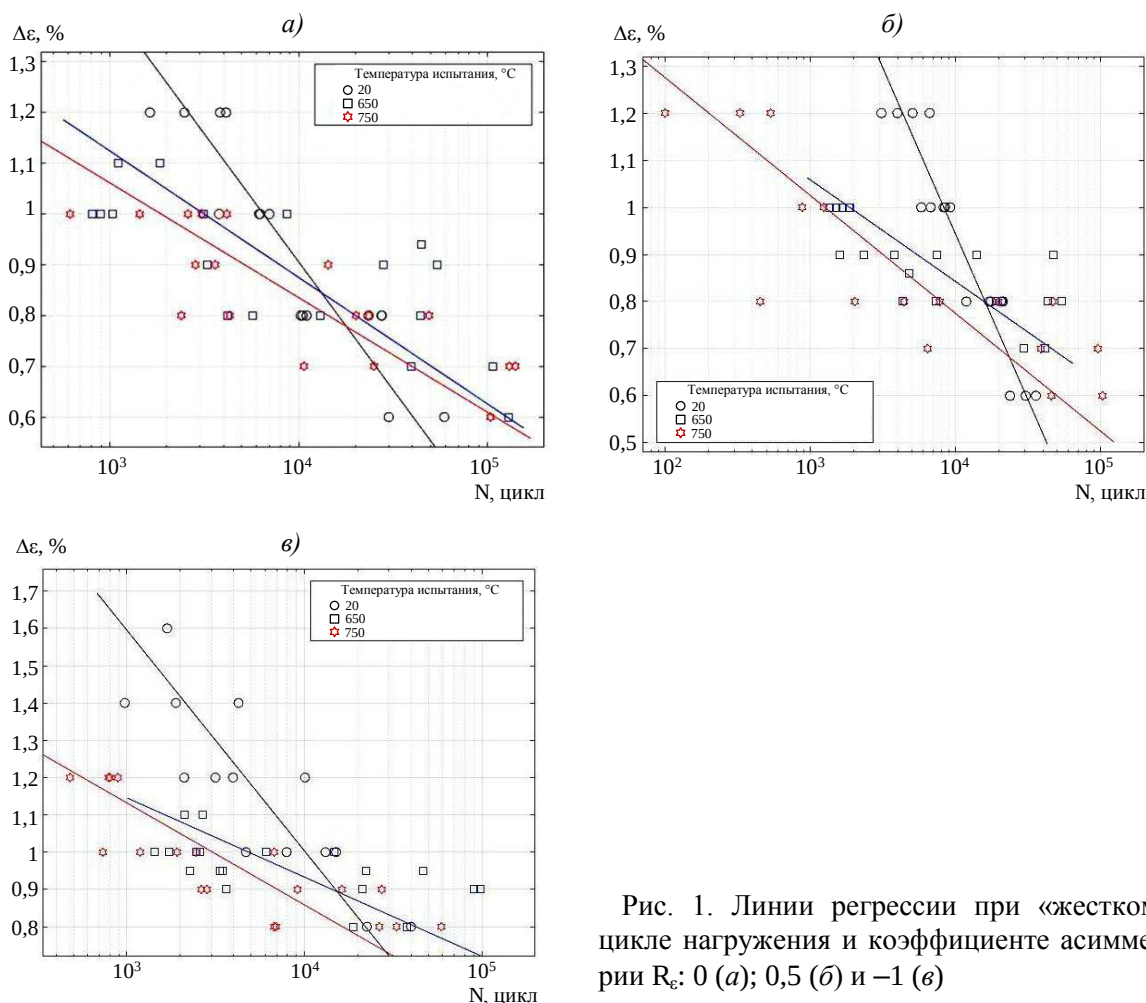


Рис. 1. Линии регрессии при «жестком» цикле нагружения и коэффициенте асимметрии R_ϵ : 0 (а); 0,5 (б) и -1 (в)

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных после испытаний при «жестком» цикле нагружения установлено следующее.

– Для всех трех исследуемых коэффициентов асимметрии повышение температуры вызывает снижение предела выносливости на базе 10^4 циклов:

- на 3–10 % – при повышении температуры испытания с 20 до 650 °C;
- на 4–10 % – при повышении температуры испытания с 650 до 750 °C.

– Для всех трех температур при сравнении размахов деформации $\Delta\epsilon$ наибольшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов характеризуется коэффициент асимметрии $R_\epsilon = -1$. Наименьшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов для комнатной температуры испытаний характеризуется коэффициент асимметрии $R_\epsilon = 0$, а для эксплуатационных температур – коэффициент асимметрии $R_\epsilon = 0,5$.

– Пределы выносливости на базе 10^4 циклов для комнатной и эксплуатационных температур отличаются не более чем на 15 %, однако коэффициент наклона линии регрессии b при увеличении температуры до эксплуатационной возрастает в 2–3 раза. Это свидетельствует о том, что при рассмотрении больших баз разница пределов выносливости имеет тенденцию к увеличению. Приведенные графические представления зависимостей подтверждают это утверждение.

– Среднеквадратичное отклонение, характеризующее рассеяние экспериментальных значений, значительно увеличивается при эксплуатационных температурах по сравнению с комнатной. Зависимость СКО от коэффициента асимметрии не прослеживается.

Таблица 2

Параметры линии регрессии при «мягком» цикле нагружения

Температура испытания, °C	Коэффициент асимметрии R	Коэффициенты линейной регрессии		Предел выносливости $\Delta\sigma$, МПа (на базе $N = 10^4$ циклов)	СКО по формуле (3)
		a	b		
20	–1	14,82	–0,011	1970	0,827
	0	7,50	–0,005	1320	0,104
	0,5	12,86	–0,024	800	1,040
650	–1	14,65	–0,012	1830	0,465
	0	12,10	–0,013	1220	0,451
	0,5	11,01	–0,021	715	0,505
750	–1	11,05	–0,009	1550	0,209
	0	11,98	–0,015	1050	0,268
	0,5	10,80	–0,027	500	0,362

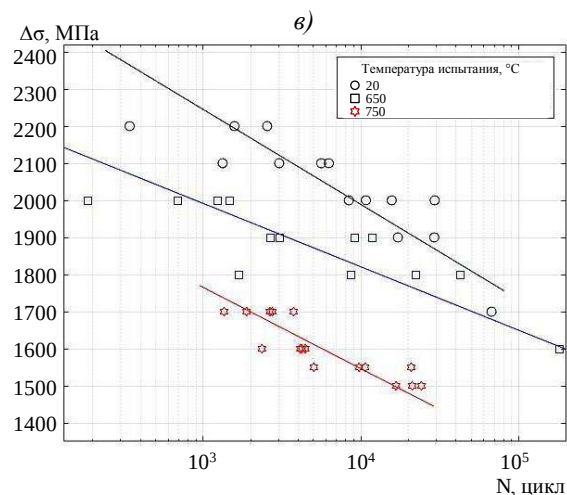
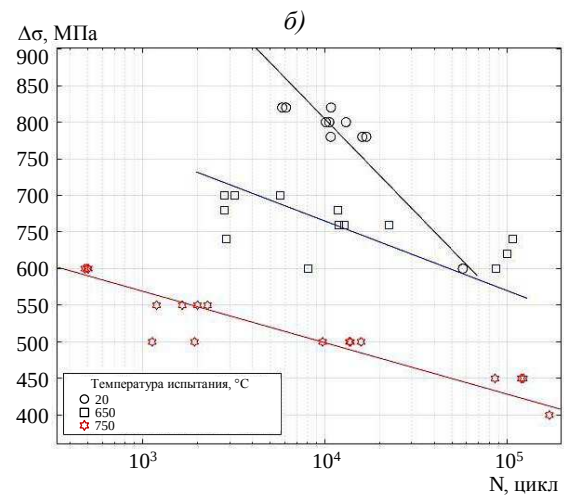
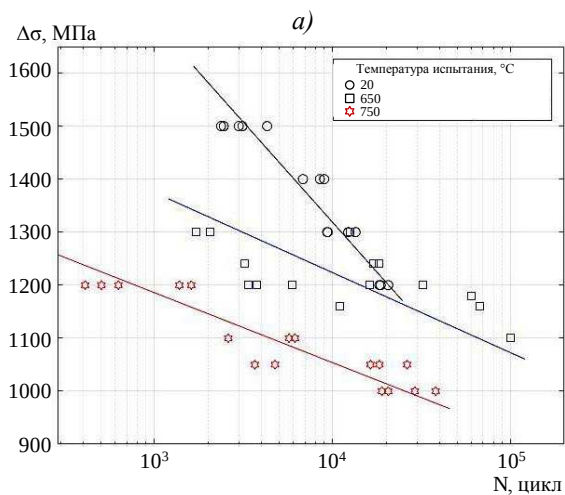


Рис. 2. Линии регрессии при «мягком» цикле нагружения и коэффициенте асимметрии R_c : 0 (а); 0,5 (б) и –1 (в)

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных после испытаний при «мягком» цикле нагружения установлено следующее.

– Для всех трех исследуемых коэффициентов асимметрии повышение температуры вызывает снижение предела выносливости на базе 10^4 циклов:

- на 5-10 % – при повышении температуры испытания с 20 до 650 °С;
- на 15–20 % – при повышении температуры испытания с 650 до 750 °С.
- Для всех трех температур при сравнении размахов напряжений $\Delta\sigma$ наибольшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов характеризуется коэффициент асимметрии $R_\sigma = -1$. При переходе к коэффициенту асимметрии $R_\sigma = 0$ предел выносливости снижается на ~30 %, а при переходе к $R_\sigma = 0,5$ – на 60 %.
- При всех трех исследуемых температурах коэффициент асимметрии $R_\sigma = 0,5$ характеризуется значительно бóльшим наклоном линии регрессии, чем другие коэффициенты асимметрии.
- Среднеквадратичное отклонение, характеризующее рассеяние экспериментальных значений, при температуре 650 °С в 2 раза больше, чем при температуре 750 °С.

Испытания при «жестком» цикле нагружения проведены при регистрации напряжений. Исследования поведения материала при «жестком» нагружении [12] показали, что максимальное и минимальное напряжения бóльшую часть испытания практически не меняются, поэтому для каждого испытания напряжения при количестве циклов $N_f/2$ зафиксированы как характерные для соответствующего уровня размаха деформации.

При «жестком» цикле нагружения при коэффициентах асимметрии $R_\sigma = 0$ и $R_\sigma = 0,5$ коэффициент асимметрии по медианным напряжениям R_σ (при числе циклов $N_f/2$) меняется в широком диапазоне, тогда как при $R_\sigma = -1$ коэффициент асимметрии по напряжениям тоже колеблется около значения $R_\sigma = -1$ (рис. 3). В связи с этим сопоставлены напряжения, возникающие при «жестком» цикле нагружения при коэффициенте асимметрии $R_\sigma = -1$, и напряжения, задаваемые при «мягком» цикле нагружения при коэффициенте асимметрии $R_\sigma = -1$ (рис. 4).

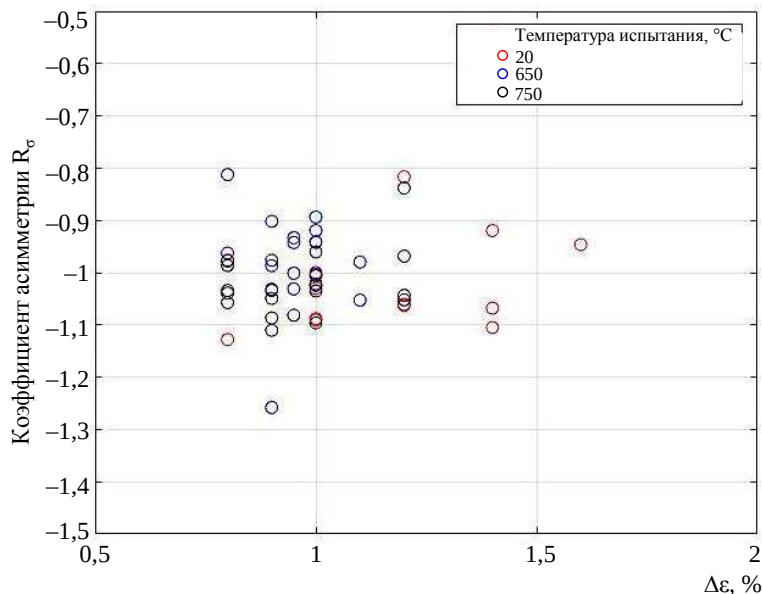


Рис. 3. Коэффициент асимметрии по медианным напряжениям R_σ при «жестком» цикле нагружения с коэффициентом асимметрии $R_\sigma = -1$

В результате сопоставления линий регрессии при «жестком» и «мягком» циклах нагружения установлено следующее:

- при комнатной и эксплуатационных температурах предел выносливости на базе 10^4 циклов, определенный по линии регрессии при «мягком» цикле нагружения,

больше на 2–6 %, чем предел, определенный при помощи регрессионного анализа медианных напряжений, возникающих при «жестком» цикле нагружения;

– при всех трех рассмотренных температурах линии регрессии, построенные по медианным напряжениям при «жестком» цикле нагружения, характеризуются бóльшим углом наклона, чем линии регрессии при «мягком» цикле нагружения.

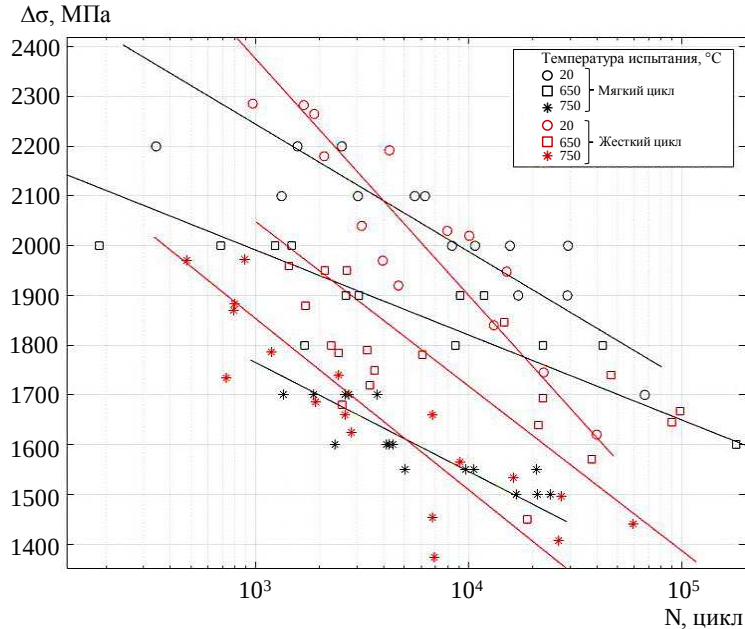


Рис. 4. Сопоставление напряжений при «жестком» и «мягком» циклах нагружения

Деформационные подходы, используемые для исследования усталости металлов, основываются на разделении амплитуды деформации на упругую (ε_{ae}) и пластическую (ε_{ap}) составляющие [18–21]:

$$\varepsilon_{ae} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (N_p)^b,$$

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f \cdot (N_p)^c. \quad (5)$$

Уравнение Басквина–Мэнсона–Коффина, связывающее амплитуду полной деформации и количество циклов до усталостного разрушения, имеет вид

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (N_p)^b + \varepsilon'_f (N_p)^c, \quad (6)$$

где ε_a – амплитуда полной деформации; N_p – количество циклов до усталостного разрушения; σ'_f – коэффициент усталостной прочности; ε'_f – коэффициент усталостной пластичности; b – экспонента усталостной прочности; c – экспонента усталостной пластичности; E – модуль упругости.

Это выражение справедливо для случая нагружения с коэффициентом асимметрии $R_\sigma = -1$. Существует ряд обобщений этого выражения на случай произвольного коэффициента асимметрии [22]. В данной работе используется выражение Смита–Уэстона–Топпера:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \left(N_p \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1}{2b}} \right)^b + \varepsilon'_f \left(N_p \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1}{2b}} \right)^c, \quad (7)$$

где R – коэффициент асимметрии.

Прогнозирование усталостных свойств используют для планирования испытаний – оценки уровней нагружения, соответствующих долговечностям, которые интересны для испытателей. В данной работе рассмотрены три широко применяемых метода определения коэффициентов уравнения (5) для прогнозирования деформационных кривых усталости: метод универсальных наклонов Мэнсона, модифицированный метод универсальных наклонов Муралидхарана–Мэнсона и метод четырехточечной корреляции Мэнсона [23, 24].

Способы определения коэффициентов уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина, предложенные в вышеперечисленных методах, представлены в табл. 3, где σ_B – предел прочности; ε_f – пластическая деформация при статическом разрушении; ψ – относительное сужение.

