

На правах рукописи



Климов Вадим Геннадьевич

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ
НАПЛАВКОЙ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ
ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Специальность: 05.16.09 – «Материаловедение (машиностроение)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Никитин Владимир Иванович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Ковтунов Александр Иванович**
Доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» ФГБОУ ВО «Гольяттинский государственный университет»

Смелов Виталий Геннадиевич
Кандидат технических наук, зав. лабораторией аддитивных технологий, доцент кафедры «Технологии производства двигателей» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»**

Защита диссертации состоится « 4 » октября 2019 г. в 15:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.122.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева» по адресу: 443010, г. Самара, ул. Галактионовская 141, аудитория № 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», с авторефератом – на сайте: <http://lib.samgtu.ru>

Отзывы на реферат просим выслать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, учёному секретарю диссертационного совета Д999.122.02.
тел.: (846) 242-27-76, e-mail: mtm.samgtu@mail.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Альфия Расимовна Луц

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Газотурбинные агрегаты широко используются в авиации, в энергетике, в качестве судового или локомотивного двигателя. Благодаря применению газовых турбин как основного элемента авиационных двигателей были успешно решены вопросы достижения больших скоростей полета, превосходящих сверхзвуковые, значительной грузоподъемности в сочетании с высотой полета авиации различного назначения.

Проблема применения и развития ремонтных технологий в газотурбостроении весьма актуальна по причине постоянно возрастающих объемов производства, развития газотурбинных двигателей (далее – ГТД), а также интенсивным их внедрением в современную промышленность. Когда идет речь о таком дорогом в производстве изделии, как ГТД, следует задумываться о способах и путях снижения затрат при его применении. Стоит учесть высокую стоимость ГТД не только при изготовлении, но и при дальнейшей его эксплуатации. Одними из самых затратных деталей и сборочных единиц (далее – ДСЕ) при производстве ГТД являются комплекты литых лопаток турбины. Данные детали составляют значительную часть стоимости двигателя и именно они подвергаются основному износу при его эксплуатации. Восстановление лопаток ротора имеет наибольшую рентабельность из всех прочих деталей ГТД и является перспективной технологией, учитывая их впечатляющую себестоимость при производстве, а также высокие риски повреждения и выход из строя.

В данной работе учтен опыт многих исследователей, внесших свой вклад в развитие ремонтных технологий лопаток ГТД. На данный момент существует большое количество различных способов восстановления геометрии лопаток ГТД. Первые свидетельства о применении ремонтной технологии к деталям горячего тракта ГТД появились в 1971 году – компания «Pratt & Whitney» (PW) корпорации «United Technologies» (США) использовала высокотемпературную пайку для экспериментального ремонта лопаток соплового аппарата и жаровой трубы камеры сгорания газовой турбины. Спустя год в СССР в НПО «Сатурн» также осуществили ремонт сопловых секций лопаток с помощью высокотемпературной пайки. Причина, по которой высокотемпературная пайка стала первой разработанной технологией восстановления деталей горячего тракта, является то, что основные трудности аргонодуговой наплавки лопаток из жаропрочных сплавов связаны с их повышенной склонностью к образованию трещин, обусловленной высоким уровнем сварочных и объемных напряжений. Тем не менее, метод дуговой наплавки приобрёл широкое распространение ввиду его низкой стоимости и простоты применения. Первые примеры апробации данного метода при ремонте деталей горячего тракта ГТД описаны в 1976 г. в работах И.А. Пермиловского (ИЭС им. Е.О. Патона.), а также развитие данной тематики в работах Л.И. Сорокина (ФГУП «ВИАМ»). Перегрев лопатки от электрической дуги в зоне термического влияния образует область коагуляции и распада γ' -фазы интерметаллида Ni_3Al . Данный интерметаллид является основой жаропрочных свойств большинства деталей газовых турбин, производимых серийно. Перегрев от электрической дуги приводит не только к общему разупрочнению жаропрочных сплавов, но и к

обильному образованию трещин как в процессе наплавки, так и при последующей механической обработке припуска. С началом применения в производстве новых прогрессивных технологий, к которым относится лазерная наплавка, большинство авторов до сих пор отмечают проблематичность ремонта лопаток горячего тракта.

Среди современных авторов, посвятивших циклы своих работ изучению проблемы ремонта деталей горячего тракта, а также смежных тематик, можно отметить следующие научные коллективы и учёных: научный коллектив авторов (Земляков Е.Н., Климова О.В., Климова-Корсмик О.Г. и др.) во главе с профессором Г.А. Туричином (директор «Института лазерных и сварочных технологий» ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург); коллектив сотрудников ФГУП «ВИАМ» (Неруш С.В., Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Оспенникова О.Г., Семенов Б.И., Щербаков С.И. и др.) возглавляемый профессором Е.Н. Кабловым (генеральный директор ФГУП «ВИАМ», г. Москва); Мартышин Г.В. и Трунова В.Б. (сотрудники ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова, г. Москва); Неровный В.М., Михальцевич О.И., Хорунов В.Ф., Ключников И.П. и Рогов Р.М. (сотрудники МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва); Мурзин С.П., Смелов В.Г., Сотов А.В. (сотрудники ФГАОУ ВО «Самарский университет», г. Самара). Стоит также отметить немалый вклад современных учёных, таких как Никитин В.И., Никитин К.В. (ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара) и Анцифилов В.Н. (ГОУ ВПО «ПГТУ», г. Пермь), посвятивших свои работы исследованию вопросов наследственности в сплавах, а также использованию данного фактора при прогнозировании физико-химических свойств получаемых изделий.

На территории бывшего СССР область ремонтных технологий в авиастроении оставалась недостаточно разработанной по причине широкого применения 1-вой стратегии эксплуатации авиационных ГТД и частой полной замены комплектующих. До 1990 года рентабельность ремонта авиадвигателей оставалась на втором плане. В современной России при переходе к рыночной экономике ситуация кардинально изменилась, что породило бурный рост интереса к данной малоизученной области. Ресурс современных ГТД российского производства значительно отстаёт от зарубежных аналогов, и как следствие – поиск возможных путей решения данной проблемы является технически сложной, актуальной научной и практической задачей.