Таблица 3

Методы определения коэффициентов уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина

Название метода	Выражения для коэффициентов уравнения (7)
Метод универсальных наклонов Мэнсона [23]	$\sigma'_f = 1,9018\sigma_B; b = -0,12; c = -0,6;$ $\varepsilon'_f = 0,7579 \left[\ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right) \right]^{0,6}$
Модифицированный метод универсальных наклонов Муралидхарана–Мэнсона [24]	$\sigma'_f = 0,623E \left(\frac{\sigma_B}{E} \right)^{0,832}; b = -0,09; c = -0,56;$ $\varepsilon'_f = 0,019 \varepsilon_f^{0,155} \left(\frac{\sigma_B}{E} \right)^{-0,53}$
Метод четырехточечной корреляции Мэнсона [23]	$\sigma'_f = 1,25\sigma_f \cdot 2^b; \sigma_f \cong \sigma_B (1 + \varepsilon_f);$ $\varepsilon'_f = \frac{0,125}{20^c} \left[\ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right) \right]^{3/4};$ $b = \frac{\lg(0,36 \cdot \sigma_B / \sigma_f)}{5,6};$ $c = \frac{1}{3} \lg \frac{0,0066 - \sigma'_f (2 \cdot 10^4)^b / E}{0,239 \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right) \right\}^{3/4}}$

Спрогнозированные вышеперечисленными методами деформационные кривые построены для жаропрочного сплава ВЖ175. Характеристики, необходимые для построения прогнозируемых деформационных кривых усталости, получены при испытаниях на кратковременную прочность. Экспериментальные значения долговечностей, линии регрессии и спрогнозированные по результатам статических испытаний графики зависимостей долговечности от размаха деформации (априорные кривые) представлены на рис. 5.

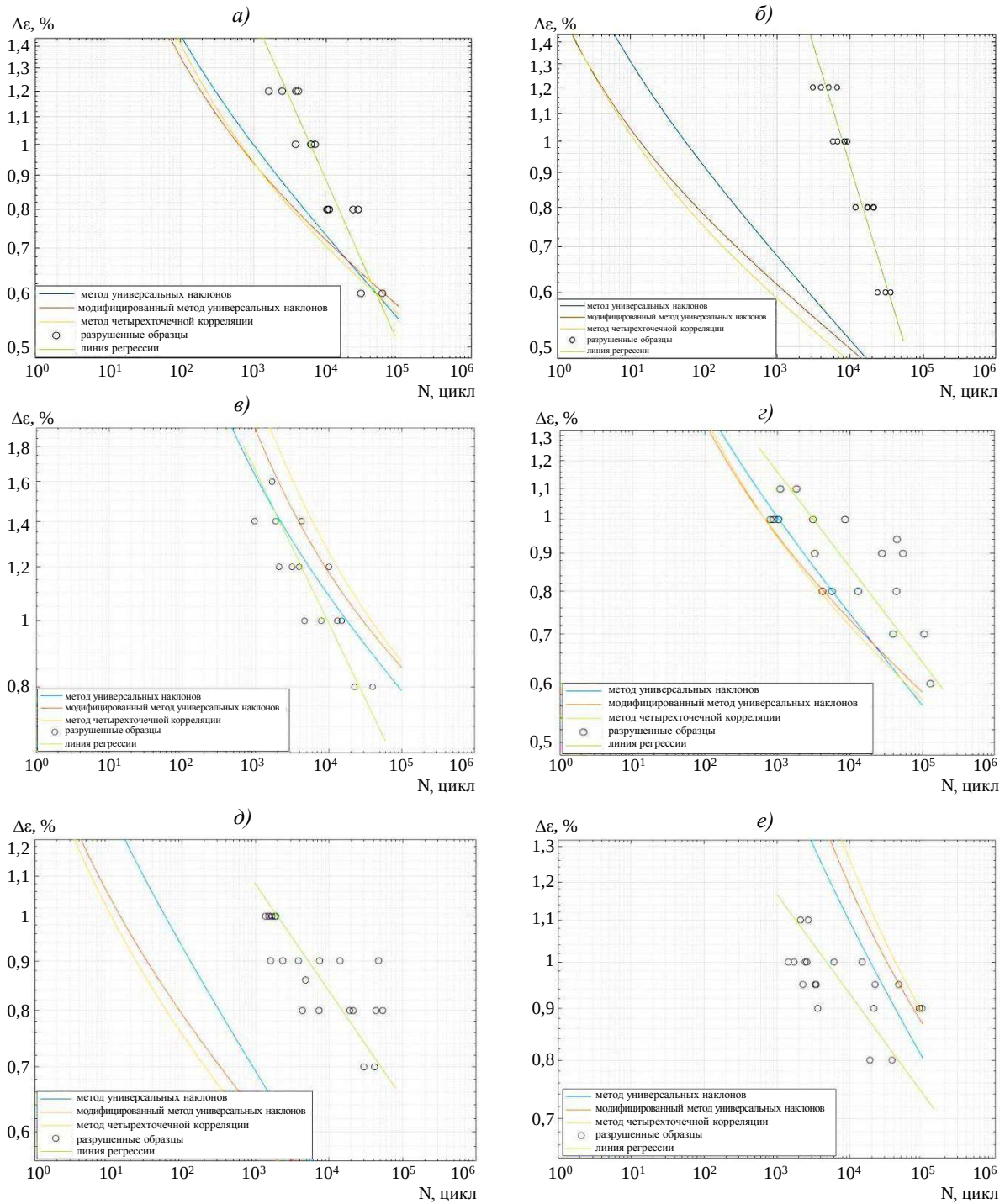


Рис. 5. Априорные кривые при температурах 20 (а-б) и 650 °С (г-е) и коэффициенте асимметрии R_e : 0 (а, г); 0,5 (б, д) и -1 (в, е)

При коэффициенте асимметрии $R_\epsilon = -1$ априорные деформационные кривые при комнатной и эксплуатационных температурах характеризуются завышенными значениями долговечности относительно экспериментальных значений. При коэффициентах асимметрии $R_\epsilon = 0$ и $R_\epsilon = 0,5$ при комнатной и эксплуатационных температурах априорные деформационные кривые характеризуются заниженными значениями долговечности относительно экспериментальных результатов, причем при $R_\epsilon = 0,5$ априорные кривые расположены значительно дальше от экспериментальных точек по оси долговечности, чем при коэффициентах $R_\epsilon = 0$ и $R_\epsilon = -1$. Для всех случаев метод универсальных наклонов характеризуется наиболее близкой к экспериментальным данным априорной деформационной кривой.

Таким образом, можно заключить, что:

- рассмотренные методы прогнозирования применимы для грубой консервативной оценки усталостных свойств сплава ВЖ175 при $R = 0$ и для грубой неконсервативной оценки усталостных свойств сплава ВЖ175 при $R = -1$, но неприменимы для оценки таких свойств при $R = 0,5$;

- из трех рассмотренных методов прогнозирования метод универсальных наклонов Мэнсона характеризуется наиболее близкими к экспериментальным значениям априорными кривыми.

Заключения

В результате анализа и сопоставления результатов испытаний на МЦУ сделаны следующие выводы.

Для испытаний при «жестком» цикле нагружения:

- для всех трех исследуемых коэффициентов асимметрии повышение температуры вызывает снижение предела выносливости на базе 10^4 циклов: на 3–5 % – при повышении температуры испытания с 20 до 650 °С и на 4–5 % – при повышении температуры испытания с 650 до 750 °С;

- для всех трех температур при сравнении размахов деформации $\Delta\epsilon$ наибольшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов характеризуется коэффициент асимметрии $R_\epsilon = -1$. Наименьшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов при комнатной температуре испытаний характеризуется коэффициент асимметрии $R_\epsilon = 0$, а для эксплуатационных температур – коэффициент асимметрии $R_\epsilon = 0,5$;

- пределы выносливости на базе 10^4 циклов для комнатной и эксплуатационных температур отличаются не более чем на 15 %, однако коэффициент наклона линии регрессии b при увеличении температуры до эксплуатационной возрастает в 2–3 раза. Это свидетельствует о том, что при рассмотрении больших баз разница значений пределов выносливости имеет тенденцию к увеличению. Приведенные графические зависимости подтверждают данное утверждение.

Для испытаний при «мягком» цикле нагружения:

- для всех трех исследуемых коэффициентов асимметрии повышение температуры вызывает снижение предела выносливости на базе 10^4 циклов: на 10–15 % – при повышении температуры испытания с 20 до 650 °С и на 15–20 % – при повышении температуры испытания с 650 до 750 °С;

- для всех трех температур при сравнении размахов напряжений $\Delta\sigma$ наибольшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов характеризуется коэффициент асимметрии $R_\sigma = -1$. При переходе к коэффициенту асимметрии $R_\sigma = 0$ предел выносливости снижается на ~30 %, а при переходе к $R_\sigma = 0,5$ – на 60 %;

– при всех трех исследуемых температурах коэффициент асимметрии $R_\sigma = 0,5$ характеризуется значительно бóльшим наклоном линии регрессии, чем другие коэффициенты асимметрии.

При сопоставлении результатов испытаний при «мягком» и «жестком» циклах нагружения:

– при комнатной и повышенных температурах предел выносливости на базе 10^4 циклов, определенный по линии регрессии при «мягком» цикле нагружения, больше на 2–6 %, чем предел выносливости, определенный при помощи регрессионного анализа медианных напряжений, возникающих при «жестком» цикле нагружения.

При анализе априорных кривых:

– рассмотренные методы прогнозирования применимы для грубой консервативной оценки усталостных свойств сплава ВЖ175 при $R = 0$ и для грубой неконсервативной оценки – при $R = -1$, но неприменимы при $R = 0,5$;

– из трех рассмотренных методов прогнозирования метод универсальных наклонов Мэнсона характеризуется наиболее близкими к экспериментальным значениям априорными кривыми.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В. Новый монокристаллический интерметаллидный жаропрочный сплав на основе γ' -фазы для лопаток ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 34–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.
3. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103.
4. Оспенникова О.Г. Тенденции создания жаропрочных никелевых сплавов низкой плотности с поликристаллической и монокристаллической структурой (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 1 (40). С. 3–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-3-19.
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. № 3. С. 47–54.
7. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Черкасова С.А., Волков М.Е. Малоцикловая усталость монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // *Деформация и разрушение материалов*. 2009. № 8. С. 41–48.
8. Горбовец М.А., Базылева О.А., Беляев М.С., Ходинев И.А. Малоцикловая усталость монокристаллического интерметаллидного сплава типа ВКНА в условиях «жесткого» нагружения // *Металлург*. 2014. № 8. С. 111–114.
9. Ходинев И.А., Монин С.А. Анизотропия характеристик малоцикловой усталости монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Труды ВИАМ*. 2020. № 10 (92). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-97-105.
10. Zhong Z., Gu Y., Yuan Y. et al. On the low cycle fatigue behaviour of a Ni-based superalloy containing high Co and Ti contents // *Materials Science and Engineering*. 2012. Vol. A552. P. 434–443.

11. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 52–57.
12. Беляев М.С., Горбовец М.А., Бакрадзе М.М. Изменение параметров упругопластического деформирования в процессе испытаний на МЦУ при жестком нагружении жаропрочного сплава ВЖ175 // *Труды ВИАМ*. 2015. № 12. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-4-4.
13. Ломберг Б.С., Шестакова А.А., Летников М.Н., Бакрадзе М.М. Влияние температуры и напряжений на характер наночастиц γ' -фазы в сплаве ВЖ175-ИД // *Труды ВИАМ*. 2019. № 12 (84). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-3-10.
14. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Изд-во стандартов, 1986. 34 с.
15. ASTM E606/ E606M-19. Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. American Society for Testing and Materials. 2018. 16 p.
16. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Рыжков П.В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // *Труды ВИАМ*. 2018. № 9 (69). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
17. Рекомендательный циркуляр РЦ-АП-33.15-1. Методические рекомендации по определению расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов. М.: Авиаиздат, 2013. С. 32–33.
18. Трошенко В.Т., Хамаза Л.А. Деформационные кривые усталости сталей и методы определения их параметров. Сообщение 1. Традиционные методы // *Проблемы прочности*. 2010. № 6. С. 26–43.
19. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 2. Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. Методики испытаний и обработки результатов // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.05.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
20. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
21. Radhakrishnan V.M. On bilinearity of the Coffin–Manson low-cycle fatigue relationship // *International Journal of Fatigue*. 1992. Vol. 14. No. 5. P. 305–311.
22. Norman E. Dowling. Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-Life Fatigue // *Fatigue & Fracture of Engineering*. 2009. No. 32 (3). P. 163–179.
23. Manson S.S. Fatigue: a Complex Subject – Some Simple Approximations // *Experimental Mechanics – Journal of the Society for Experimental Stress Analysis*. 1965. No. 5 (7). P. 193–226.
24. Muralidharan U., Manson S.S. Modified Universal Slopes Equation for Estimation of Fatigue characteristics // *Journal of Engineering Materials and Technology – Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. 1988. No. 110. P. 55–58.

Reference

1. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Petrushin N.V., Visik E.M. Single-crystal nickel-based superalloy of a new generation with low-density. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
2. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Petrushin N.V. New single crystal heat-resistant intermetallic γ' -based alloy for GTE blades. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 34–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.

3. Petrushin N.V., Ospennikova O.G., Svetlov I.L. Single-crystal Ni-based superalloys for turbine blades of advanced gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103.
4. Ospennikova O.G. Tendencies of development of heat-resistant nickel alloys of low density with polycrystalline and single-crystal structures (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 1 (40), pp. 3–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-3-19.
5. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S., Sidorov V.V. Priority directions of development of technologies for the production of heat-resistant materials for aircraft engine building. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2013, no. 3, pp. 47–54.
7. Golubovsky E.R., Svetlov I.L., Petrushin N.V., Cherkasova S.A., Volkov M.E. Low-cycle fatigue of single crystals of heat-resistant nickel alloys at elevated temperatures. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2009, no. 8, pp. 41–48.
8. Gorbovets M.A., Bazyleva O.A., Belyaev M.S., Khodinev I.A. Low-cycle fatigue of a single-crystal intermetallic alloy of the VKNA type under conditions of "hard" loading. *Metallurg*, 2014, no. 8, pp. 111–114.
9. Hodinev I.A., Monin S.A. Anisotropy of low cycle fatigue characteristics of single-crystal heat-resistant nickel alloys. *Trudy VIAM*, 2020, no. 10 (92), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 1, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-97-105.
10. Zhong Z., Gu Y., Yuan Y. et al. On the low cycle fatigue behaviour of a Ni-based superalloy containing high Co and Ti contents. *Materials Science and Engineering*, 2012, vol. A552, pp. 434–443.
11. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. High-temperature heat resisting nickel alloys for details of gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 52–57.
12. Belyayev M.S., Gorbovets M.A., Bakradze M.M. Change of parameters of elasto-plastic deformation for LCF testing Ni-base superalloy VZh175. *Trudy VIAM*, 2015, no. 12, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 1, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-4-4.
13. Lomberg B.S., Shestakova A.A., Letnikov M.N., Bakradze M.M. The influence of temperature and stresses on nature of nanosize γ' -phase in Ni-base superalloy VZh175-ID. *Trudy VIAM*, 2019, no. 12 (84), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 1, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-3-10.
14. State Standart 25.502–79. Calculations and tests for strength in mechanical engineering. Methods for mechanical testing of metals. Fatigue test methods. Moscow: Publishing house of Standards, 1986, 34 p.
15. ASTM E606/ E606M-19. Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. American Society for Testing and Materials, 2018, 16 p.
16. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Ryzhkov P.V. Equipment for testing carrying out the strain-controlled low-cycle fatigue. *Trudy VIAM*, 2018, no. 9 (69), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 01, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
17. Recommended circular RC-AP-33.15-1. Guidelines for determining the design values of the characteristics of the structural strength of metallic materials. Moscow: Aviaizdat, 2013. S. 32–33.
18. Troshchenko V.T., Khamaza L.A. Deformation curves of fatigue of steels and methods for determining their parameters. Communication 1. Traditional methods. *Problemy prochnosti*, 2010, no. 6, pp. 26–43.
19. Erasov V.S., Oreshko E.I. Tests for fatigue of metal materials (review). Part 2. Analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation. Methods of testing and processing of results. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 15, 2021). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-1-80-94.

20. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
21. Radhakrishnan V.M. On bilinearity of the Coffin–Manson low-cycle fatigue relationship. *International Journal of Fatigue*, 1992, vol. 14, no. 5, pp. 305–311.
22. Norman E. Dowling. Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-Life Fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering*, 2009, no. 32 (3), pp. 163–179.
23. Manson S.S. Fatigue: a Complex Subject – Some Simple Approximations. *Experimental Mechanics – Journal of the Society for Experimental Stress Analysis*, 1965, no. 5 (7), pp. 193–226.
24. Muralidharan U., Manson S.S. Modified Universal Slopes Equation for Estimation of Fatigue characteristics. *Journal of Engineering Materials and Technology – Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1988, no. 110, pp. 55–58.

Информация об авторах

Ходинев Иван Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Горбовец Михаил Александрович, заместитель начальника Испытательного центра, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Монин Сергей Алексеевич, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Рыжков Петр Валерьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ivan A. Hodinev, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mikhail A. Gorbovets, Deputy Head of Testing Center, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Monin, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Petr V. Ryzhkov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 05.08.2021; одобрена после рецензирования 25.08.2021; принята к публикации 25.08.2021.

The article was submitted 05.08.2021; approved after reviewing 25.08.2021; accepted for publication 25.08.2021.