Целью работы является продление ресурса лопаток ГТД из жаропрочных сплавов путем разработки технологии восстановительной лазерной импульсной наплавки, позволяющей производить управление структурой присадочных порошковых высоколегированных никелевых материалов с получением необходимых эксплуатационных характеристик.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Анализ работ отечественных и зарубежных исследователей, а также опыта применения ремонтных технологий лопаток ГТД. Исследование характера повреждений лопаток ротора турбины турбостартера авиационного двигателя НК-12МП/МПП, а также установление причин образования дефектов.

2. Выбор основных материалов и методов восстановления лопаток ТС, основываясь на предварительном анализе.

3. Экспериментальное определение КТЛР наплавленных порошковых материалов в сравнении с материалом лопатки ТС для выявления склонности к образованию трещин.

4. Исследование износостойкости наплавленных порошковых материалов и определения наилучших результатов для последующего увеличения ресурсных показателей лопаток.

5. Экспериментальное определение предела выносливости, восстановленных лазерной наплавкой лопаток в сравнении с новыми лопатками (не проходившими эксплуатацию), путём проведения стендовых многоцикловых усталостных испытаний. Проведение фрактографического исследования и анализ усталостного разрушения лопаток.

6. На основе проведенных комплексных экспериментальных и теоретических исследований осуществлен выбор наиболее оптимальных высоколегированных никелевых порошков для восстановления лопаток, а также режимов лазерного воздействия для наплавки. Разработка и внедрение в производство технологии восстановления лопаток ТС.

Методы исследования и достоверность научных результатов. Для реализации поставленных целей и задач в работе применялись современные методы электронно-микроскопического и элементного анализов, стандартные методики измерения микротвёрдости, люминесцентной и рентгеновской дефектоскопии и проведения стендовых испытаний на циклическую усталость восстановленных лопаток ГТД с применением современного аттестованного оборудования заводских лабораторий предприятия ПАО «Кузнецов». Помимо выше перечисленного были применены оригинальные запатентованные методики испытаний на локальный абразивный износ и измерения КТЛР на оборудовании лабораторий ФГБОУ ВО «СамГТУ». Достоверность результатов работы подтверждается использованием известных положений фундаментальных наук, хорошей согласованностью теоретических и экспериментальных данных с исследованиями других авторов.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Впервые исследован процесс применения порошковых высоколегированных никелевых материалов типа ВПр в качестве присадочного материала при лазерной наплавке. Реализован и изучен процесс импульсной лазерной наплавки данных порошков на перо лопатки ГТД.

2. Впервые установлены и показаны закономерности влияния скорости нагрева и кристаллизации в широком диапазоне температур на структуру и свойства порошковых высоколегированных материалов типа ВПр. Выявлен комплекс свойств наплавленных сплавов типа ВПр, получаемый при определенных условиях охлаждения, позволяющий им эффективно сопротивляться абразивному износу.

3. Выявлена структурная наследственность в наплавляемых материалах. Показано, что при лазерной наплавке в условиях высокоскоростного охлаждения возможно наследование структуры и свойств, близких к исходным порошковым материалам.

4. Установлены закономерные связи структуры и свойств наплавленных порошковых припоев типа ВПр от режимов лазерного воздействия. Исследована зависимость эксплуатационных характеристик сплава ВПр11-40Н от скорости кристаллизации и влияние на неё режимов лазерной наплавки.

Практическая значимость работы:

1. Разработана технология лазерной наплавки, позволяющая восстанавливать лопатки ротора ГТД из жаропрочных сплавов без потери когерентности упрочняющей структуры γ' -фазы Ni_3Al и запаса усталостной прочности, что позволяет сохранить и продлить ресурс лопаток в эксплуатации.

2. При помощи разработанного оригинального метода лазерной наплавки реализовано локальное модифицирование контактных поверхностей пера высоконагруженных лопаток ротора ГТД из жаропрочных сплавов, обеспечивающие восстановление и повышение износостойкости с высокой экономической эффективностью за счёт большого коэффициента использования присадочного материала и применения бюджетного оборудования.

3. Найдено альтернативное применение порошковым припоям типа ВПр, в качестве износостойких присадочных материалов при лазерной наплавке, что соответствует политике отечественного импортозамещения. Предлагаемые материалы обладают низкой рыночной стоимостью, высокими рабочими температурами, и имеют сертификат АО «РТ-Техприёмка» (АО «Авиатехприёмка»), что позволяет использовать их при ремонте в авиационном двигателестроении (в том числе в военной авиации).

4. Предложены технологические режимы лазерной импульсной наплавки, обеспечивающие высокие износостойкие и прочностные свойства сплавляемых порошковых жаропрочных материалов типа ВПр.

5. Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технологический университет».

Положения, выносимые на защиту:

1. Исследования по применению порошковых никелевых сплавов типа ВПр в качестве износостойких присадочных материалов при лазерной импульсной наплавке, в том числе результаты анализа коэффициента теплового линейного расширения, износостойких свойств, микротвердости и металлографии структуры наплавленных материалов серии ВПр.

2. Анализ зависимости физико-механических свойств сплава ВПр11-40Н от скорости охлаждения, а также управления литой структурой наплавки данного материала посредством изменения режимов лазерного излучения с целью получения необходимых эксплуатационных характеристик.

3. Результаты стендовых усталостных испытаний на определение предела выносливости восстановленных лазерной наплавкой лопаток ГТД с последующим фрактографическим исследованием зон разрушения в целях подтверждения возможности использования сплавов ВПр при ремонте.

4. Технология восстановления геометрии лопаток ГТД оригинальным методом лазерной порошковой наплавки, повышающая износостойкость

контактных поверхностей пера в целях продления ресурса данных деталей в эксплуатации.

Апробация работы и основные достижения. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих научно-технических мероприятиях: VII Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы машиностроения-2015» (г. Самара, 2015г.); 14-я международная конференция «Авиация и космонавтика-2015» (г. Москва, 2015г.); XIII Всероссийский молодёжный конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике (г. Самара, 2015г.); LXIII Всероссийская научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин (г. Рыбинск, 2016); VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы машиностроения-2016» (г. Самара, 2016г.); Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения-2016», посвященная Генеральному конструктору аэрокосмической техники академику Н.Д. Кузнецову (г. Самара, 2016г.); Международная конференция «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении-2016» (г. Томск, 2016г.); Международная конференция «Современные технологии и материалы новых поколений-2017» (г. Томск, 2017г.); 16-я международная конференция «Авиация и космонавтика-2017» (г. Москва, 2017г.); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг-2018» (г. Москва, 2018г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 27 работ, в том числе: 1 (одна) работа, опубликованная в издании, входящего в базу международного цитирования Scopus; 10 работ, опубликованных в изданиях, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК РФ; 16 работ, опубликованных в прочих изданиях.

Значимые достижения по результатам диссертационной работы:

1. Получен диплом (1 место) с присуждением гранта при участии во Всероссийском VII конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики-2015» (Москва, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт», 16 – 20 ноября 2015 г.);

2. Получен диплом (2 место) с присуждением гранта при участии во Всероссийском X конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики-2018» (Москва, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт», 26 – 30 ноября 2018 г.);

3. Получен диплом (1 место) с присуждением гранта при участии во Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ в области инженерных и гуманитарных наук посвященного 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, сентябрь 2018 г.).

Личный вклад автора. В рамках диссертационного исследования автором лично выполнены следующие работы:

1. Проведение экспериментальных работ, связанных с ремонтом лопаток ГТД методом лазерной наплавки.

2. Проведение экспериментальных исследований, включая испытания на локальный абразивный износ, анализ структуры на электронном растровом

микроскопе, измерения микротвёрдости и КТЛР, рассматриваемых в работе материалов, участие при проведении стендовых усталостных испытаний.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 154 наименований. Работа содержит 78 рисунков, 4 таблицы. Объем работы составляет 178 страниц.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности проблемы и темы диссертационной работы, обозначена новизна исследования, описаны объект и предмет исследования, произведена постановка цели и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также дана краткая характеристика работы.

В первой главе приведён обзор научной литературы, соответствующий теме диссертационной работы. Произведен научный анализ трудов отечественных и зарубежных учёных, посвященных теме исследования, с целью определения степени разработанности данной тематики и актуальных направлений дальнейших областей исследования. Рассмотрены основные виды лопаток компрессора и турбины ГТД, обозначены основные проблемы, связанные с поддержанием их ресурса, ремонта и восстановления рабочих характеристик, дана оценка экономической эффективности восстановления данных ДСЕ. Показаны различные варианты повреждений лопаток ГТД в процессе эксплуатации. Обозначена связь данной тематики с развитием ремонтных технологий деталей холодного и горячего тракта ГТД на территории РФ, бывших республик СССР и других иностранных государств. Приведены и описаны основные результаты исследований по данной теме ведущих учёных России и стран зарубежья.

Проведен анализ объекта исследования – лопатки ротора турбины турбостартера ТС-12М турбовинтового двигателя НК-12МП/МПМ (далее – лопатка ТС), даны основные характеристики и условия эксплуатации. Проведён анализ наиболее часто встречающихся повреждений данных лопаток, исследован характер износа. Предложен и обоснован метод восстановления лопаток ТС – лазерная наплавка. Подробно описаны особенности свариваемости дисперсионно-твердеющих жаропрочных сплавов на Ni-Cr основе, в частности сплавов с высоким содержанием упрочняющей γ' -фазы (45–90%) интерметаллида Ni_3Al .

В заключении данной главы приведены общие выводы по совершенному анализу, сформулированы задачи настоящего диссертационного исследования.

Во второй главе определены и описаны методы исследования, испытаний, а также применяемое лабораторное оборудование и приборы: измерения коэффициента теплового линейного расширения исследуемых материалов (далее – КТЛР) на механическом дилатометре лаборатории кафедры «ЛиВТ» ФГБОУ ВО «СамГТУ» (г. Самара); сравнительные испытания на локальный абразивный износ проводились на оборудовании собственной разработки лаборатории наноструктурированных покрытий ФГБОУ ВО «СамГТУ» (г. Самара) – установке Универсал-1А; металлографические исследования и

элементный анализ структуры сплавов производились посредством растровой сканирующей электронной микроскопии на электронном сканирующем микроскопе фирмы «Tescan» (Чехия) модели VEGA3 LM с модулем Oxford instruments X-Max; микротвёрдости исследуемых материалов производилось на микротвердомере фирмы «EMCO-TEST PrufmaSchinen GmbH» (Австрия) модели DuraScan-20; контроль на наличие трещин проводился по стандартной методике капиллярным методом ЛЮМ1-ОВ (ОСТ 1 90282-79 «Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы»); контроль на наличие внутренних дефектов проводился стандартным рентгенографическим методом по ГОСТ 7512-82 (нормы дефектов по ОСТ 1 01197-2008 «Авиационные двигатели и их составные части. Лазерная сварка особо ответственных элементов конструкций газотурбинного двигателя. Общие технические требования»); сравнительные многоцикловые усталостные испытания на определение предела выносливости восстановленных лопаток проводились на электродинамическом стенде модели ВЭДС-400 по стандартной методике (ОСТ 1 00870-77 «Лопатки газотурбинных двигателей. Методы испытаний на усталость») в научно-исследовательской лаборатории ПАО «Кузнецов»; фрактографический анализ зон образования усталостных трещин в теле исследуемых лопаток проводился на электронном микроскопе VEGA3 LM.