Научная статья

УДК 620.17

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-111-122

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАТИВНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВБЛИЗИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

П.В. Шершак¹, Н.О. Яковлев¹, Е.И. Орешко¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Результаты проведенных расчетов и полученные экспериментальные данные показывают необходимость учета распределения полей деформации на образцах с концентраторами напряжений для подбора корректных баз оптических датчиков деформации. Возможность устанавливать определенные базы оптических датчиков при конкретных геометрических параметрах образца позволяет получать значения жесткостных и деформационных характеристик на образце с отверстиями, близкие к значениям характеристик материала, что может быть использовано, например, при проведении исследовательских работ в условиях ограниченности материалов.

Ключевые слова: углепластик, оптический датчик деформации, бесконтактный датчик деформации, видеоэкстензометр, деформация, база датчика, метка

Для цитирования: Шершак П.В., Яковлев Н.О., Орешко Е.И. применение оптических датчиков деформации для оценки деформативности образцов из полимерных композиционных материалов вблизи концентраторов напряжений // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-111-122.

Scientific article

APPLICATION OF OPTICAL DEFORMATION SENSORS FOR ESTIMATING THE DEFORMATIVITY OF CFRP SAMPLES NEAR THE STRESS CONCENTRATORS

P.V. Shershak¹, Nikolay O. Yakovlev¹, Evgeny I. Oreshko¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: The results of the calculations and the obtained experimental data show the need to take into account the distribution of strain fields on samples with stress concentrators for the selection of the correct gage of optical strain gauges. The ability to install certain gage of optical sensors with specific geometric parameters of the sample allows one to obtain the values of the stiffness and deformation characteristics on the sample with holes close to the values of the material characteristics, which can be used, for example, when carrying out research work in conditions of limited materials.

Keywords: CFRP, optical strain gauge, non-contact strain gauge, video extensometer, strain, gauge base, mark

For citation: Shershak P.V., Yakovlev N.O., Oreshko E.I. Application of optical deformation sensors for estimating the deformativity of CFRP samples near the stress concentrators. Trudy VIAM, 2022, no. 1 (107), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-111-122.

Введение

Испытания и исследования образцов материала с целью установления его свойств (в частности, физико-механических) – один из главных этапов при проведении

квалификации материала. При этом необходимым условием является получение достоверных данных о свойствах материала [1–4].

В настоящее время существует большое разнообразие средств измерений, позволяющих с высокой точностью определять измеряемые в процессе испытаний величины. Так, для определения упругих характеристик материалов используют датчики деформации, основными видами которых являются: тензорезисторы; навесные экстензометры, закрепляемые на образце; встроенные в испытательные машины датчики деформации с изменяемой базой (расчетной длиной); оптические (бесконтактные) экстензометры [5–9].

Каждый из приведенных датчиков деформации обладает определенными достоинствами и недостатками в зависимости от его назначения.

В последнее время наибольший интерес представляют оптические датчики деформации: лазерные экстензометры, видеоэкстензометры, системы корреляции цифровых изображений и пр. Принцип работы оптических датчиков заключается в том, что они «следят» за перемещением меток, нанесенных на образец (у некоторых моделей датчиков метки ставятся виртуально на видеоизображении образца), и по изменению расстояния между метками в процессе нагружения образца получают данные о его деформации.

Данные датчики имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими типами датчиков. Например, оптические датчики не требуется закреплять на самом образце, они могут проводить измерения вплоть до разрушения образца, в том числе снимать данные с образца, находящегося в термо- или криокамерах (через смотровое стекло) и пр. Для некоторых видов оптических датчиков, которые не требуют установки физических меток на образце, неочевидным преимуществом является возможность записи видеоизображений, с которыми можно работать впоследствии – после разрушения образца, т. е. по сути, провести испытание образца еще раз и, например, измерить его деформацию между другими точками.

Имея возможность гибко изменять расположение точек (меток), между которыми измеряется деформация на образце (базу датчика), можно индивидуально подходить к измерению деформаций нестандартных или конструктивно-подобных образцов.

Данная работа посвящена выбору корректного расстояния между метками оптических датчиков деформации и, как следствие, подбору геометрических размеров образца для получения объективных данных о жесткостных и деформационных характеристиках образцов с концентраторами напряжений в виде отверстий.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [3].

Материалы и методы

Проведенное в работе исследование основывается на анализе моделей образцов методом конечных элементов и сопоставлении результатов расчетов с данными, полученными в ходе серии экспериментов.

Объектами исследования являлись плоские образцы с центральным отверстием из углепластика на основе однонаправленного препрега со схемой укладки слоев армирующего наполнителя $[0/90]_{2s}$ с габаритными размерами образцов 200×36 мм и толщиной 1 мм.

В данной работе рассматриваются образцы двух типов, различающиеся диаметром отверстия: 8 и 16 мм, а также образец без отверстия.

Модели рассматриваемых образцов, применяемые при анализе методом конечных элементов, приведены на рис. 1.

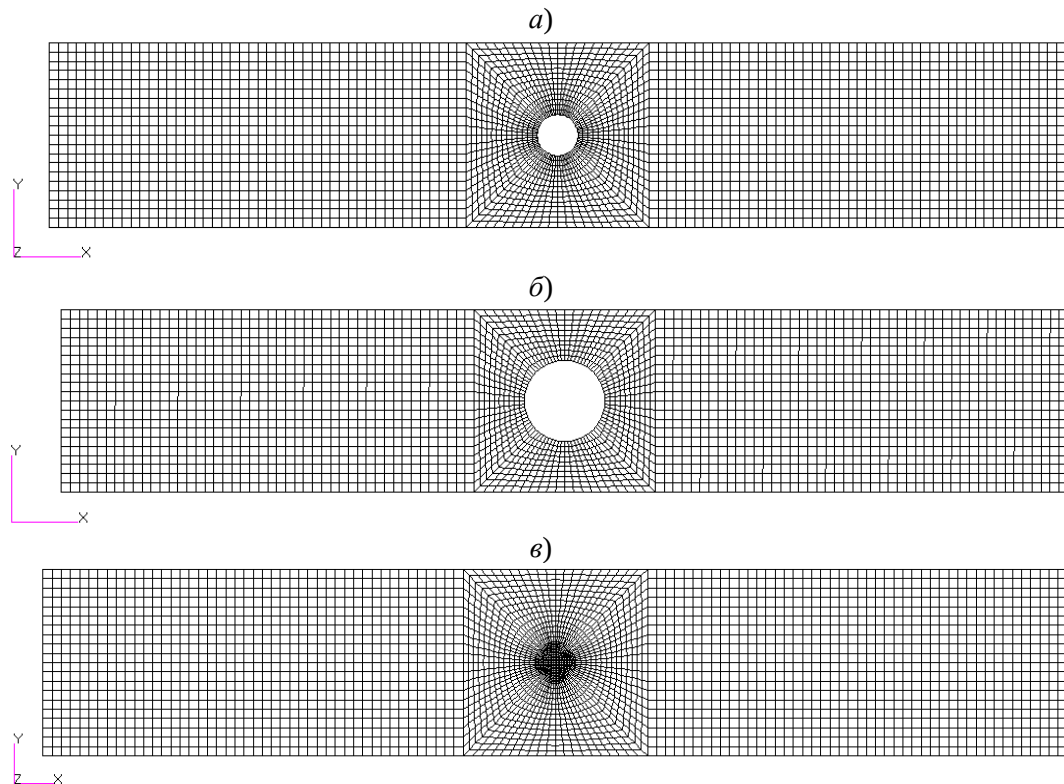


Рис. 1. Модели исследуемых образцов с диаметром отверстия 8 (а), 16 мм (б) и без отверстия (в), применяемые при анализе методом конечных элементов

Приведены конечно-элементные модели образцов на основании четырехузловых оболочечных элементов Quad4, размер конечного элемента в регулярной зоне всех образцов составляет $1,8 \times 1,8$ мм.

Расчетная схема для всех типов образцов принята идентичной и показана на рис. 2 на примере сплошного образца.

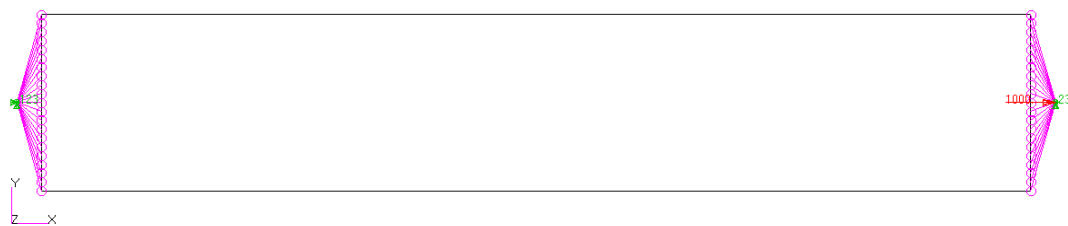


Рис. 2. Расчетная схема образцов

При помощи элементов жесткой связи RBE2 моделируются:

- запрет перемещений по всем поступательным степеням свободы на одной из коротких сторон образца (на рис. 2 – слева);
- запрет поступательных перемещений в плоскости YZ с действующим внешним растягивающим усилием по направлению оси X (в данном исследовании к образцам прикладывалась сила, заведомо не превышающая усилие разрушения образцов при испытании, – равная 1000 Н) для противоположной короткой стороны образца (на рис. 2 – справа).

Значения физико-механических характеристик углепластика, использованные в расчетах и при проведении экспериментов, следующие:

Модуль упругости при растяжении в направлении оси армирования, ГПа	148
Модуль упругости при растяжении в направлении, перпендикулярном оси армирования, ГПа	8
Модуль сдвига в плоскости армирования, ГПа	4,5
Коэффициент Пуассона в плоскости армирования	0,35
Предел прочности при растяжении в направлении оси армирования, МПа	2375
Предел прочности при сжатии в направлении оси армирования, МПа	1465
Предел прочности при растяжении в направлении, перпендикулярном оси армирования, МПа	95
Предел прочности при сжатии в направлении, перпендикулярном оси армирования, МПа	220
Предел прочности при сдвиге в плоскости армирования, МПа	95

Толщина элементарного слоя композиционного материала принималась равной 0,125 мм исходя из толщины монослоя отформованного материала.

Результаты и обсуждение

На основании принятых физико-механических характеристик углепластика расчетным путем с учетом общепринятых критериев разрушения композиционных материалов [10, 11] и методик численного анализа механики их разрушения [12] определены упругие характеристики углепластика с укладкой армирующего наполнителя $[0/90]_{2s}$:

- модуль упругости углепластика в направлении оси армирования $E_x = 63,9$ ГПа;
- модуль упругости углепластика в направлении, перпендикулярном оси армирования $E_y = 63,9$ ГПа;
- модуль сдвига углепластика в плоскости армирования $G_{xy} = 4,2$ ГПа;
- коэффициент Пуассона при растяжении в плоскости армирования $\mu_{xy} = 0,0441$.

Для сплошного образца (в случае отсутствия центрального круглого отверстия) при испытании на растяжение должна быть получена соответствующая характеристика жесткости. Проведенный конечно-элементный анализ сплошного образца это подтверждает. Эпюра перемещений сплошного образца при действии растягивающего продольного усилия, равного 1000 Н, показана на рис. 3.

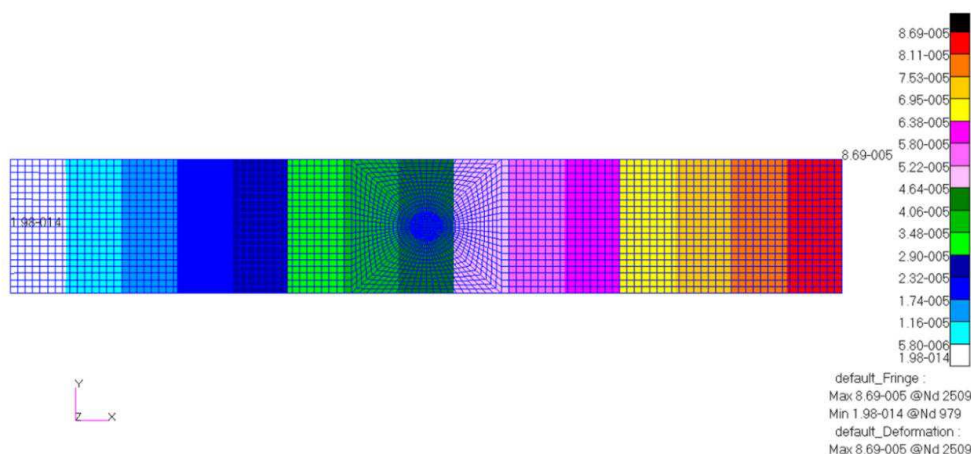


Рис. 3. Эпюра перемещений сплошного образца (данные приведены в м)

Расчетное значение максимального продольного перемещения образца равно $8,69 \cdot 10^{-5}$ м, что при длине образца, равной 0,2 м, соответствует деформации:

$$\varepsilon_x = \Delta l / l = 8,69 \cdot 10^{-5} / 0,2 = 4,34 \cdot 10^{-4}.$$

Эпюра деформаций сплошного образца имеет равномерно распределенный характер из-за отсутствия концентраторов в виде отверстий за исключением локальных всплесков в зоне закрепления, не превышающих значение деформации в регулярной зоне более чем на 2 % (максимальное значение продольной деформации в углу образца равно $4,41 \cdot 10^{-4}$). Значение продольной деформации в регулярной зоне образца составляет $4,34 \cdot 10^{-4}$.

Модуль упругости сплошного образца, характеризующий его способность сопротивлению действия силы, равен:

$$E_x = \sigma_x / \varepsilon_x = 64 \text{ ГПа},$$

что соответствует полученному ранее точному значению жесткости пакета слоев с данной укладкой ($E_x = 63,9 \text{ ГПа}$).

Очевидно, что, из-за равномерного характера распределения деформаций в сплошном образце (без отверстий), для определения его упругих характеристик база видеоэкстензометра (расстояние между устанавливаемыми на образце метками оптического экстензометра) не является принципиальной. Важно лишь строгое соответствие направления приложения нагрузки с направлением измерения деформаций.

В случае испытания образцов с концентраторами напряжений (деформаций), например в виде отверстий, для получения достоверных результатов об их жесткостных характеристиках необходимо правильно выбирать базу видеоэкстензометра.

На рис. 4 приведены эпюры перемещений при действии растягивающего продольного усилия, равного 1000 Н, полученные для образцов с отверстием диаметром 8 и 16 мм.

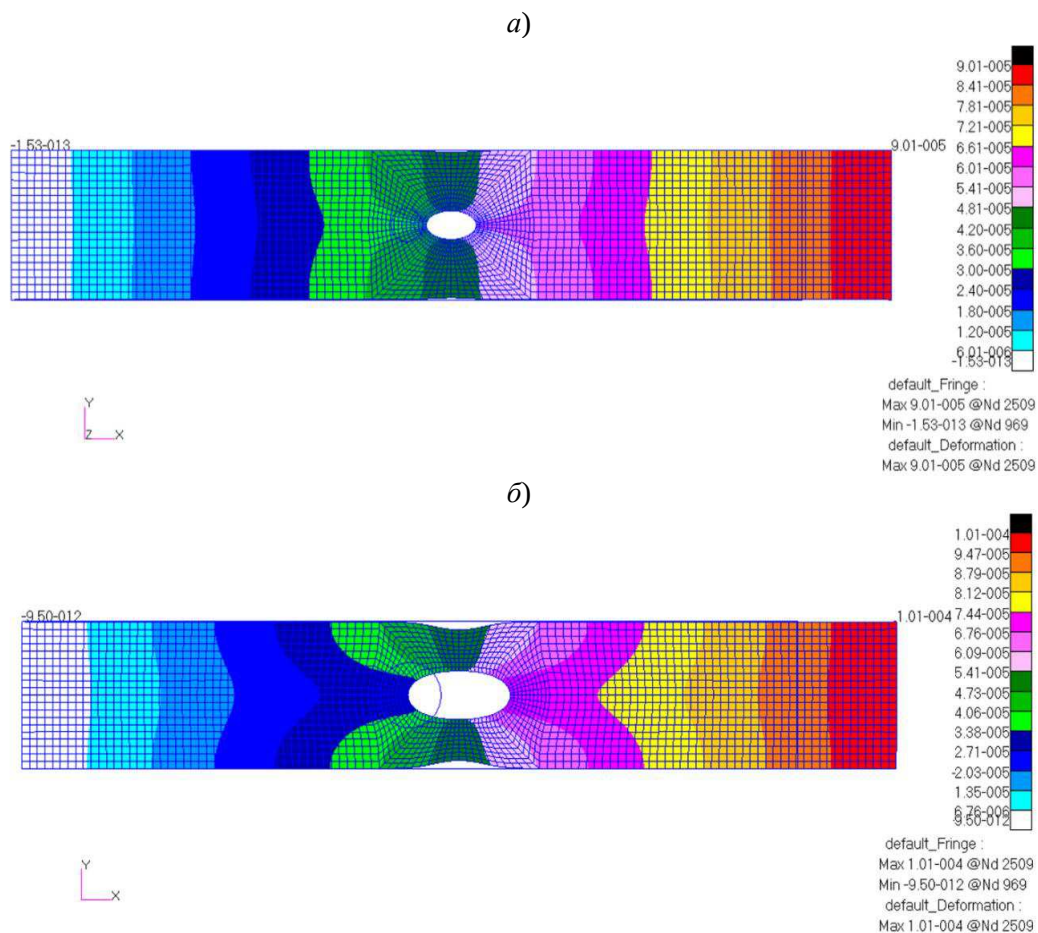


Рис. 4. Эпюры перемещений образцов с диаметром отверстия 8 (a) и 16 мм (б)
(данные приведены в м)

Расчетные значения максимального продольного перемещения образцов с диаметрами отверстия 8 и 16 мм равны $9,01 \cdot 10^{-5}$ и $1,01 \cdot 10^{-4}$ м соответственно.