В третьей главе выполнено обоснование выбора присадочных материалов для восстановления поврежденных зон литых лопатки ТС. Вследствие того, что лопатка ТС имеет абразивный характер износа пера, выбор был сделан в пользу порошковых присадок с повышенными износостойкими свойствами. Приведён обзор основных распространённых методов производства порошковых материалов, применяемых в авиационной промышленности, а также представлен разработанный метод порошковой лазерной наплавки. В работе рассматриваются различные присадочные материалы для последующей наплавки, среди которых порошковые высокотемпературные никелевые сплавы типа ВПр, разработанные ФГУП «ВИАМ» (г. Москва) и композитный порошковый материал с механической примесью плакированного литого карбида вольфрама ($WC-W_2C$) марки Рок-Дюр 6040 из серии «Сфекорд Рок-Дюр» производства ООО «СП Техникорд» (г. Москва). Порошковый наплавочный материал Рок-Дюр взят в качестве классического износостойкого композита для сравнения износостойких и эксплуатационных характеристик с другими исследуемыми сплавами. По утверждению производителя данный материал обладает высокой абразивной износостойкостью в сочетании с сопротивлением давлению. В таблице 1 приведены данные по основным материалам, исследуемым в настоящей работе.

Таблица 1 – Исследуемые материалы и их характеристики

Материал	Нормативный документ	Классификация	Основные компоненты	Дисперсность, мкм	Рабочая температура, °С
ЖС6К	ТУ 1-809-1025-98	Жаропрочный литейный сплав	Ni-Cr-Al-W-Mo-Co-Ti-Si-C	-	до 1000
ВПр11-40Н	ТУ 1-809-108-91	Высокотемпературный литой порошковый припой	Ni-Cr-Al-Fe-Co-B-Si-C	100-250	до 900
ВПр24	ТУ 1-809-838-89	Высокотемпературный литой порошковый припой	Ni-Co-Cr-Nb-W-Al-Mo-Ti-Si-B-C	20-350	до 1050
ВПр27	ТУ 1-595-4-1021-2007	Высокотемпературный литой порошковый припой	Ni-Co-Cr-W-Si-Mo-Al-Nb-B-C	20-300	до 1000
Рок-Дюр 6740	ТУ 1526-001-86297481-2008	Композиционный порошок на основе Ni с добавлением литого плакированного карбида вольфрама.	60% (Ni-Cr-B-Si-C) + 40% [88(WC-W ₂ C) + 12% (Ni-Cr-B-Si-C)]	50-200	до 700

Дополнительно проведено углубленное исследование морфологии выбранных порошковых присадочных материалов посредством электронной микроскопии (рис. 1).

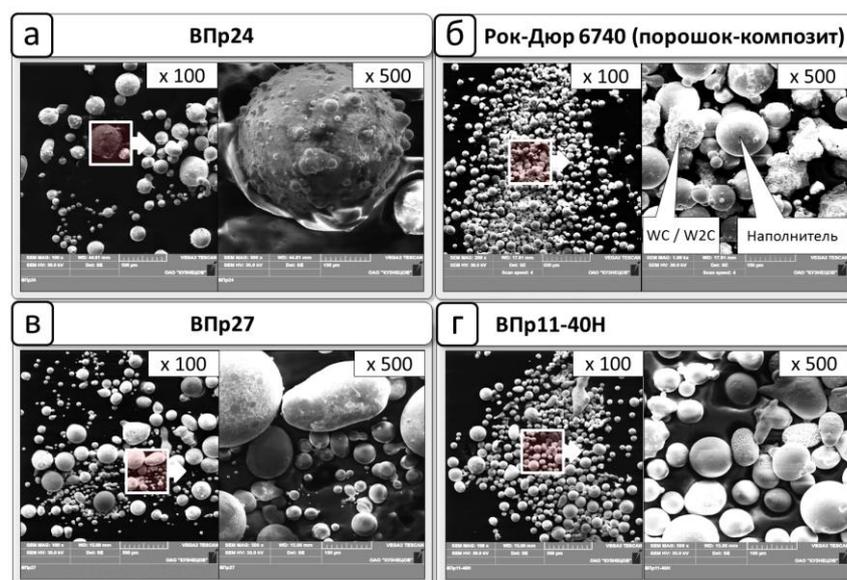


Рисунок 1 – Морфология порошков: а – ВПр24; б – Рок-Дюр 6740; в – ВПр27; г – ВПр11-40Н

Порошки марок ВПр применяются в качестве припоев при высокотемпературной пайке и к ним предъявляются менее жёсткие требования по сферичности и дисперсности, в отличие от порошков, используемых при селективном лазерном синтезе. Тем не менее, исходя из анализа морфологии, порошок марки ВПр11-40Н обладает незначительным разбросом по дисперсности, приемлемой сферичностью и лишён обильного количества сателлитов, которые можно наблюдать на гранулах порошка ВПр24.

Разработанный метод наплавки не предъявляет жёстких требований к качеству порошкового материала и может применяться с порошками дисперсностью 50-500 мкм, что облегчает повторное использование отработанного присадочного материала после просеивания. Ремонтная

технология предполагает применение импульсной лазерной наплавки, производимой на установке ALFA-300 (изготовитель ООО «ЛазерФорм», Россия, г. Зеленоград), с применением разработанной универсальной модульной оснастки, представленной на рисунке 2.

Общая длительность технологического процесса при восстановлении среднестатистической лопатки, включая операции сборки с оснасткой, наплавки и замены порошка составляет не более 7 мин. В оснастке имеются сменные модули-вкладыши для различных типов лопаток, изготавливаемые индивидуально. Через данные вкладыши подаётся инертный газ для дополнительной защиты от окисления сварочной ванны при наплавке. Присадочный порошок после процесса наплавки заменяется на новый, а отработанный проходит процесс просева через вибросита.



Рисунок 2 – Процесс лазерной импульсной наплавки в «порошковой ванне» с применением универсальной модульной оснастки

Четвертая глава посвящена материаловедческому исследованию факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики наплавочных материалов и материала основы лопатки ТС – сплава ЖС6К, для определения которых производились следующие исследования: определение КТЛР исследуемых в работе материалов; металлографическое исследование структуры наплавленных порошковых сплавов и их микротвердости; определение износостойкости наплавленных сплавов, а также влияние температурного воздействия на уровень сопротивления износу; подробный элементный анализ структуры сплавов в различном фазовом состоянии; определение зависимостей характеристик сплавов от их фазового состояния.

Одним из основных факторов влияющих на свариваемость сплавов при наплавке является близкий показатель КТЛР материала присадки и подложки. На рисунке 3 представлены результаты измерения КТЛР исследуемых материалов, по данным которого определены два материала (ВПр27 и ВПр11-40Н) наиболее близкие по тепловому расширению к показателям материала основы – сплава ЖС6К. Данное сходство снизит вероятность образования горячих и холодных трещин в процессе наплавки.

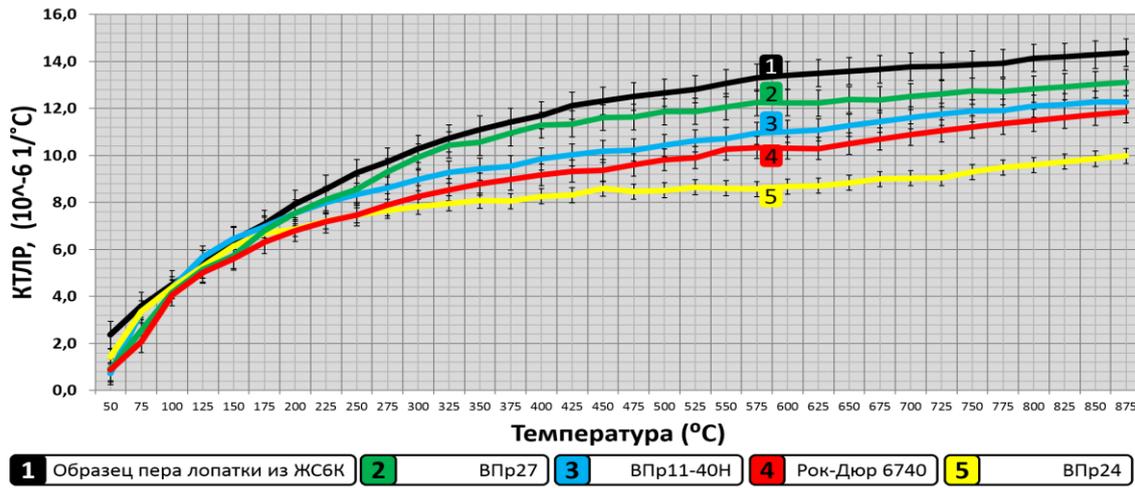


Рисунок 3 – Результаты измерения КТЛР исследуемых материалов

Для определения уровня свариваемости и качества наплавки, а также выявления параметра твердости было произведено металлографическое исследования, представленное на рисунке 4. Зоны лазерной наплавки всех припоев типа ВПр имеют схожую структуру, представляющую дендритный каркас с сетью мелких аустенитных зерен на основе никеля диаметром в среднем 5-13 мкм (9-12 балл), по границам которых распределяются мелкодисперсные твердые соединения на основе Cr, W, Mo или Nb. В сплаве ВПр27 (рис. 4в) формируется наиболее мелкодисперсная структура (размер дендритной ячейки 5,5 мкм, что соответствует 12-му баллу).