При длине образцов, равной 0,2 м, соответствующие деформации будут следующими:

- для образца с диаметром отверстия 8 мм
 $\varepsilon_x = \Delta l / l = 9,01 \cdot 10^{-5} / 0,2 = 4,5 \cdot 10^{-4}$;
- для образца с диаметром отверстия 16 мм:
 $\varepsilon_x = \Delta l / l = 1,01 \cdot 10^{-4} / 0,2 = 5,05 \cdot 10^{-4}$.

Жесткость образцов с отверстиями, выражаемая в данной работе через тангенциальный модуль упругости E_t (тангенс угла наклона касательной к линейному участку кривой на диаграмме «напряжение–деформация» образцов с отверстием), характеризующий их способность сопротивлению действию силы, составляет:

- для образца с диаметром отверстия 8 мм
 $E_{tx} = \sigma_x / \varepsilon_x = 61,7$ ГПа;
- для образца с диаметром отверстия 16 мм
 $E_{tx} = \sigma_x / \varepsilon_x = 55$ ГПа.

Эпюры деформаций образцов с диаметром отверстия 8 и 16 мм при действии растягивающего продольного усилия, равного 1000 Н, показаны на рис. 5.

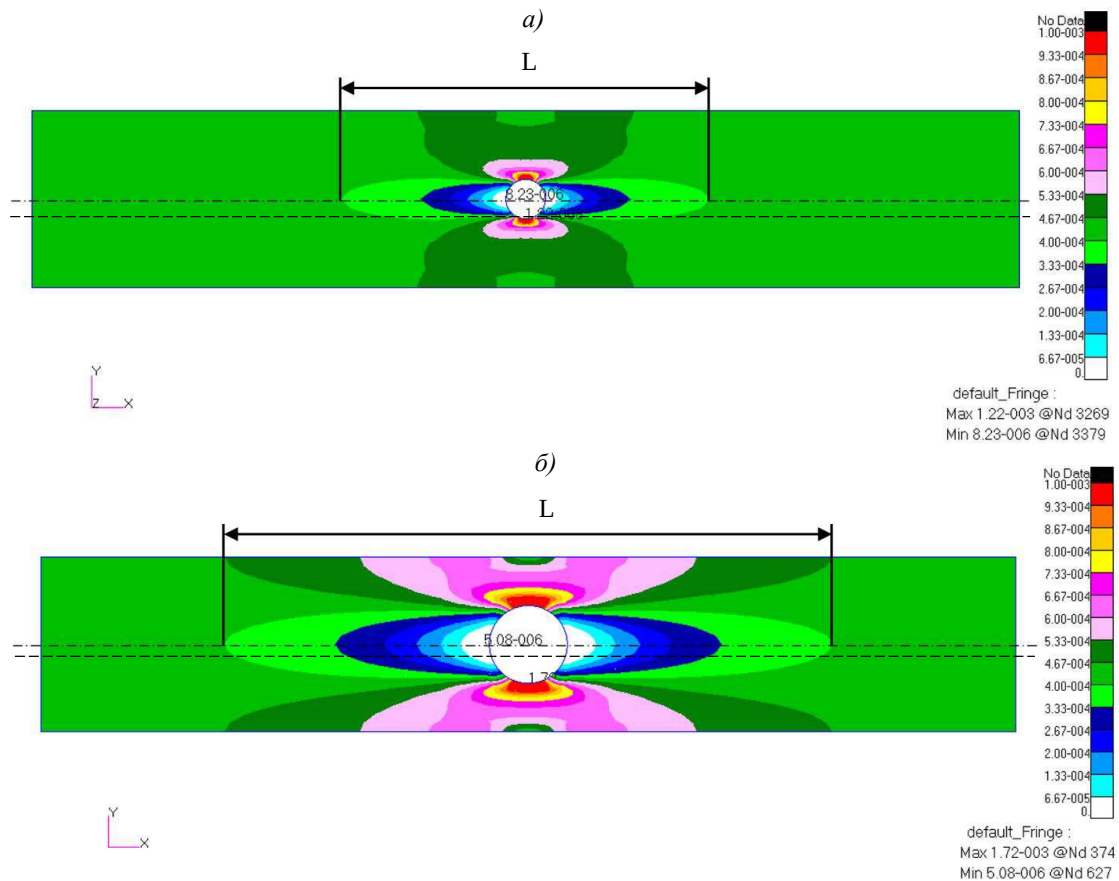


Рис. 5. Эпюры деформаций образцов с диаметром отверстия 8 (а) и 16 мм (б)

Эпюры деформаций образцов с отверстиями имеют ярко выраженную концентрацию вокруг отверстий с различной длиной «затухания» (расстояние L):

- для образца с диаметром отверстия 8 мм – $L = 75$ мм;
- для образца с диаметром отверстия 16 мм – $L = 125$ мм.

Максимальные и минимальные значения продольных деформаций в зоне концентратора образца отличаются от значения деформаций в регулярной зоне образца более чем в 2 раза (в зоне, расположенной максимально близко к отверстию, значения продольных деформаций снижаются в 10 раз по отношению к деформациям в регулярной зоне).

Следует отметить, что деформации образцов с отверстиями разного диаметра, взятые на одинаковых расстояниях от центра отверстия (полученные на одинаковой базе видеоекстензометра), также могут отличаться друг от друга в несколько раз.

Для наглядной демонстрации данного положения повторим процедуру определения деформаций в образцах с помощью «виртуального видеоекстензометра» с базой 30 мм. На рис. 6 показаны места установки меток «виртуального видеоекстензометра» на конечно-элементных моделях образцов с диаметром отверстия 8 и 16 мм.

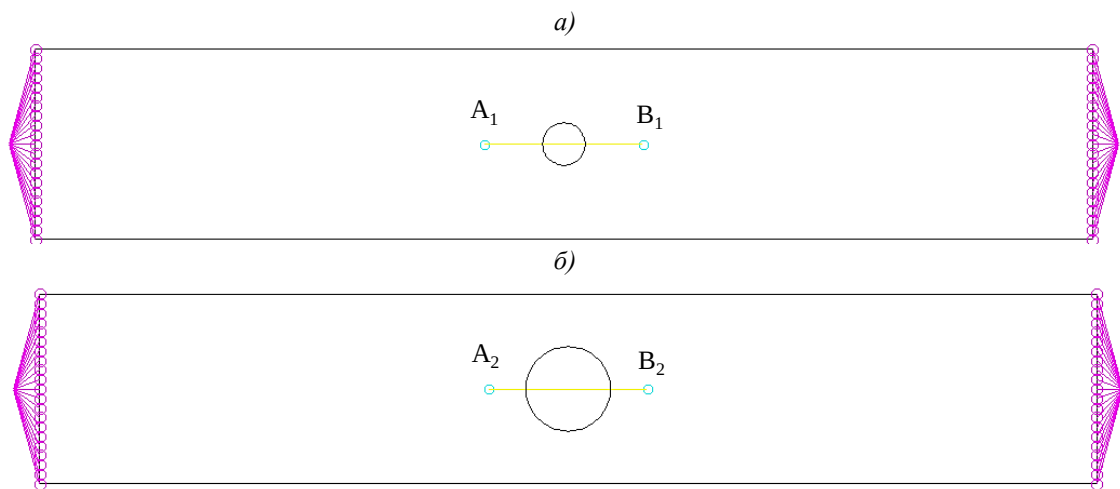


Рис. 6. Места расположения меток «виртуального видеоекстензометра» на конечно-элементных моделях образцов с отверстиями диаметром 8 (а) и 16 мм (б)

Значения продольных перемещений точек A_1 , B_1 , A_2 и B_2 , полученные в результате расчета при действии растягивающего продольного усилия, равного 1000 Н, следующие:

- в точке A_1 – $\Delta l_1 = 3,433 \cdot 10^{-5}$ мм;
- в точке B_1 – $\Delta l_2 = 5,577 \cdot 10^{-5}$ мм;
- в точке A_2 – $\Delta l_3 = 2,972 \cdot 10^{-5}$ мм;
- в точке B_2 – $\Delta l_4 = 7,172 \cdot 10^{-5}$ мм.

Определяем значение деформации образцов, исходя из разности полученных показаний перемещений меток «виртуального видеоекстензометра» (удлинения), отнесенной к базе (30 мм):

- для образца с диаметром отверстия 8 мм

$$\varepsilon_x = (\Delta l_2 - \Delta l_1)/l = (5,577 \cdot 10^{-5} - 3,433 \cdot 10^{-5})/0,03 = 7,146 \cdot 10^{-4};$$
- для образца с диаметром отверстия 16 мм

$$\varepsilon_x = (\Delta l_4 - \Delta l_3)/l = (7,172 \cdot 10^{-5} - 2,972 \cdot 10^{-5})/0,03 = 14 \cdot 10^{-4}.$$

Жесткость образцов с отверстиями (тангенциальный модуль E_t), определенная на основании показателей деформации «виртуальных видеоекстензометров», будет равна:

- для образца с диаметром отверстия 8 мм:

$$E_{tx} = \sigma_x/\varepsilon_x = 38,8 \text{ ГПа};$$

– для образца с диаметром отверстия 16 мм:

$$E_{tx} = \sigma_x / \varepsilon_x = 19,8 \text{ ГПа.}$$

Экспериментальные испытания проведены на образцах с отверстиями диаметрами 8 и 16 мм, вырезанных из плит, полученных методом прямого прессования из того же материала и с той же укладкой, используемых в расчетах ранее и при базе видеоэкстензометра 30 мм. Полученные результаты приведены в таблице.

Результаты испытаний образцов из углепластика с отверстиями

Условный номер образца	Разрушающая нагрузка, Н	Прочность при разрушении (нетто)*, МПа	Жесткость образцов (тангенциальный модуль E_0), ГПа
Образцы с диаметром отверстия 8 мм			
1	12771	466	41,6
2	13958	510	41,8
3	15149	562	39,0
4	14740	550	38,8
5	15222	563	41,6
Среднее значение	14368	530	40,6
Образцы с диаметром отверстия 16 мм			
6	10963	560	21,5
7	10109	532	19,2
8	12518	649	21,4
9	11324	593	21,5
10	11612	604	21,5
Среднее значение	11305	587	21,0

*С учетом отверстия.

Полученные при расчете значения тангенциального модуля хорошо соотносятся с экспериментальными данными, полученными с применением видеоэкстензометра.

Дополнительно проведено сравнение показателей деформаций видеоэкстензометра при испытании образца с диаметром отверстия 16 мм с расчетом на различных базах и местах расположения меток на образце. Расположение меток видеоэкстензометра на реальном образце показано на рис. 7.

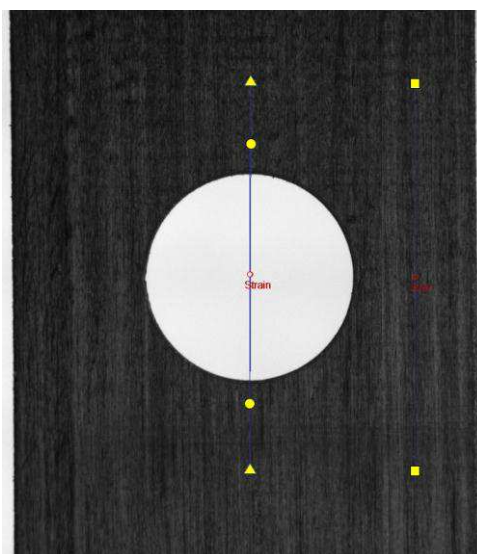


Рис. 7. Расположение меток видеоэкстензометра при испытании образца с диаметром отверстия 16 мм

Базы видеоэкстензометра № 1 (между треугольными метками на рис. 7) и № 2 (между круглыми метками на рис. 7) установлены по центру образца в направлении действия силы, расстояние между одинаковыми метками 30 и 20 мм соответственно. База видеоэкстензометра № 3 (между квадратными метками на рис. 7) установлена на равноудаленном расстоянии между краем образца и кромкой отверстия, расстояние между метками 30 мм. На рис. 8 приведены сравнительные диаграммы «нагрузка–деформация», полученные при проведении испытаний и по результатам конечно-элементного расчета; номера кривых соответствуют принятым номерам баз видеоэкстензометров, буквами «р» и «э» обозначены кривые, полученные соответственно расчетным методом и в результате эксперимента.

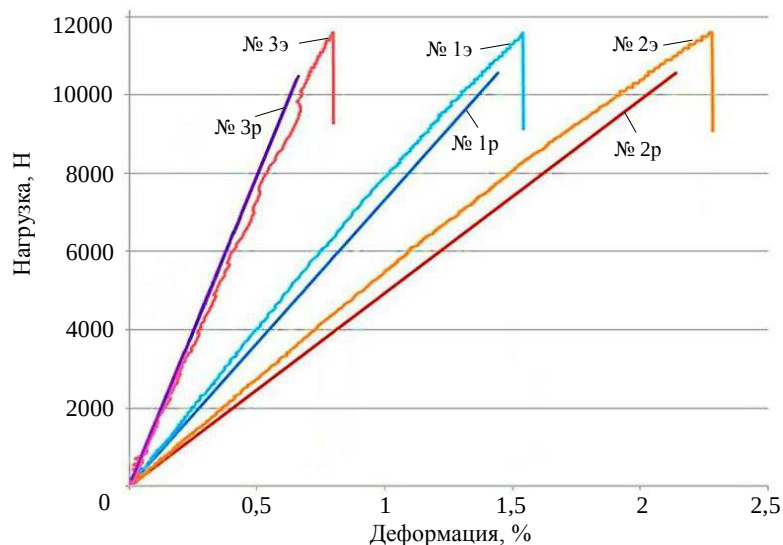


Рис. 8. Диаграммы «нагрузка–деформация», полученные расчетным методом (обозначены буквой «р») и с использованием видеоэкстензометров (обозначены буквой «э»)

Небольшое отличие в углах наклонов графиков объясняется использованием на стадии конечно-элементного анализа технической информации о физико-механических характеристиках материала, которые отличаются от реальных ввиду различий партий материала и особенностей технологий его переработки. Высокая сходимость полученных результатов и их характер наглядно демонстрируют корректность проведенных расчетов и, как следствие, влияние на измеряемую деформацию образцов с отверстиями расстояния между метками видеоэкстензометра и их расположения на образце.

Заключения

Результаты проведенного эксперимента подтверждают полученные при расчете данные. Следует сделать вывод, что при измерении деформационных характеристик образцов с концентраторами напряжений необходимо учитывать распределение полей деформации на таких образцах для корректного подбора их длины и обеспечения необходимой базы датчиков деформации. Кроме того, расчеты и результаты эксперимента показывают, что при определенных базах датчиков деформации и геометрических параметрах образца на образцах с отверстиями возможно получить значения характеристик, близких к значениям упругих характеристик материала образцов. Следует отметить, что использованные в данной работе базы датчиков деформации (расстояние между метками L) могут применяться только для материала с приведенными характеристиками и использованной геометрической формой образцов. Для других материалов

и геометрических размеров образцов и отверстий необходимо определять базы датчиков деформации отдельно.

Использование подобного подхода получения деформационных характеристик образцов с отверстиями на первый взгляд представляется затруднительным или нереализуемым, поскольку требуется каждый раз проводить расчеты и иметь в наличии данные о физико-механических характеристиках материала, не всегда доступные в полном объеме. Однако следует учитывать, что в настоящее время существуют современные оптические системы измерения деформации, такие как система корреляции цифровых изображений [13–15], которые снимают распределения полей деформации на поверхности образца прямо в процессе его испытания, что позволяет существенно сократить, а в некоторых случаях полностью исключить проведение расчетов с целью выбора корректной базы измерения деформации.

Таким образом, использование современных оптических систем измерения деформации при проведении физико-механических испытаний позволяет получать значения характеристик образцов с отверстиями, близкие к значениям упругих характеристик материала образцов, что может быть использовано, например, при проведении исследовательских работ в условиях ограниченности материалов путем «объединения» испытаний элементарных образцов и образцов с отверстиями.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
2. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 3. С. 28–34.
5. Афанасьев А.В., Рабинский Л.Н., Шершак П.В. Экспериментальное определение деформационных и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16. № 2. С. 214–222.
6. Ерасов В.С. Современные методы оценки физико-механических свойств материалов // Сборник докладов Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2012». М.: ВИАМ, 2012. С. 13.
7. Луценко А.Н., Одинцев И.Н., Гриневич А.В., Северов П.Б., Плугатарь Т.П. Исследование процесса деформации материала оптико-корреляционными методами // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S4. С. 70–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86.
8. Никитин А.В., Крылов В.Д., Ханжин В.Г. Аппаратура и методика наблюдения в реальном времени деформационной неустойчивости при растяжении тонкой алюминиевой фольги // Вестник Тамбовского университета. 2013. Т. 18. № 4-2. С. 1871–1872.
9. Панин С.В., Бурков М.В., Любутин П.С., Алтухов Ю.А., Еремин А.В., Хижняк С.А. Применение датчика деформации интегрального типа при циклических испытаниях композиционного материала на основе углеродных волокон // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. №12-2. С. 186–191.
10. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Гриневич Д.В., Шершак П.В. Обзор критериев прочности материалов // Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126.