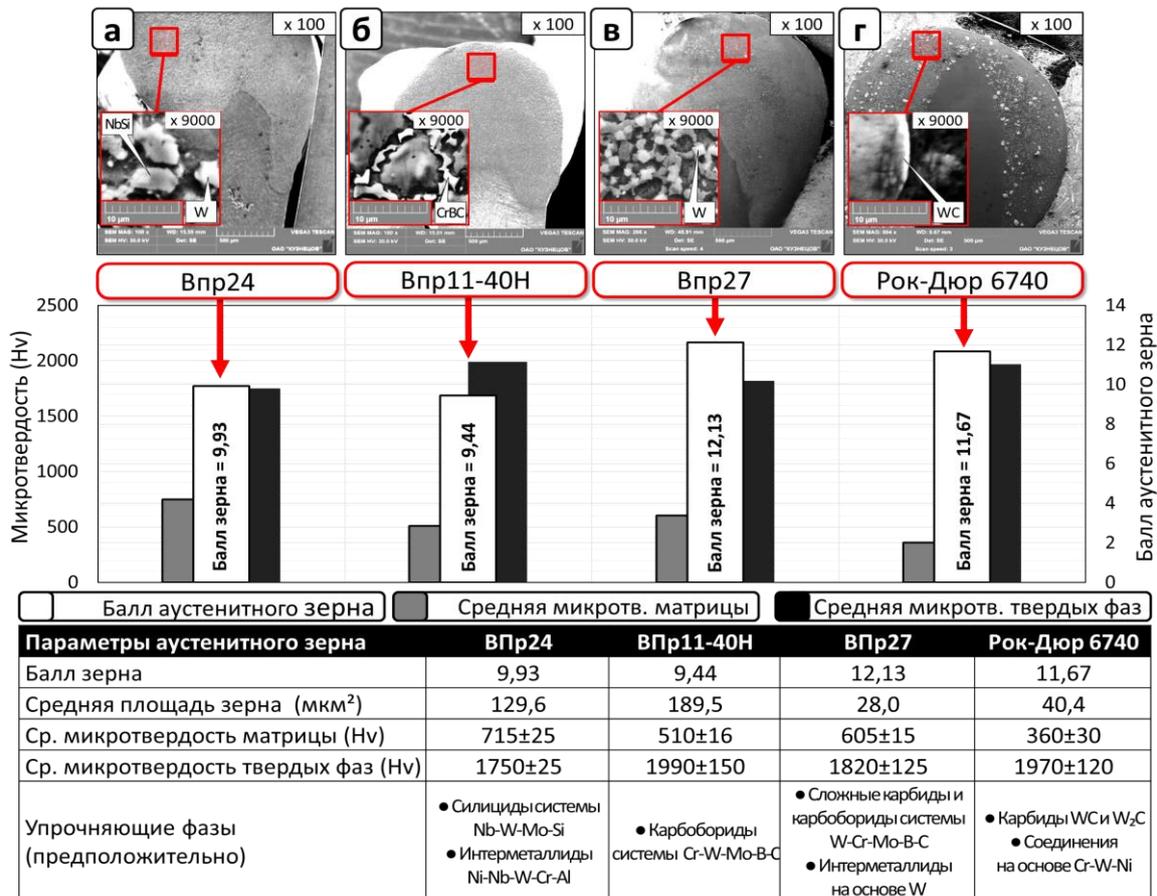


Рисунок 4 – Структура, упрочняющие фазы и микротвердость наплавленных слоёв: а – ВПр24; б – ВПр11-40Н; в – ВПр27; г – Рок-Дюр 6740

Лазерное импульсное излучение, как метод нанесения покрытия, формирует мелкодисперсную структуру наплавляемого порошкового материала припоев с предположительно интерметаллидной и карбидной сеткой и минимальным влиянием на структуру основного материала подложки (лопатки ТС). Зона сплавления составляет в среднем 20-50 мкм, а зона термического влияния, которая может послужить разупрочнению сплава ЖС6К за счёт распада γ' -фазы интерметаллида Ni_3Al , практически отсутствует.

Наплавка композитного порошка Рок-Дюр 6740 (рис. 4г) формирует структуру с явно выраженными включениями карбидов (WC/W_2C) размером порядка 20-80 мкм. В нижней части рисунка 4 (таблица) приведены результаты измерения микротвердости зон лазерных наплавов.

После лазерной наплавки у высокотемпературных порошковых припоев типа ВПр наблюдался существенно меньший разброс микротвердости по всему объёму наплавленного слоя в сравнении с износостойким сплавом Рок-Дюр 6740. Данный факт обусловлен образованием у сплавов типа ВПр мелкодисперсного дендритного каркаса 1-го и 2-го порядка, с насыщением по границе дендритных ячеек твердыми упрочняющими фазами. За данную особенность сплавы можно причислить к классу естественных композитов, способных к самоорганизации структуры в процессе набавки.

Для определения сопротивления абразивному изнашиванию торца пера лопатки ТС был проведён ряд сравнительных испытаний на износостойкость наплавленных образцов, по результатам которых была построена диаграмма, представленная на рисунке 5. Видно, что наибольшей износостойкостью обладают наплавки порошковых припоев ВПр11-40Н и ВПр27, сравнимой со стойкостью карбидосодержащего материала Рок-Дюр 6740.

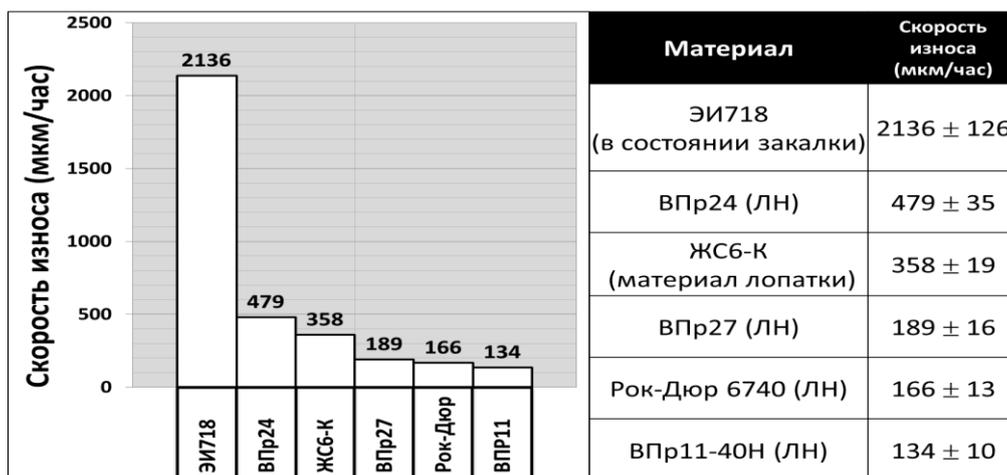


Рисунок 5 – Результаты испытаний на локальный абразивный износ

Необходимо учесть, что после обработки шлифованием припуска наплавки остается относительно небольшая зона износостойкого наплавленного слоя. Этот фактор критичен для композитов типа Рок-Дюр 6740, по причине неравномерного распределения карбидной фазы WC/W_2C , отвечающей за износостойкость наплавленного материала. В модифицированном слое может оказаться малое количество твердых фаз, что снизит общую стойкость к износу восстановленной кромки. Формируемая

мелкодисперсная структура и равномерно распределённая по всей площади наплавки упрочняющая фаза в жаропрочных никелевых припоях типа ВПр11-40Н, ВПр27 или ВПр24 позволит сохранить общую стойкость к износу кромки пера лопатки ТС, даже после шлифования. Дополнительно стоит отметить, что литая дендритная структура данных сплавов практически не подвержена седиментации твердых частиц, в отличие от карбидосодержащих композитов – это является дополнительным положительным фактором при сохранении износостойких свойств наплавки на малых контактных поверхностях.

Вследствие того, что порошковый припой ВПр11-40Н показал наилучшие результаты по износостойкости, он был выбран для более подробного анализа его характеристик. Для определения степени влияния условий и скорости охлаждения порошкового материала ВПр11-40Н после плавления, был исследован ряд образцов, полученных рядом методов с различными скоростями охлаждения: печной нагрев в вакуумной печи сопротивления СНВЭ 2.4.2-16/2 (производитель ООО «Призма», Россия – г. Новосибирск); дуговая наплавка в среде защитных газов (Ar) при помощи инвертора марки Tetrix 230 AC/DC (производитель «EWM AG», Германия); лазерная импульсная наплавка на установке ALFA-300 (производитель ООО «ЛазерФорм», Россия – г. Зеленоград); газовая атомизация струёй холодного газа на атомайзере EIGA 50/500 (производитель «ALD», Германия).

На рисунке 6 представлены результаты электронного микроскопического исследования образцов ВПр11-40Н, полученных при различных скоростях охлаждения расплава.

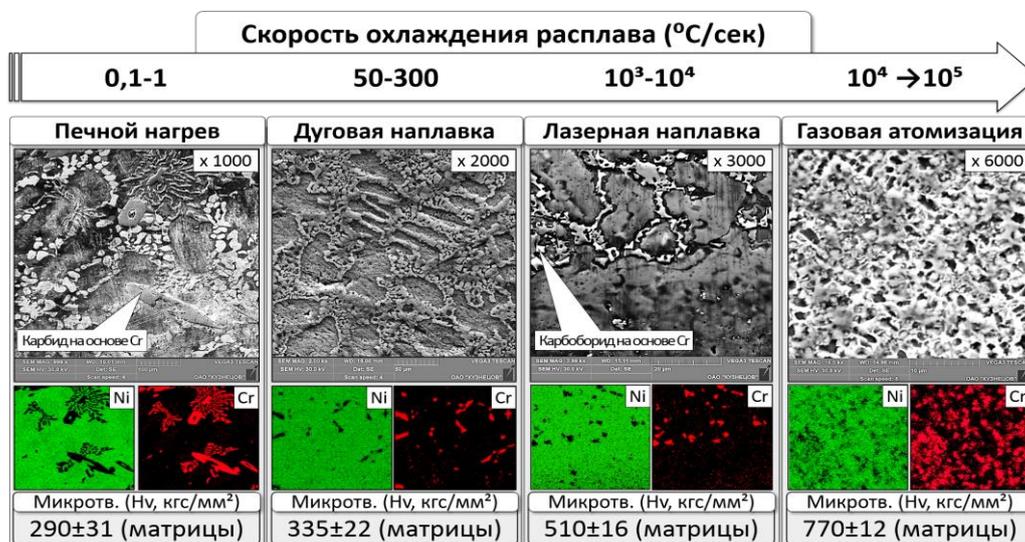


Рисунок 6 – Микроструктура и микротвёрдость материала ВПр11-40Н, полученного при различных скоростях охлаждения расплава

Под изображениями структуры указаны соответствующие значения средней микротвёрдости матрицы данного материала. Было установлено, что высоколегированный порошковый материал ВПр11-40Н имеет широкий интервал изменяемых характеристик, зависящих напрямую от скорости охлаждения расплава. С повышением скорости кристаллизации сплава растёт степень диспергирования твердых частиц на основе Cr, которую можно проследить по ярко выраженной ликвации Cr на карте распределения

элементов при низких скоростях охлаждения (рис.6). С повышением скорости охлаждения, уровень ликвации заметно снижается и Cr более равномерно насыщает матрицу сплава. Это может положительно сказаться на жаростойких свойствах наплавленных слоев, поскольку Cr наряду с Al снижает влияние высокотемпературной коррозии на структуру сплава при работе деталей в среде горячих газов.

Низкую среднюю микротвердость образцов ВПр11-40Н при печном нагреве можно объяснить формированием структуры с большим разбросом крупных карбидов хрома ($Hv=1800-2600$ кгс/мм²) и боридных эвтектик ($Hv=1600-2050$ кгс/мм²), снижающих общее содержание данных элементов в матрице расплава. Боридные эвтектики легкоплавки, что повышает риск их распада в процессе термообработки или нагрева до рабочих температур газовой турбины. При длительном нагреве в расплаве бор в несвязанном состоянии интенсивно диффундирует в основной металл, вызывает эрозию материала подложки и пагубно влияет на общую прочность детали.

С ростом скоростей охлаждения и уменьшением ликвации сплава, боридные эвтектики не успевают образовываться в расплаве, бор связывается в более равновесные и стабильные соединения карбоборидов, кристаллизующихся на первичных интерметаллидах. Кроме того, как видно из рисунка б, при импульсной лазерной наплавке и газовой атомизации наблюдается измельчение структуры сплава, что положительно сказывается на его прочностных характеристиках и повышении средней микротвердости.

Отличительной особенностью рассматриваемого сплава является значительное влияние химического состава на формируемую структуру, которая сохраняет наличие явно выделенных отдельных твердых частиц даже при высоких скоростях охлаждения. Наследование данной структуры происходит в широком диапазоне скоростей охлаждения. Применение лазерной наплавки позволяет формировать структуру сплава близкую к структуре и механическим свойствам изначального порошкового материала.

Все рассматриваемые образцы ВПр11-40Н имеют приемлемую стойкость к износу и по сравнению с другими жаропрочными сплавами показывают значительно более высокие показатели износостойкости. К примеру листовой прокат из сплава ХН45МВТЮБР-ВИ (ГОСТ 5632-2014) в состоянии закалки имеет стойкость к износу в пределах 2136 ± 126 мкм/час, что в 15 раз уступает сплаву ВПр11-40Н, после лазерной наплавки. На рисунке 7 показана зависимость стойкости к абразивному износу, средней твердости матрицы сплава и размера твердых соединений (карбидов и карбоборидов на основе хрома) от скорости охлаждения расплава ВПр11-40Н.

Большинство образуемых на высоких скоростях охлаждения соединений с Cr, отвечающих за стойкость сплава к износу, являются термостабильными и предположительно будут сохранять свои полезные свойства при длительных воздействиях рабочих температур в составе двигателя. Малый размер упрочняющей фазы, формируемый лазерным излучением, и равномерное её диспергирование по матрице наплавки обеспечивает достаточно высокую среднюю твердость и высокие параметры сопротивления к износу, что,

учитывая малую область соприкосновения на торце пера лопатки с ответным телом, можно считать дополнительным положительным фактором.