11. Гриневи́ч Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
12. Косаре́в В.А., Азиков Н.С., Алипов А.Е. Методика решения физически нелинейных задач прочности конструкции с концентраторами напряжений // Авиационная промышленность. 2014. № 2. С. 26–31.
13. Третьякова Т.В., Спаскова Е.М. Экспериментальное исследование предельных напряженно-деформированных состояний квазихрупкого материала с использованием метода корреляции цифровых изображений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер.: Механика. 2013. № 2. С. 186–198.
14. Ильичев А.В., Раскутин А.Е. Исследование влияния концентратора напряжений на напряженно-деформационное состояние углепластика методом корреляции цифровых изображений // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3 (32). С. 62–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-62-66.
15. Ильичев А.В., Губин А.М., Акмеев А.Р., Иванов Н.В. Определение области максимальных сдвиговых деформаций для образцов углепластика по методу Иосипеску, с использованием оптической системы измерений // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-99-109.

Reference

1. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intelлект i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
2. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
3. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Kablov E.N., Podzhivotov N.Yu., Lutsenko A.N. On the need to create a unified information and analytical center for aviation materials of the Russian Federation. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2019, no. 3, pp. 28–34.
5. Afanasyev A.V., Rabinsky L.N., Shershak P.V. Experimental determination of deformation and strength characteristics of polymer composite materials. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 214–222.
6. Erasov V.S. Modern methods for assessing the physical and mechanical properties of materials. Collection of reports of the All-Russian conference on testing and research of properties of materials "TestMat-2012". Moscow: VIAM, 2012, p. 13.
7. Lutsenko A.N., Odintsev I.N., Grinevich A.V. i dr. Study of material deformation by optical-correlation methods. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. S4, pp. 70–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86.
8. Nikitin A.V., Krylov V.D., Khanzhin V.G. Equipment and technique for real-time observation of deformation instability during stretching of thin aluminum foil. *Vestnik Tambovskogo universiteta*, 2013, vol. 18, no. 4-2, pp. 1871–1872.
9. Panin S.V., Burkov M.V., Lyubutin P.S., Altukhov Yu.A., Eremin A.V., Khizhnyak S.A. Application of an integral-type strain gauge in cyclic testing of a composite material based on carbon fibers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 12-2. S. 186-191.
10. Oreshko E.I., Erasov V.S., Grinevich D.V., Sershak P.V. Review of criteria of durability of materials. *Trudy VIAM*, 2019, no. 9 (81), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 11, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126.
11. Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V. The criteria of the failure of polymer matrix composites (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 11. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: May 11, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.

12. Kosarev V.A., Azikov N.S., Alipov A.E. Technique for solving physically nonlinear problems of structural strength with stress concentrators. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2014, no. 2, pp. 26–31.
13. Tretyakova T.V., Spaskova E.M. Experimental study of the limiting stress-strain states of a quasi-brittle material using the digital image correlation method. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*, ser.: *Mekhanika*, 2013, no. 2, pp. 186–198.
14. Ilichev A.V., Raskutin A.E. Research of stress concentrator influence on stress-strain state of carbon by digital images correlation method. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 62–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-61-62.
15. Ilichev A.V., Gubin A.M., Akmeev A.R., Ivanov N.V. Definition of area of the maximum shear deformations for CFRP samples on Iosipescu method, with use of optical system of measurements. *Trudy VIAM*, 2018, no. 6 (66), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 11, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-99-109.

Информация об авторах

Шершак Павел Викторович, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Яковлев Николай Олегович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Орешко Евгений Игоревич, кандидат технических наук, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Pavel V. Shershak, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Nikolay O. Yakovlev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Evgeny I. Oreshko, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 09.08.2021; одобрена после рецензирования 19.08.2021; принята к публикации 19.08.2021.
The article was submitted 09.08.2021; approved after reviewing 19.08.2021; accepted for publication 19.08.2021.

Научная статья

УДК 620.193.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-123-134

**МИКРОМИЦЕТЫ-ДЕСТРУКТОРЫ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
СРЕДИ ЭКСТРЕМОФИЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ (обзор)**А.А. Кривушина¹, В.О. Старцев¹¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Экстремофильные микроорганизмы способны выживать при экстремальных условиях среды. Представлен обзор исследовательских работ по изучению экстремофильных микромицетов и поиску среди них видов, известных в качестве деструкторов полимерных материалов. Рассмотрены такие группы экстремофильных микромицетов, как термофилы, ксерофилы и олиготрофы, способные выживать при высоких значениях температуры, пониженной влажности и недостатке питательных веществ соответственно. В каждой группе таких микроорганизмов найдены виды микромицетов, которые неоднократно отмечены как деструкторы полимерных материалов.

Ключевые слова: экстремофильные микроорганизмы, экстремофилы, микромицеты-деструкторы, биоповреждения, термофилы, ксерофилы, олиготрофы, экологическая ниша

Для цитирования: Кривушина А.А., Старцев В.О. Микромицеты-деструкторы полимерных материалов среди экстремофильных микроорганизмов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-123-134.

Scientific article

**MICROMYCETES-DESTRUCTORS OF POLYMERIC MATERIALS
AMONG EXTREMOPHILIC MICROORGANISMS (review)**Anastasia A. Krivushina¹, Valery O. Startsev¹¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: Extremophilic microorganisms are able to survive under extreme environmental conditions. The article is devoted to a review of research works on the study of extremophilic micromycetes, as well as the search among them for species known as destructors of polymeric materials. Such groups of extremophilic micromycetes as thermophiles, xerophiles, and oligotrophs, capable of surviving at high ambient temperatures, low humidity and lack of nutrients, are considered. In each group of extremophilic microorganisms, species of micromycetes were found, which were repeatedly noted as destructors of polymer materials.

Keywords: extremophilic microorganisms, extremophiles, micromycetes-destructors, biodeterioration, thermophiles, xerophiles, oligotrophs, ecological niche

For citation: Krivushina A.A., Startsev V.O. Micromycetes-destructors of polymeric materials among extremophilic microorganisms (review). Trudy VIAM, 2022, no. 1 (107), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-123-134.

Введение

Экстремофилы – это совокупность организмов, способных выживать при экстремальных условиях среды, таких как повышенные или пониженные температуры, отсутствие кислорода, соленость, кислотность среды, повышенное или пониженное давление и др. Экстремофилы обладают рядом необычных свойств, представляющих интерес как в теоретическом, так и в прикладном плане, – данные микроорганизмы активно используют в различных областях промышленности. Подавляющее большинство экстремофилов – это микроорганизмы, однако немало среди них и видов микроскопических грибов, или микромицетов. Экстремофильные микроорганизмы обитают в различных уголках планеты, где другие виды не способны выжить: в кратерах вулканов, на глубине океанов, в пустынях, в условиях вечной мерзлоты и во многих других местах, т. е. занимают специфические экологические ниши. Микромицеты-деструкторы различных материалов также занимают свою определенную экологическую нишу и приспосабливаются к выживанию способами, недоступными для многих других микроорганизмов. С помощью синтеза определенных метаболитов, в частности ферментов, деструкторы разлагают сложные компоненты материалов до более простых соединений, которые в дальнейшем используют в качестве источника питания [1–6]. Микромицеты-экстремофилы активно используют свой ферментативный аппарат, позволяющий им не только выживать, но и динамично развиваться в экстремальных условиях среды. Выделяемые экстремофилами ферменты, как правило, обладают повышенной активностью и стабильностью, а также проявляют высокую устойчивость не к одному, а к нескольким факторам среды [7].

Экстремофилы можно разделить на множество различных групп в зависимости от условий, к которым они приспособлены. Однако и эти классификации не являются взаимоисключающими. Довольно распространенными являются ситуации, когда экстремофилы попадают под несколько категорий сразу – такие микроорганизмы называют полиэкстремофилами. Например, бактерия *Thermococcus barophilus* является одновременно термофилом и барофилом, т. е. выживает в условиях высоких значений как температуры, так и давления [8]. С данной точки зрения большой интерес представляет поиск среди экстремофильных микромицетов штаммов, способных к деструкции полимерных материалов. С учетом условий эксплуатации полимерных материалов и изделий, а также их применения наибольший интерес представляют термофильные, ксерофильные и олиготрофные микромицеты. В данной статье рассмотрены указанные группы экстремофилов и их возможности вызывать деструкцию различных материалов.

Термофильные микромицеты

К термофилам относят различные группы микроорганизмов, способных выживать при достаточно высоких температурах (более +45 °C), в том числе и микроскопические грибы, или микромицеты, для которых диапазон температуры выживания находится в пределах от 45 до 60 °C. Способность к выживанию в условиях повышенных температур объясняется наличием у грибов специальных ферментов, которые работают при высоких температурах. В научно-технической литературе можно встретить термины «термофильные микроорганизмы» и «термотолерантные микроорганизмы». Термофильные микроорганизмы развиваются при повышенных температурах, термотолерантные – при нормальных (до +35 °C), но способны оставаться жизнеспособными и при более высоких температурах.

У микромицетов-термофилов особый состав клеточных мембран, который содержит липидно-белковый комплекс, включающий насыщенные жирные кислоты с разветвленной углеродной цепочкой. Благодаря этому происходит поддержание

ригидности клетки и нативной структуры мембраны в условиях повышенной температуры. Термофильные микромицеты также широко используют во многих отраслях промышленности благодаря особенности их ферментов, которые при высоких температурах более активны, что позволяет ускорить или качественно изменить некоторые технологические процессы. Основная область промышленного применения данных микромицетов связана именно с этим свойством [9, 10].

В ряде случаев под термином «термофилы» подразумевают все микроорганизмы, обитающие в тропических и субтропических условиях. Известно, что в странах с подобным климатом микробиологические повреждения различных объектов, материалов и изделий возникают наиболее часто. В том случае если среди термофильных микроорганизмов присутствует много деструкторов, то вполне вероятно взаимосвязь между термофильностью и деструктивной активностью микроорганизмов, в частности микромицетов.

В работе [11] изучали термофильные микромицеты, выделенные из отвалов угольных предприятий. Выделены виды *Aspergillus fumigatus* и *Thermomyces lanuginosus*, которые выдерживают температуру до 60 °C и при этом способны разлагать гемицеллюлозу. Штаммы того же вида *Aspergillus fumigatus* известны как активные деструкторы ряда материалов, а также авиационного топлива и других нефтепродуктов [12–16]. Микромицеты данного вида широко распространены на полимерных материалах в складских, рабочих помещениях и вне их [17, 18]. При микологическом анализе авиационного топлива, используемого в сверхзвуковой авиации, из топливных образцов часто изолируют непигментированные штаммы *Aspergillus fumigatus*. Этот гриб обладает высокой резистентностью не только к перепадам температуры, но и к другим условиям – перепадам влажности и изменениям pH среды. Споры *Aspergillus fumigatus* способны выживать при колебаниях температуры от –32 до +60 °C в водной фазе, а в авиационном керосине – при более широком диапазоне температур: от –32 до +80 °C [19–21].

Отмечена деструктивная активность термофильных и термотолерантных микромицетов таких родов, как *Aspergillus*, *Thermomyces*, *Myceliophthora*, *Thermomucor* и *Candida*. Грибы успешно росли на средах, содержащих в качестве единственного источника углерода кукурузную солому и картон, при температуре 45 °C [22].

Термофильные виды микромицетов *Myceliophthora thermophila* [22] и *Myceliophthora heterothallica* в работе [23] описаны как биопреобразователи остатков лигноцеллюлозы в сахара. Отмечено, что данные грибы могут использоваться в промышленности для переработки жома сахарного тростника и последующем производстве биоэтанола второго поколения. Схожую ферментативную активность показала культура термофильного гриба *Thermoascus aurantiacus* в исследованиях по биоразложению растительной биомассы [24]. Еще в одном исследовании термофильные микромицеты *Myceliophthora thermophila* и *Thielavia terrestris* гидролизуют все основные полисахариды, которые присутствуют в изучаемой растительной биомассе [25].

Большую полисахарид-деградирующую активность показали термофильные микромицеты, принадлежащие к видам *Thermothelomyces thermophila*, *Thermomyces thermophilus* и *Mycothermus thermophilus*. Данные штаммы представляют интерес как деструкторы различных растительных отходов сельского хозяйства, а также как модификаторы углеводсодержащих соединений [26].

Таким образом, практически все термофильные виды грибов, описанные в научно-технической литературе, представляют интерес в промышленных масштабах как производители ферментов, разрушающих углеводсодержащую биомассу при высоких температурах. Те же классы ферментов могут оказывать прямое или косвенное

воздействие на широкий круг неметаллических материалов, таких как различные полимерные материалы, резины, герметики, лакокрасочные покрытия, углепластики и др. Поэтому с высокой долей вероятности можно полагать, что группа термофильных микромицетов содержит потенциальные деструкторы полимерных материалов.

Ксерофильные микромицеты

К ксерофилам относят микроорганизмы, которые способны выживать в условиях пониженной влажности, – это обитатели пустынь, полупустынь, песчаных дюн и других засушливых районов, у которых хорошо развит механизм регуляции водного обмена. Данные микроорганизмы в ходе эволюции научились сохранять воду внутри организма, в частности могут использовать метаболическую воду, образующуюся благодаря окислению липидов. Как и в предыдущей группе экстремофилов, здесь различают ксерофильные микроорганизмы, живущие в условиях пониженной влажности, и ксеротолерантные микроорганизмы, способные жить в условиях нормальной влажности (30–60 %), однако они выживают и при пониженном содержании влаги.

Следует отметить, что в большинстве случаев микробиологические повреждения возникают, как правило, в условиях повышенной влажности и температуры. Однако известны случаи биоповреждений и в условиях пониженной влажности, т. е. среди микромицетов-деструкторов встречаются ксерофильные и ксеротолерантные виды. Одним из ярких примеров присутствия микромицетов-деструкторов среди ксерофильных грибов являются биоповреждения книг и архивных документов в библиотеках и книгохранилищах, а также экспонатов в музеях и пр. При исследовании микобиоты помещений Российской национальной библиотеки выделено 49 видов микромицетов, относящихся к 17 родам. По количеству видов преобладали роды *Penicillium*, *Aspergillus*, *Acremonium*, *Cladosporium*, *Paecilomyces* и *Torula*. Показано, что среди грибов, выделенных из воздуха библиотеки и с поверхности книг и документов, доминировали ксерофильные виды, такие как *Aspergillus fumigatus*, *A. niger*, *A. ochraceus*, *A. versicolor*, *Penicillium aurantiogriseum*, *P. brevicompactum*, *P. chrysogenum* и др. [27]. В исследовании микобиоты помещений Государственного Эрмитажа выделено 85 видов грибов из 37 родов. По количеству видов также преобладали представители анаморфных грибов *Penicillium*, *Aspergillus*, *Acremonium* и *Cladosporium*. Непосредственно из небольших очагов биоповреждений в здании музея удалось выделить штамм *Aspergillus* sp., который плохо развивался на стандартных питательных средах. Из очага биоповреждений на питательную среду с пониженной активностью воды также удалось выделить светлоокрашенный штамм ксерофильного микромицета, который не был идентифицирован [28].

В работе [29] выделены микромицеты-деструкторы *Aspergillus carbonarius* и *Alternaria alternata* из очагов биоповреждений архивных картонных коробок. Показано, что наибольшей ксеротолерантностью обладает штамм *Aspergillus carbonarius*. При этом отмечено, что низкая активность воды стимулирует выделение пигмента у культуры гриба, что свидетельствует о возникновении большой опасности для сохранности архивных документов даже в нормальных условиях хранения. В работе [30] при изучении биоповреждений в музейных фондах удалось выделить культуры грибов только на среды с пониженной активностью воды, т. е. выделенные деструкторы оказались экстремальными ксерофилами, – это штаммы видов *Aspergillus penicilloides*, *Eurotium amstelodami* и *Eurotium* sp.

Часто у микроорганизмов способность переносить высокую сухость сочетается с термофильностью, т. е. способностью выдерживать высокие температуры. Так, в работе [31] из почвы выщелочного чернозема выделены термофильные и ксерофильные

представители видов *Paecilomyces lilacinus*, *Aspergillus candidus* и *Acremonium alternatum*. Известно, что эти же виды широко распространены на полимерных материалах [17].

Ксерофильные виды распространены и среди микромицетов, вызывающих биоповреждения в жилых помещениях. Как отмечено в работе [32], в жилых помещениях формируется комплекс ксеротолерантного сообщества микромицетов, что отражается на большей доле ксеротолерантных и ксерофильных микромицетов, в том числе видах рода *Aspergillus*, по сравнению с комплексом грибов в городских почвах. Основными видами, составляющими комплекс микобиоты помещений в г. Москве, являются виды родов *Penicillium* и *Aspergillus*. Данные микромицеты преобладают по частоте встречаемости как в домашней пыли, так и в воздухе. В жилых помещениях г. Москвы отмечено не менее 50 видов рода *Penicillium* и не менее 22 видов рода *Aspergillus*. Наиболее часто отмечены микромицеты *Penicillium cyclopium*, *P. frequentas*, *P. chrysogenum*, *Aspergillus repens*, *A. Versicolor* и *Cladosporium cladosporioides* [32]. Всего же в помещениях г. Москвы выявлено более 148 видов микромицетов, относящихся к 45 родам [33].

Таким образом, среди ксерофильных микромицетов отмечено большое количество как подтвержденных биодеструкторов, так и контаминантов материалов, среди которых могут присутствовать потенциальные деструкторы.

Олиготрофные микромицеты

Группа олиготрофных микроорганизмов объединяет микроорганизмы, которые обитают на субстратах с низким содержанием питательных веществ. Как правило, под этими субстратами подразумевают такие места обитания, как сухие степи, пустыни, верховые болота и др. Олиготрофы приспособились к жизни в таких условиях благодаря способностям более эффективного поглощения питательных веществ, а также их эффективного хранения.

Таксономическое разнообразие олиготрофных микромицетов довольно велико. Среди них нередко встречаются виды, отмеченные в других работах как деструкторы материалов. Так, в работе [34] из верхнего слоя почвы мезоолиготрофного болота выделено 73 вида микромицетов с преобладающими родами *Mortierella*, *Geomyces*, *Cephalosporium*, *Paecilomyces*, *Penicillium* и *Trichoderma*. Как известно, среди представителей всех перечисленных родов нередко встречаются и штаммы видов с деструктивной активностью в отношении полимерных материалов [17, 35–41].

В исследовании [42] выделен 31 вид микромицетов из 18 родов, заселяющих почву сульфатно-содового засоления пустыни Гоби (Монголия), которые отнесены к двум экологическим группам. В первую группу входили грибы, способные к существованию в условиях содового засоления: галоалкалофильные и галоалкалотолерантные микромицеты. Выделение таких культур возможно только с использованием специальных щелочных питательных сред. Ко второй группе относили в основном космополитичные виды, такие как *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Syncephalastrum*, *Trichoderma* и *Ulocladium*. Среди указанных родов грибов известно много деструкторов. Кроме того, в отличие от предыдущей группы, эти штаммы выделялись на стандартные питательные среды, такие как сусло-агар, среда Чапека, голодный агар, т. е. способны к росту на разных субстратах.

В песках хвостохранилища, которое подвергали рекультивации более 40 лет назад, выделено 26 видов микромицетов, в свеженамытых песках – 12 видов микромицетов [43]. В рекультивируемых песках численно доминировал вид *Trichoderma viride*, известный в научно-технической литературе своей деструктивной способностью. В свеженамытых песках отмечено отсутствие доминантов, однако чаще

других встречается вид *Penicillium thomii*. Среди микромицетов песков и песчаных почв природного и антропогенного происхождения выявлены представители таких родов, как *Acremonium*, *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Gliocladium*, *Mortierella*, *Mucor*, *Penicillium* и *Trichoderma*, среди которых теоретически могут быть штаммы с деструктивной активностью. В работе [44] отмечено, что представители рода *Penicillium* наиболее широко представлены среди микромицетов рекультивируемых хвостохранилищ и составляют более 50 % от всего видового разнообразия выделенных грибов. В песчаных почвах природного генезиса микромицеты рода *Penicillium* также преобладали по разнообразию, всего отмечено восемь видов. Микромицеты рода *Penicillium* являются одними из наиболее распространенных грибов с отмеченной деструктивной активностью. Представителей данного рода регулярно выделяют с различных материалов и изделий, подвергшихся биоповреждениям: с поверхности зданий, строительных материалов, произведений искусства, архивных бумаг и книг в книгохранилищах, из различных масел, смазок, нефтепродуктов и др. [17, 35–41]. Виды рода *Penicillium* преобладают по численности среди грибов, заселяющих объекты культурного наследия на территории Республики Куба [45].

Микологический анализ образцов почв песчаных карьеров на севере Западной Сибири показал наличие 51 вида микромицетов из 25 родов [46]. Как и в предыдущих работах, наиболее многочисленным по видам оказался род *Penicillium*. Представители рода отмечены в 90 % исследованных проб, чаще других встречаются такие виды, как *Penicillium lanosum* и *Penicillium glauco-lanosum*. В группу доминирующих грибов вошел и отмеченный ранее в других работах вид *Trichoderma viride*, а также другие представители рода *Trichoderma*. Кроме того, в грунтах карьеров, в отличие от микобиоты растительных ценозов, отмечают довольно большое присутствие представителей зигомицетов, особенно представителей рода *Mucorales* (мукоровые грибы): *Absidia*, *Mortierella*, *Mucor* и *Rhizopus*. Мукоровые грибы также являются активными деструкторами полимерных материалов, различных изделий, зданий, памятников и др. [17].

Заключения

Все типы микробиологических повреждений можно условно разделить на две группы по характеру использования материала микроорганизмом. К первой группе относят биоповреждения, когда материал используется микроорганизмами лишь как место обитания, а все необходимые питательные элементы они получают из окружающего пространства. В целом микромицеты-деструкторы из данной группы по своему типу питания можно отнести к олиготрофным микроорганизмам, поскольку для своего развития они используют ограниченное количество питательных веществ, которые удается получить из частиц пыли, оседающих на материал. Ко второй группе относят биоповреждения, когда сам материал или его компонент используются как источник питания для микроорганизма. Среди обеих групп деструкторов можно встретить как термофильные и термотолерантные, так и ксерофильные и ксеротолерантные виды микроорганизмов.

Таким образом, при широком рассмотрении термина «экстремофильность» следует отметить, что микроорганизмы-деструкторы материалов могут быть включены в данную группу, поскольку они биохимическими путями приспособились к существованию в специфической эконше, недоступной для других организмов. Когда же деструкторы выделяют как отдельную группу, то ее видовые представители нередко встречаются и среди других экстремофильных групп, таких как термофилы, ксерофилы или олиготрофы. Поиск и изучение экстремофильных микроорганизмов-деструкторов, а также механизмов их адаптации представляет большой интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Статья подготовлена в рамках выполнения работ по гранту РФФИ № 20-53-56009 «Исследование воздействия факторов окружающей среды на лакокрасочные покрытия в условиях сухого субтропического климата».

Список источников

1. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
2. Каблов Е.Н., Ерофеев В.Т., Светлов Д.А., Смирнов В.Ф., Богатов А.Д. Биоповреждения в космических аппаратах // Сб. Междунар. науч.-техн. конф. «Композиционные материалы. Теория и практика». Пенза: Приволжский дом знаний, 2015. С. 40–46.
3. Кривушина А.А., Горяшник Ю.С. Способы защиты материалов и изделий от микробиологического поражения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-80-86.
4. Кривушина А.А., Бобырева Т.В., Яковенко Т.В., Николаев Е.В. Методы хранения микроорганизмов-деструкторов в коллекции ФГУП «ВИАМ» // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-89-94.
5. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites. Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Engineering Systems. 2020, vol. 1687, art. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/1687/1/012029.
6. Севастьянов Д.В., Сутубалов И.В., Дасковский М.И., Шеин Е.А. Полимерные биоконкомпозиты на основе биоразлагаемых связующих, армированных натуральными волокнами (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4. С. 42–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-42-50.
7. Морозкина Е.В., Слуцкая Э.С., Федорова Т.В. и др. Экстремофильные микроорганизмы: биохимическая адаптация и биотехнологическое применение (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2010. Т. 46. № 1. С. 5–20.
8. Marteinsson V.T., Birrien J.L., Reysenbach A.L. et al. Thermococcus barophilus sp. nov., a new barophilic and hyperthermophilic archaeon isolated under high hydrostatic pressure from a deep-sea hydrothermal vent // International Journal of Systematic Bacteriology. 1999. Vol. 49. No. 2. P. 351–359. DOI: 10.1099/00207713-49-2-351.
9. Cooney D.G., Emerson R. Thermophilic fungi. An account of their biology, activities and classification. San Francisco; London: W.H. Freeman & Co, 1964. No. 15. P. 25–35.
10. Кузякина Т.И. Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов на активных вулканах и в гидротермах (Остров Кунашир, Курильские острова, Камчатка). Владивосток: Дальнаука, 2004. 251 с.
11. Калинина А.Е., Соколянская Л.О., Глухова Л., Карначук О.В. Выделение термофильных микромицетов из мест горения угля // Старт в науку: материалы LXVII науч. студ. конф. Биологического института (Томск, 23–27 апр. 2018 г.). Томск, 2019. С. 77.
12. Картавцева З.М., Коваль Э.З., Калаганов В.А., Ляпунов Н.А. Деструкция дизельного топлива микроорганизмами в циркуляционных системах // Микробиологический журнал. 1989. Т. 51. № 4. С. 87–94.
13. Gaylarde C.C., Bento F.M., Kelley J. Microbial contamination of stored hydrocarbon fuels and its control // Revista de Microbiologia. 1999. Vol. 30. No. 1. P. 1–10.
14. Bento F.M., Beech I.B., Gaylarde C.C. et al. Degradation and corrosive activities of fungi in a diesel–mild steel–aqueous system // World journal of microbiology and biotechnology. 2005. Vol. 21. No. 2. P. 135–142.
15. McNamara C.J., Perry T.D., Leard R. et al. Corrosion of aluminum alloy 2024 by microorganisms isolated from aircraft fuel tanks // Biofouling. 2005. Vol. 21. No. 5. P. 257–265.
16. Кривушина А.А., Бобырева Т.В., Николаев Е.В., Славин А.В. Механизмы микробиологической деструкции углеводородного топлива и других нефтепродуктов микромицетами (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3. С. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-66-71.

17. Лугаускас А.Ю., Микульскене А.И., Шляужене Д.Ю. Каталог микромицетов – биодеструкторов полимерных материалов. М.: Наука, 1987. С. 258–259.
18. Злочевская И.В. Экологические группы грибов, повреждающих материалы, и их особенности // Биологические науки. 1987. № 8. С. 81–87.
19. Scott J.A., Forsyth T.J. Thermophilic microorganisms in aircraft fuel // International Biodeterioration Bulletin. 1976. Vol. 12. No. 1. P. 1–4.
20. Thomas A.R., Hill E.C. *Aspergillus fumigatus* and supersonic aviation // International Biodeterioration Bulletin. 1977. Vol. 13. No. 1. P. 1–4.
21. Каневская И.Г. Биологическое повреждение промышленных материалов. Л.: Наука, 1984. 232 с.
22. Moretti M.M.S., Martins D.A.B., Silva R.D., Rodrigues A. Selection of thermophilic and thermotolerant fungi for the production of cellulases and xylanases under solid-state fermentation // Brazilian Journal of Microbiology. 2012. Vol. 43 (3). P. 1062–1071. DOI: 10.1590/S1517-838220120003000032.
23. Brink J.V.D., Harman-van Muiswinkel G.C.J., Theelen B.J.F. Efficient plant biomass degradation by thermophilic fungus *Myceliophthora heterothallica* // Applied and Environmental microbiology. 2012. Vol. 79 (4). DOI: 10.1128/AEM.02865-12.
24. McClendon S.D., Bath T., Petzold C.J. et al. *Thermoascus aurantiacus* is a promising source of enzymes for biomass deconstruction under thermophilic conditions // Biotechnology for biofuels. 2012. No. 5 (54). P. 1–9.
25. Berka R.M., Grigoriev I.V., Otilar R. et al. Comparative genomic analysis of the thermophilic biomass-degrading fungi *Myceliophthora thermophila* and *Thielavia terrestris* // Nature Biotechnology. 2011. Vol. 29. No. 10. P. 922–927. DOI: 10.1038/nbt.1976.
26. Балабанова Л.А., Бакунина И.Ю., Слепченко Л.В. и др. Полисахарид-деградирующая активность морских и наземных штаммов мицелиальных грибов // Биоорганическая химия. 2018. Т. 44. № 4. С. 425–432.
27. Горяева А.Г., Великова Т.Д., Добрусина С.А. Микобиота воздуха и композитов бумаги с полимерными покрытиями в Российской национальной библиотеке // Микология и фитопатология. 2010. Т. 44. № 1. С. 10–18.
28. Смоляницкая О.Л. Микромицеты как потенциальные агенты биоповреждения культурных ценностей и стратегия защиты от них в Государственном Эрмитаже: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2007. 26 с.
29. Гончарова И.А., Сабадах Е.Н., Тригубович А.М., Черная Н.В. Микологический анализ промышленных материалов, контаминированных микроскопическими грибами // Труды БГТУ. Сер. 2. 2020. № 2. С. 163–168.
30. Ребрикова Н.Л., Понизовская В.Б. Экстремально ксерофильные грибы, обнаруженные в музейных фондах // Современная микология в России: тез. докладов. Сер. 6. 2015. Т. 5. С. 298–300.
31. Кувшинова Н.М., Свистова И.Д., Гулиева Д.З. Состав и структура комплекса микромицетов чернозема выщелоченного // Развитие современной науки: теоретические и прикладные аспекты. 2016. № 3. С. 173–175.
32. Желтикова Т.М., Антропова А.Б., Биланенко Е.Н. и др. Плесневые грибы жилых помещений // РЭТ-инфо. 2006. № 1. С. 31–36.
33. Антропова А.Б., Мокеева В.Л., Биланенко Е.Н. и др. Аэромикота жилых помещений г. Москвы // Микология и фитопатология. 2003. Т. 37. Вып. 6. С. 1–11.
34. Сизоненко Т.А., Хабибуллина Ф.М., Загирова С.В. Почвенная микробиота мезо-олиготрофного болота средней тайги // Микология и фитопатология. 2016. Т. 50. Вып. 2. С. 115–123.
35. Митковская Т.И., Коваль Э.З. Оценка роли микромицетов, выделенных с произведений искусства // Тез. докладов II съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2008. Т. 2. С. 374–375.
36. Катаев А.Д., Кураков А.В. Микробная колонизация и деструкция биоразлагаемых синтетических материалов на основе полигидроксibuтирата и полигидроксивалериата в почвах // Тез. докладов III съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2012. Т. 3. С. 218–219.

37. Балюта А.А., Важинская И.С. Стойкость современных строительных материалов к плесневому поражению // Тез. докладов III съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2012. Т. 3. С. 210.
38. Огаркова Г.Р., Буковская Н.Е., Самусенок Л.В., Огарков Б.Н. Биоповреждения пористых строительных материалов ассоциациями специфичных микроорганизмов // Тез. докладов III съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2012. Т. 3. С. 224–225.
39. Мамаева Н.Ю., Великова Т.Д., Горяева А.Г. Биоповреждения бумаги микромицетами в условиях различной освещенности // Тез. докладов IV съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2017. Т. 6. С. 418–420.
40. Попихина Е.А., Трепова Е.С. Микодеструкторы строительных материалов // Тез. докладов IV съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2017. Т. 6. С. 424–426.
41. Халмурадова П.А., Мезитова Л.Д., Алатби А.Х. и др. Микромицеты-деструкторы старых зданий г. Казани: анализ метаболитов и подбор биоцидов // Тез. докладов IV съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2017. Т. 6. С. 415.
42. Георгиева М.Л., Грум-Гржимайло А.А., Ямнова И.А., Биланенко Е.Н. Мицелиальные грибы в почвах сульфатно-содового засоления пустыни Гоби (Монголия) // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46. Вып. 1. С. 27–32.
43. Редькина В.В. Биологическая активность первичных почв на нефелиновых песках хвостохранилищ ОАО «Апатит» (Мурманская область) // Биологический мониторинг природно-техногенных систем: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с Междунар. участием. Кировск: Лобань, 2011. Ч. 1. С. 148–152.
44. Евдокимова Г.А., Корнейкова М.В., Лебедева Е.В., Калмыкова В.В. Микромицеты в песках и песчаных почвах природного и техногенного генезиса // Микология и фитопатология. 2009. Т. 43. Вып. 2. С. 84–92.
45. Rojas T.I., Aira M.J., Batista A. et al. Fungal biodeterioration in historic buildings of Havana (Cuba) // Grana. 2012. Vol. 51. Is. 1. P. 44–51.
46. Сумина О.И., Власов Д.Ю., Долгова Л.Л., Сафронова Е.В. Особенности формирования сообществ микромицетов в зарастающих песчаных карьерах севера Западной Сибири // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. 2010. Вып. 2. С. 84–90.

References

1. Kablov E.N. The key problem is materials. Trends and guidelines for innovative development in Russia. Moscow: VIAM, 2015, pp. 458–464.
2. Kablov E.N., Erofeev V.T., Svetlov D.A., Smirnov V.F., Bogatov A.D. Biodamage in space vehicles. *Int. scientific and technical conf. "Composite materials. Theory and practice"*. Penza: Privolzhsky House of Knowledge, 2015, pp. 40–46.
3. Krivushina A.A., Goryashnik Yu.S. Ways of protection of materials and products from microbiological damage (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-80-86.
4. Krivushina A.A., Bobyрева T.V., Yakovenko T.V., Nikolaev E.V. Methods of microorganisms-destructors storage in FSUE «VIAM» collection (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, No. 3 (56), pp. 89–94. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2019-0-3-89-94.
5. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Engineering Systems*. 2020, vol. 1687, art. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/1687/1/012029.
6. Sevastyanov D.V., Sutubalov I.V., Daskovskij M.I., Shein E.A. Polymer biocomposites based on biodegradable binders reinforced by natural fibers (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 42–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-42-50.

7. Morozkina E.V., Slutskeya E.S., Fedorova T.V. et al. Extremophilic microorganisms: biochemical adaptation and biotechnological application (review). *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 5–20.
8. Marteinsson V.T., Birrien J.L., Reysenbach A.L. et al. *Thermococcus barophilus* sp.nov., a new barophilic and hyperthermophilic archaeon isolated under high hydrostatic pressure from a deep-sea hydrothermal vent. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1999, vol. 49, no. 2, pp. 351–359. DOI: 10.1099/00207713-49-2-351.
9. Cooney D. G., Emerson R. Thermophilic fungi. An account of their biology, activities and classification. San Francisco ; London: W.H. Freeman & Co, 1964, no. 15, pp. 25–35.
10. Kuzyakina T.I. Ecology and geochemical activity of microorganisms on active volcanoes and in hydrothermal waters. Vladivostok: Dalnauka, 2004, 251 p.
11. Kalinina A.E., Sokolyanskaya L.O., Glukhova L., Karnachuk O.V. Isolation of thermophilic micromycetes from coal combustion sites. Start in science: materials LXVII scientific. stud. conf. Biological Institute. Tomsk, 2019, p. 77.
12. Kartavtseva Z.M., Koval E.Z., Kalaganov V.A., Lyapunov N.A. Destruction of diesel fuel by microorganisms in circulation systems. *Mikrobiologicheskii zhurnal*, 1989, vol. 51, no. 4, pp. 87–94.
13. Gaylarde C.C., Bento F.M., Kelley J. Microbial contamination of stored hydrocarbon fuels and its control. *Revista de Microbiologia*, 1999, vol. 30, no. 1, pp. 1–10.
14. Bento F.M., Beech I.B., Gaylarde C.C. et al. Degradation and corrosive activities of fungi in a diesel – mild steel – aqueous system. *World journal of microbiology and biotechnology*, 2005, vol. 21, no. 2, pp. 135–142.
15. McNamara C. J., Perry T.D., Leard R. et al. Corrosion of aluminum alloy 2024 by microorganisms isolated from aircraft fuel tanks. *Biofouling*, 2005, vol. 21, no. 5, pp. 257–265.
16. Chertishchev V.Yu., Ospennikova O.G., Boichuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S. Determination of the size and depth of defects in multilayer PCM honeycomb structures based on the mechanical impedance value. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-72-94.
17. Lugauskas A.Yu., Mikulskene A.I., Shlyauzhene D.Yu. Catalog of micromycetes-biodegradants of polymeric materials. Moscow: Nauka, 1987, pp. 258–259.
18. Zlochevskaya I.V. Ecological groups of fungi damaging materials and their features. *Biologicheskiiye nauki*, 1987, no. 8, pp. 81–87.
19. Scott J.A., Forsyth T.J. Thermophilic microorganisms in aircraft fuel. *International Biodeterioration Bulletin*, 1976, vol. 12.No. 1, pp. 1-4.
20. Thomas A.R., Hill E.C. *Aspergillus fumigatus* and supersonic aviation. *International Biodeterioration Bulletin*, 1977, vol. 13.No. 1, pp. 1-4.
21. Kanevskaya I.G. Biological damage to industrial materials. Leningrad: Nauka, 1984, 232 p.
22. Moretti M.M.S., Martins D.A.B., Silva R.D., Rodrigues A. Selection of thermophilic and thermotolerant fungi for the production of cellulases and xylanases under solid-state fermentation. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2012, vol. 43 (3), pp. 1062–1071. DOI: 10.1590/S1517-838220120003000032.
23. Brink J.V.D., Harman-van Muiswinkel G.C.J., Theelen B.J.F. Efficient plant biomass degradation by thermophilic fungus *Myceliophthora heterothallica*. *Applied and Environmental microbiology*, 2012, vol. 79 (4). DOI: 10.1128/AEM.02865-12.
24. McClendon S.D., Batth T., Petzold C.J. et al. *Thermoascus aurantiacus* is a promising source of enzymes for biomass deconstruction under thermophilic conditions. *Biotechnology for biofuels*, 2012, no. 5 (54), pp. 1–9.
25. Berka R. M., Grigoriev I. V., Otiillar R. et al. Comparative genomic analysis of the thermophilic biomass-degrading fungi *Myceliophthora thermophila* and *Thielavia terrestris*. *Nature Biotechnology*, 2011, vol. 29, no. 10, pp. 922–927. DOI: 10.1038/nbt. 1976.
26. Balabanova L.A., Bakunina I.Yu., Slepchenko L.V. and other Polysaccharide-degrading activity of marine and terrestrial strains of filamentous fungi. *Bioorganicheskaya khimiya*, 2018, vol. 44, no. 4, pp. 425–432.

27. Goryaeva A.G., Velikova T.D., Dobrusina S.A. Mycobiota of air and composites of paper with polymer coatings in the Russian National Library. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2010, vol. 44, no. 1, pp. 10–18.
28. Smolyanitskaya O.L. Micromycetes as potential agents of biological damage to cultural property and a strategy of protection against them in the State Hermitage: thesis abstracts, Cand. Sc. (Bio). St Petersburg, 2007, 26 p.
29. Goncharova I.A., Sabadakha E.N., Trigubovich A.M., Black N.V. Mycological analysis of industrial materials contaminated with microscopic fungi. *Trudy BGTU*, Ser. 2, 2020, no. 2, pp. 163–168.
30. Rebrikova N.L., Ponizovskaya V.B. Extremely xerophilic fungi found in museum funds. *Modern mycology in Russia: abstracts reports*. Ser. 6, 2015, vol. 5, pp. 298–300.
31. Kuvshinova N.M., Svistova I.D., Gulieva D.Z. The composition and structure of the mycomycete complex of leached chernozem. *Razvitiye sovremennoy nauki: teoreticheskiye i prikladnyye aspekty*, 2016, no. 3, pp. 173–175.
32. Zheltikova T.M., Antropova A.B., Bilanenko E.N. et al. Molds for living quarters. *RET-info*, 2006, no. 1, pp. 31–36.
33. Antropova A.B., Mokeeva V.L., Bilanenko E.N. and other. Aeromikota living quarters in Moscow. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2003, vol. 37, is. 6, pp. 1–11.
34. Sizonenko T.A., Khabibullina F.M., Zagirova S.V. Soil microbiota of the meso-oligotrophic bog of the middle taiga. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2016, vol. 50, 2, pp. 115–123.
35. Mitkovskaya T.I., Koval E.Z. Assessment of the role of micromycetes isolated from works of art. Abstracts of the II congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia". Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2008, vol. 2, pp. 374–375.
36. Kataev A.D., Kurakov A.V. Microbial colonization and destruction of biodegradable synthetic materials based on polyhydroxybutyrate and polyhydroxyvalerate in soils. Abstracts of the III congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia". Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2012, vol. 3, pp. 218–219.
37. Baluta A.A., Vazhinskaya I.S. Resistance of modern building materials to mold damage. Abstracts of the III congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia". Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2012, vol. 3, p. 210.
38. Ogarkova G.R., Bukovskaya N.E., Samusenok L.V., Ogarkov B.N. Biodamage of porous building materials by associations of specific microorganisms. Abstracts of the III congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia". Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2012, vol. 3, pp. 224–225.
39. Mamaeva N.Yu., Velikova T.D., Goryaeva A.G. Biodamage of paper by micromycetes under conditions of different illumination. Abstracts of the IV congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia". Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2017, vol. 6, pp. 418–420.
40. Popikhina E.A., Trepova E.S. Microdestructors of building materials. Tez. reports of the IV congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia". Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2017, vol. 6, pp. 424–426.
41. Khalmuradova P.A., Mezitova L.D., Alatbi A.Kh. et al. Micromycetes-destructors of old buildings in Kazan: analysis of metabolites and selection of biocides. Abstracts of the IV congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia". Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2017, vol. 6, pp. 415.
42. Georgieva M.L., Grum-Grzhimailo A.A., Yamnova I.A., Bilanenko E.N. Filamentous fungi in the soils of sulfate-soda salinization of the Gobi Desert (Mongolia). *Mikologiya i fitopatologiya*, 2012, vol. 46, 1, pp. 27–32.
43. Redkina V.V. Biological activity of primary soils on nepheline sands of tailing dumps of JSC "Apatit" (Murmansk region). Biological monitoring of natural-technogenic systems: materials of All-Russian. scientific-practical conf. with Int. participation. Kirovsk: Loban, 2011, part 1, pp. 148–152.

44. Evdokimova G.A., Korneikova M.V., Lebedeva E.V., Kalmykova V.V. Micromycetes in sands and sandy soils of natural and technogenic genesis. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2009, vol. 43, is. 2, pp. 84–92.
45. Rojas T. I., Aira M. J., Batista A. et al. Fungal biodeterioration in historic buildings of Havana (Cuba). *Grana*, 2012, vol. 51, is. 1, pp. 44–51.
46. Sumina O.I., Vlasov D.Yu., Dolgova L.L., Safronova E.V. Features of the formation of communities of micromycetes in overgrown sand pits in the north of Western Siberia. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*, Ser. 3, 2010, is. 2, pp. 84–90.

Информация об авторах

Кривушина Анастасия Александровна, старший научный сотрудник, к.б.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anastasia A. Krivushina, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Bio.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valery O. Startsev, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.11.2021; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 10.12.2021.
The article was submitted 30.11.2021; approved after reviewing 10.12.2021; accepted for publication 10.12.2021.

Р Е Ш Е Н И Е

**ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ АВИАЦИОННОГО ОСТЕКЛЕНИЯ»**

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва
10 декабря 2021 г.

В работе конференции «Функциональные и полимерные материалы для авиационного остекления» (далее – конференция), организованной НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, приняли участие представители организаций и высших образовательных учреждений, разрабатывающих функциональные и полимерные материалы для авиационного остекления.

После заслушивания докладов по тематике конференции и обмена мнениями участники приняли решение:

1. Отметить чрезвычайную важность развития в стране направления «Разработка комплекса материалов остекления на основе акрилатных, поликарбонатных полимерных стекол, слоистых и гетерогенных материалов с заданными оптико-физическими и функциональными свойствами, высокой надежностью и климатической стойкостью для гражданской и государственной авиационной техники» в рамках реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». Особого внимания для решения материаловедческих задач требуют вопросы создания функциональных и полимерных материалов для авиационного остекления, включая исходную компонентную базу для их изготовления, а также создания функциональных и защитных покрытий, склеивающих и герметизирующих материалов.

2. Для обеспечения технологической независимости Российской Федерации от зарубежных поставщиков авиационных органических и силикатных стекол, материалов для монтажа деталей остекления отметить особую актуальность разработки функциональных и полимерных материалов для авиационного остекления, необходимость усовершенствования промышленных технологий их изготовления.

Организационному комитету конференции сформировать и направить в Минпромторг России предложения по включению в дорожную карту по мало- и среднетоннажной химии организацию производства сырьевых компонентов в РФ для получения авиационных материалов остекления (в том числе для изготовления склеивающих поливинилбутиральных и полиуретановых пленок, термо-, светостабилизаторов, инициаторов).

3. Отметить необходимость разработки высокотемпературных органических стекол для остекления сверхзвуковых самолетов и теплонагруженных деталей летательных аппаратов.

4. Отметить актуальность исследований по созданию птицестойких монолитных органических стекол с повышенной эластичностью тонких номиналов для применения в вертолетной технике.

5. Отметить необходимость поиска альтернативных технологий получения исходных продуктов отечественного производства для авиационного остекления.

6. Разработчикам авиационной техники обратить особое внимание на важность создания научно-технического задела при проектировании и изготовлении деталей

остекления перспективных самолетов и вертолетов, а также необходимость проведения мероприятий по технологическому опробованию новых материалов.

Участникам конференции сформировать предложения по применению новых материалов для остекления в конструкциях авиационной техники, а также предложения по разработке новых технологий и материалов для нужд авиационной промышленности и направить их в адрес НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

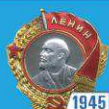
7. С учетом требований к работоспособности авиационной техники в условиях различных регионов отметить необходимость проведения исследований материалов для авиационного остекления в различных климатических зонах при комплексном воздействии различных факторов.

Участники выразили признательность руководству НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ за высокий уровень организации научно-технической конференции «Функциональные и полимерные материалы для авиационного остекления». По их общему мнению, целесообразно проведение семинаров и конференций по данной тематике на базе промышленных предприятий и отраслевых институтов.

Настоящее решение обсуждено и согласовано с участниками конференции.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ВИАМ – ВЕДУЩИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР В ОБЛАСТИ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ



- Реализует полный инновационный цикл – от фундаментальных и прикладных исследований до создания высокотехнологичных наукоемких производств по выпуску материалов нового поколения, полуфабрикатов и уникального технологического оборудования.
- Разрабатывает и поставляет широкую номенклатуру металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов и средств защиты от коррозионных поражений и биоповреждений с возможностью осуществления поставки продукции под контролем ВП МО РФ.

На основании одобренного Президентом Российской Федерации В.В. Путиным принципа создания отрасли малотоннажных производств в материаловедческих НИИ и ГНЦ в ВИАМ создано:

25 высокотехнологичных
наукоемких производств по выпуску
253 наименований материалов
и полуфабрикатов

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

- Включает 19 комплексов уникальной стендовой и испытательной базы.
- Проводит более 1000 видов исследований и испытаний на 1100 единицах исследовательского и испытательного оборудования.
- Аккредитован в качестве технически компетентного центра Росавиацией, Российским морским регистром судоходства, филиалом ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, признан компанией Snecma группы SAFRAN.
- Включен в международную сеть станций климатических испытаний Atlas Material Testing Technology LLC.



УЛЬЯНОВСКИЙ
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР



Разработка технологий и производство полуфабрикатов и изделий из ПКМ.

ГЕЛЕНДЖИКСКИЙ
ЦЕНТР КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИМ. Г.В. АКИМОВА



Единственный в России соответствующий международным стандартам центр климатических испытаний материалов, средств защиты от коррозии, старения и биоповреждений при одновременном воздействии нагрузок и коррозионной среды.

ВОСКРЕСЕНСКИЙ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР



Разработка технологий и производство бериллийсодержащих сплавов, полимерных связующих, препрегов, материалов для безэховых камер.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.pф; www.viam.ru



МОДИФИКАТОР АЛЮМИНАТ КОБАЛЬТА МАРОК АК-1, АК-2, АК-3 ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕГЛАМЕНТИРОВАННОЙ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МАКРОСТРУКТУРЫ ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

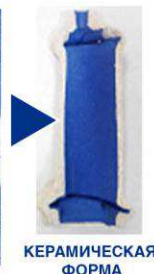
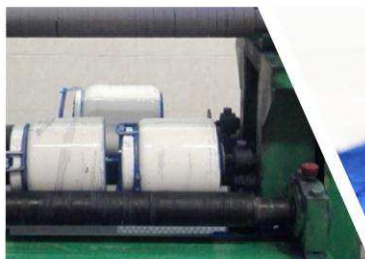


**СОДЕРЖАНИЕ СВОБОДНОГО КОБАЛЬТА
В МОДИФИКАТОРЕ – МЕНЕЕ 2%,
ЧТО ПОЗВОЛЯЕТ ИСКЛЮЧИТЬ
ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
С РАСПЛАВЛЕННЫМ МЕТАЛЛОМ
И ПОЛУЧИТЬ ОТЛИВКУ БЕЗ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ.**

При производстве алюмината кобальта марок АК-1, АК-2, АК-3 используются исходные материалы с низким содержанием щелочных металлов, что приводит к увеличению живучести суспензии при изготовлении керамических оболочковых форм.

Производственные мощности

3 000 кг алюмината кобальта
в год



КЕРАМИЧЕСКАЯ
ФОРМА



Лопатка, полученная
без модификатора
(А)
и с модификатором
(Б)

Показатели	Значения показателей алюмината кобальта марки		
	АК-1	АК-2	АК-3
Содержание свободного кобальта, %	<2	<2	<2
Удельная поверхность, см ² /г	4500–6500	8000–10000	10000–12000

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЮМИНАТА КОБАЛЬТА ОБЕСПЕЧИВАЕТ:

- повышение плотности;
- снижение ликвационной неоднородности;
- измельчение макрозерна и фрагментов микроструктуры металла отливок.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.pф; www.viam.ru



АЛЮМИНИЕВЫЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ СПЛАВЫ



**РАЗРАБОТКА НОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ
ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ
И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ НИХ, СЛОИСТЫХ
АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКОВ (СИАЛ)**



Сопровождение промышленного производства, решение научных и технических задач в области материаловедения алюминиевых сплавов.

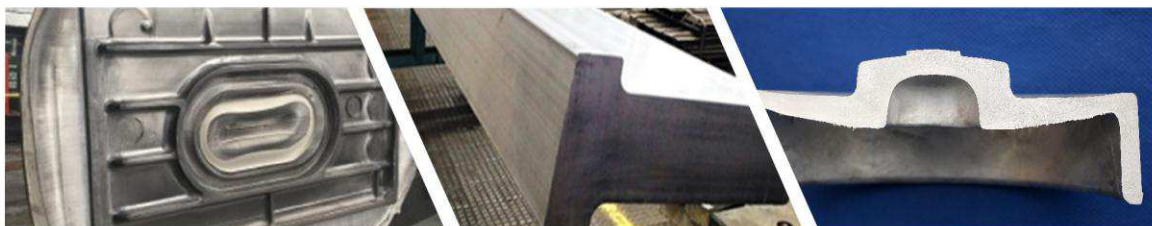
**Термическая обработка полуфабрикатов
и деталей из алюминиевых сплавов**

до 30 000 кг заготовок деталей
в год

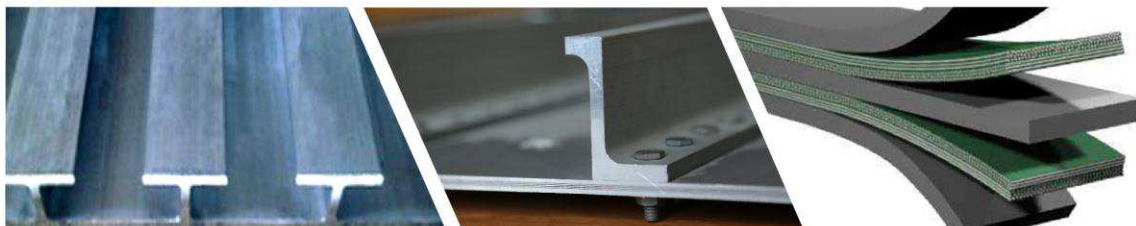
**Металлографический анализ структуры
алюминиевых сплавов**

300 шт. образцов
в год

Полуфабрикаты из новых алюминиевых деформируемых сплавов



Гибридные материалы на основе листов алюминия



ВИАМ ПРЕДЛАГАЕТ:

- разработку и технологическое сопровождение производства алюминиевых деформируемых сплавов и слоистых алюмо-стеклопластиков (СИАЛ);
- проведение работ по выявлению причин разрушения изделий и производственного брака полуфабрикатов из алюминиевых деформируемых сплавов;
- проведение термической обработки алюминиевых сплавов.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.pф; www.viam.ru



ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ



**ВЫПУСКАЕТСЯ ШИРОКАЯ НОМЕНКЛАТУРА
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ВЫСОКОМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УРОВНЕ**



**Производственные
мощности:**

30 000 м² углеродных тканей в год

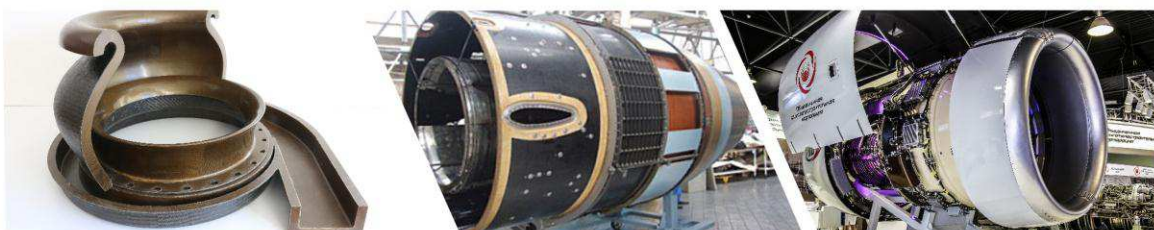
9 пропиточных линий

80 000 м² препрегов в год

90 000 кг связующих в год



Во ФГУП «ВИАМ» разработаны углепластики, стеклопластики и органопластики с рабочей температурой от -60 до +350°C.



Разработанные материалы применяются в различных изделиях авиационного назначения.

ВИАМ ПРЕДЛАГАЕТ:

- углеродные ткани – ВТкУ-2.200, ВТкУ-2.280, ВТкУ-2.200Т, ВТкУ-3;
- углепластики – ВКУ-39/ВТкУ-2.200, ВКУ-39/ВТкУ-2.280, ВКУ-29/ВТкУ-3, ВКУ-28/SYT55(S), ВКУ-25/SYT49S, ВКУ-30K.UMT49, ВКУ-30K.SYT49(S), ВКУ-57, ВКУ-45Ж/UMT-12K.ОЖН, ВКУ-45/UMT-3K.PTH, ВСП-3М/SYT55(S)-12K, ВСП-3М/ВТкУ-2.280, КМУ-11-М-2.200, ВКУ-38ТР, ВКУ-38ЖН;
- стеклопластики – ВПС-48/7781, ВПС-48/120, серия КМКС-2м. и КМКС-4, ВПС-53/120, ВПС-53/Т-25, ВСП-3М/Т-25, ВПС-31, ВПС-47/7781, ВПС-59/290, ВПС-42П/Т-64, ВПС-39П, СТ-69Н;
- органопластики – Органит 11ТЛ, Органит 12Т(М), ВКО-20, ВКО-2ТБ, Оргалон АФ-1М;
- гибридные материалы – ВКГ-5, ВСП-3М/РВМПН-10-400/SYT45-3К.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ppf; www.viam.ru



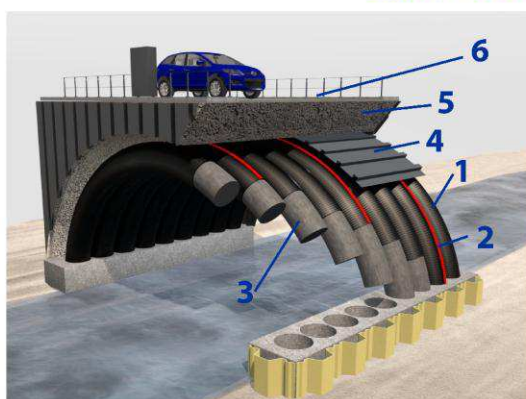
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ



РАЗРАБОТАНЫ И РЕАЛИЗОВАНЫ
В КОНСТРУКЦИЯХ ПОЛИМЕРНЫЕ
КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ГРАЖДАНСКИХ ОТРАСЛЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ



БЫСТРОВОЗВОДИМЫЙ МОСТ



- 1 – арочные элементы (углепластик ВКУ-51);
- 2 – датчики контроля напряженно-деформированного состояния на базе информкомпозитов;
- 3 – бетон;
- 4 – профнастил (стеклопластик ВПС-58);
- 5 – песчано-гравийная смесь;
- 6 – дорожное покрытие.



ВИАМ ПРЕДЛАГАЕТ:

- углеродные ткани – ВТКУ-2.200, ВТКУ-2.280, ВТКУ-2.200Т, ВТКУ-3;
- строительство быстровозводимых мостов с применением арочных оболочек из углепластика и листов профилированного настила до 20 м в соответствии с проектной документацией на мост «под ключ»;
- систему мониторинга мостового сооружения «под ключ» (ТУ26.51-014-07545412–2017) для отслеживания нагружения в режиме «реального времени»;
- лицензию на изготовление связующего ВСВ-43, арочных элементов из ВКУ-51, профнастила из ВПС-58;
- системы мониторинга.

ПКМ ДЛЯ СИЛОВЫХ СБОРОК



ПРЕИМУЩЕСТВА ИЗДЕЛИЙ:

- класс горючести – трудногорючие;
- водопоглощение 0,1%;
- высокая стойкость к агрессивным средам и коррозии.

ВИАМ ПРЕДЛАГАЕТ:

- эпоксидное связующее ВСЭ-39 (пултрузия/инфузия);
- опорные плиты;
- стеклопластик ВПС-61;
- углепластик ВКУ-49;
- электроизолирующие стяжки.

МАССА ИЗДЕЛИЯ
СНИЖЕНА НА

35%
(с 80 до 50 кг)

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ppf; www.viam.ru



ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ И ПОЛИМЕРНЫЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ



ВЫПУСКАЕТСЯ ШИРОКАЯ НОМЕНКЛАТУРА
ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ, РЕЗИН
И ПОЛИМЕРНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ
И ОГНЕЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.
ВЕДЕТСЯ РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУР
ДАННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ
ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

Производственные
мощности

3 000 кг

полисульфидных
герметиков
в год

10 000 кг

фторсилоксановых
герметиков
в год

20 000 кг

силоксановых
герметиков
в год

15 000 кг

полимерных теплозащитных
и огнезащитных материалов
в год



ВИАМ ПРЕДЛАГАЕТ:

- тиоколовые герметики: ВЭР-1, ВИТЭФ-1Б, ВИТЭФ-2НТ, ВТК-1-29, ВГМ-Л, ВГМ-Л-3;
- силоксановые герметики: ВИКСИНТ КТМ, Пенoгерметик ВПГ-300М, ВИКСИНТ У-20-92, ВИКСИНТ У-20-99;
- фторсилоксановые герметики: ВГФ-1, ВГФ-2, ВГФ-2М, ВГФ-8, УФ-7-21;
- полимерные теплозащитные и огнезащитные материалы: ВЗО-9, ВЗО-9Х, ВОЗП-4, ВШ-РС-1, ВШ-4, ТЗР-5М, ВТИ-3, 1-ВШ, ВШ-27Ф;
- теплоаккумулирующие материалы: В-ТАМ-50, ВТА-55, В-ТАМ-80, В-ТАМ-130;
- резина: ВР-38М, ВР-42;
- профилактические составы: ВИПС-1.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09 на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.pф; www.viam.ru



ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ



ВЫПУСКАЕТСЯ ШИРОКАЯ НОМЕНКЛАТУРА
СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ
ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ
И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ



Производственные
мощности

до 5 000 кг

литьевых
термопластов
в год

5 000 м²

тканепленочных
материалов
в год

500 кг

вибропоглощающих
материалов
в год

750 м²

акустических
материалов
в год

200 кг

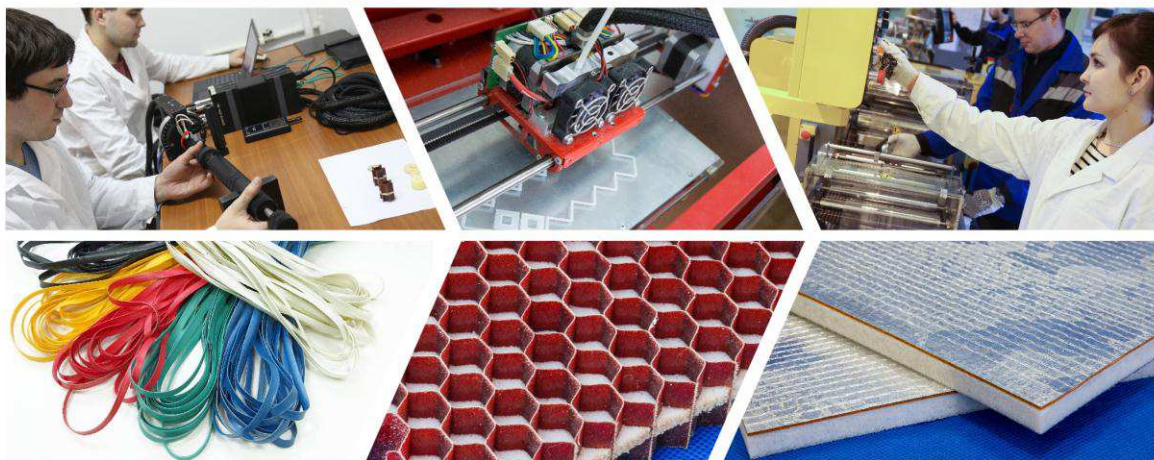
термопластичных
композиций для 3D-печати
в год

2 250 м²

СПП покрытия
в год

до 5 000 кг

полировочных
и шлифовальных паст
в год



ВИАМ ПРЕДЛАГАЕТ:

- литьевые термопласты и термоэластопласты марок ПК-М-2, ВТП-1-Л, ВТП-5, ВТП-7, ПА-12-Л, ВТЭП-3-Л;
- термопластичные ПКМ марок КТМС-1П, ВПС-38Т, КТМУ-1, ВКУ-43, ВКУ-44;
- термопластичные композиции для 3D-печати;
- полировочная паста ВИАМ-3;
- шлифовальная паста М-20;
- вибропоглощающие материалы марок ВТП-1В, ВТП-2В, ВТП-3В;
- акустические материалы марок ВЗМК-1, ВТИ-26;
- тканепленочные материалы марок ВРТ-9, ВРТ-10, ВРТ-11, ВРТ-12.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09 на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.pф; www.viam.ru



ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР



КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И КВАЛИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУФАБРИКАТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

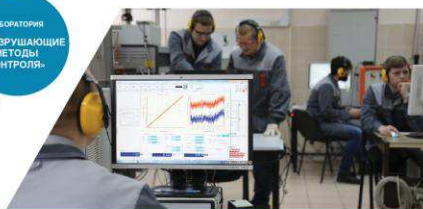


Испытательный центр
ВИАМ включает в себя:

>700 единиц испытательного
оборудования

>1000 видов исследований
и испытаний

>400 единиц исследовательского
оборудования



ИЦ ВИАМ аккредитован Федеральным агентством
воздушного транспорта (Росавиация) в качестве технически
компетентного испытательного центра



Московский и Геленджикский центры климатических
испытаний (МЦКИ ВИАМ и ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова)
включены в международную сеть станций климатических
испытаний Atlas Material Testing Technology LLC

ИЦ ВИАМ имеет аттестат аккредитации группы компаний
Safran, подтверждающий соответствие процедурам GRP-0087
«Перечень требований к поставщикам Safran,
участвующим в производстве продукции группы»
и GRM-0123 «Руководство для поставщиков»



Техническая компетенция ИЦ ВИАМ признана
Российским морским регистром судоходства

ИЦ ВИАМ аттестован филиалом ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России в качестве испытательного подразделения, соответствующего требованиям к технической компетентности и независимости, предъявляемым в руководящем документе РД В 319.02.70-08 «Аппаратура, приборы, устройства военного назначения. Требования к испытательным подразделениям и порядок их аттестации» (включая ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»)

ИЦ ПРЕДЛАГАЕТ:

- физико-механические испытания;
- спектральные, химико-аналитические исследования;
- разработку и поставку стандартных образцов материалов;
- исследования теплофизических свойств;
- исследования методами неразрушающего контроля;
- исследования на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность;
- металлофизические исследования.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.pf; www.viam.ru; isp.viam.ru

ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСИ СТАТЬИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ИЗДАНИЮ

1. Рукопись предоставляется в Редакционно-издательский отдел НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на бумажном и электронном носителях (программное обеспечение не ниже Windows'2003).

2. На рукопись должно быть оформлено Экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.

3. Рукопись должна быть подписана всеми авторами статьи.

4. К каждой рукописи на отдельной странице на русском и английском языках предоставляется реферат (объемом 500–600 знаков, включая пробелы), в котором кратко излагается основное содержание работы, и ключевые слова.

5. Фамилии авторов и название статьи должны иметь перевод на английский язык.

6. К рукописи должен быть приложен список авторов с указанием фамилии, имени, отчества (полностью), должности, номера телефона и адреса электронной почты.

7. Рекомендуются следующая структура рукописи:

- заголовок статьи;
- сведения об авторах;
- реферат;
- ключевые слова;
- введение;
- материалы и методы;
- результаты;
- обсуждение и заключения;
- благодарности (при необходимости);
- список литературы.

8. Рекомендуемый объем рукописи от – 15 000 до 30 000 знаков, включая пробелы.

9. Основные технические параметры рукописи:

- шрифт – Times New Roman;
- размер шрифта – 12;
- интервал – 1,5;
- поля: верхнее – 2; нижнее – 2,5; левое – 2,5; правое – 2,5;
- автоматическая расстановка переносов;
- набор формул в Microsoft Equation 3.0;
- штриховые рисунки должны быть выполнены в программе Microsoft Power Point или Microsoft Excel. На каждый рисунок должна быть ссылка в тексте;
- микроструктуры, фотографии приборов, оборудования должны быть представлены в электронном виде в программе Photoshop JPEG;
- размер иллюстраций не должен превышать формат А4;
- таблицы должны быть выполнены в программе Microsoft Word, пронумерованы и иметь тематические заголовки. На каждую таблицу должна быть ссылка в тексте;
- единицы измерения физических величин должны быть приведены в системе СИ.

10. Форма подачи рукописи:

- текст на бумажном носителе и в электронном виде отдельным файлом;
- пронумерованные рисунки на бумажном носителе и в электронном виде отдельными файлами;
- пронумерованные подписи к рисункам на бумажном носителе и в электронном виде отдельным файлом.

11. Список литературы, завершающий рукопись, должен быть тщательно выверен и унифицирован в соответствии с ГОСТ 7.0.5–2008.

Список литературы должен включать не менее 15 источников.

Последовательность ссылок в тексте должна строго соответствовать последовательности приведенного списка литературы.

Ссылки на неопубликованные работы (отчеты научно-исследовательских учреждений и заводов, стандарты предприятия и т. п.) не допускаются.

Допускается не более одной ссылки на работы, принятые к печати, с указанием номера издания, в котором планируется публикация.

Соблюдение данных правил облегчает работу научного редактора, рецензента и редактора, ускоряет подготовку статьи к печати.

По рекомендации научного редактора или рецензента статья может быть направлена авторам на доработку. После доработки авторы должны представить в редакцию первоначальный и доработанный варианты статьи с ответами на все вопросы и замечания научного редактора или рецензента.

Статья, находящаяся на доработке у авторов более одного месяца, рассматривается и принимается к публикации как вновь поступившая.



ТРУДЫ ВИАМ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09
E-mail: admin@viam.ru
www.ВИАМ.РФ; www.viam.ru