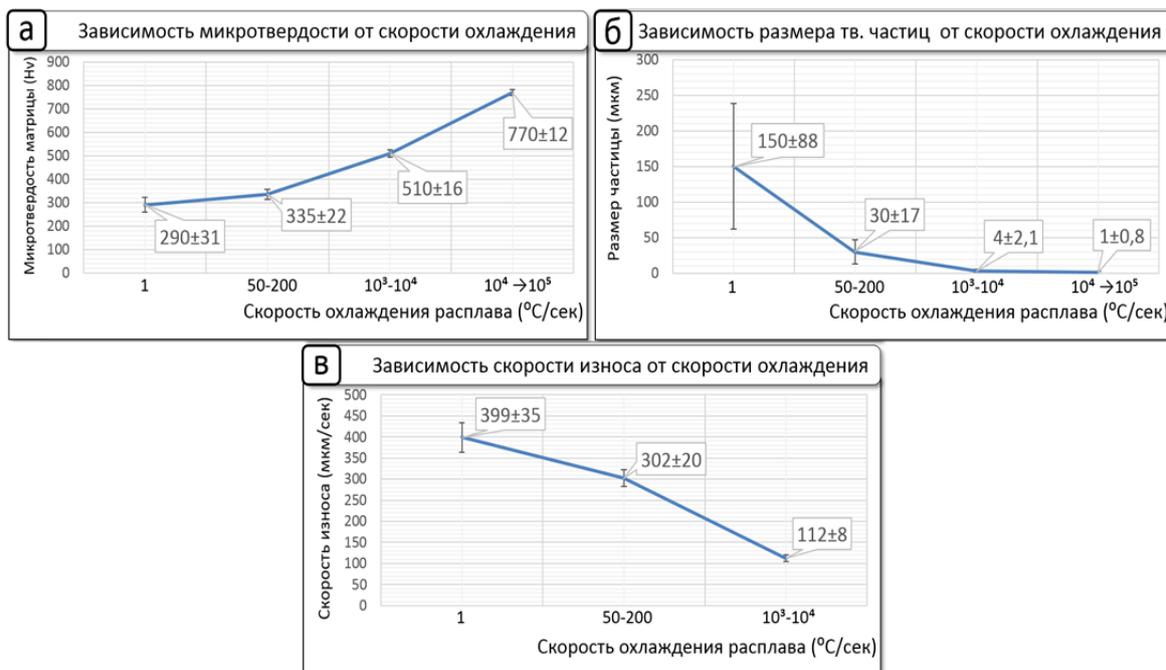


Рисунок 7 – Различные зависимости от скорости охлаждения расплава ВПр11-40Н: а – микротвердости матрицы материала; б – размера твердых упрочняющих фаз на основе Cr; в – стойкости к абразивному износу сплава

На рисунке 8 представлен подробный элементный анализ структуры сплава ВПр11-40Н, полученной методом лазерной импульсной наплавки. Анализ зоны (1) показал наличие большого содержания бора и углерода, что свидетельствует о наличии сложных карбоборидных соединений с различными металлами (Cr, Mo, W). Данные соединения являются основой износостойкости в данном фазовом состоянии сплава, отличаются большой твёрдостью ($Hv=1990\pm150$ кгс/мм²) и стойкостью к выкрашиванию при абразивном износе, помимо этого они повышают жаропрочные характеристики сплава путем снижения текучести за счёт межзёрненного дисперсионного упрочнения.

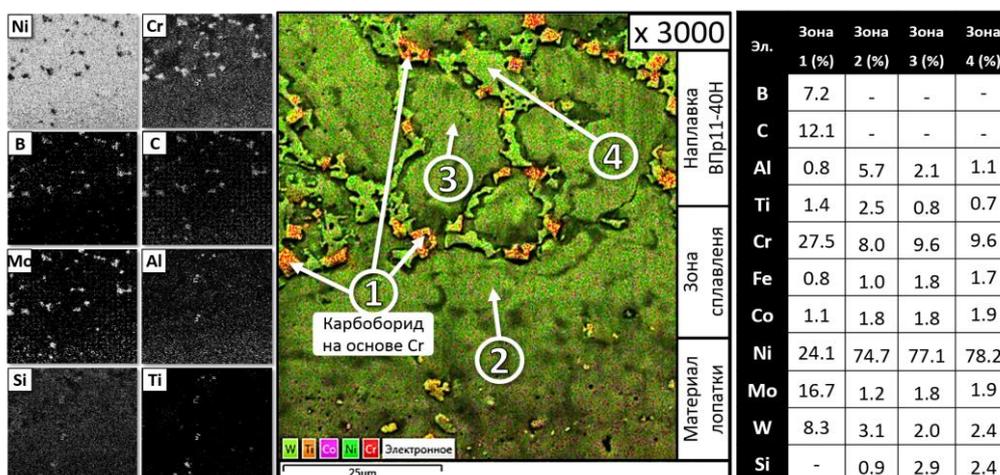


Рисунок 8 – Элементный анализ с цветовыми картами структуры сплава ВПр11-40Н, полученной методом лазерной импульсной наплавки

По цветовому элементному анализу можно судить о характере их распределения в матрице наплавки. В зоне (2) представлен элементный анализ области сплавления, отличающейся высокой однородностью; в зоне (3) и (4) представлен состав прочих фаз, присутствующих в наплавленном слое. Исходя из результатов исследования зависимости характеристик сплава ВПр11-40Н от фазового состояния, полученного при различных скоростях охлаждения, можно сделать вывод, что структура данного сплава управляема.

Скорость охлаждения расплава контролируется путём изменения параметров лазерного излучения, что даёт возможность получать структуру наплавленного материала и покрытий с заданными механическими свойствами.

Снижая скорость охлаждения в допустимых пределах, можно повысить пластичность сплава за счёт понижения его средней твердости. На рисунке 9 представлены различные режимы наплавки и их влияние на свойства сплава ВПр11-40Н.

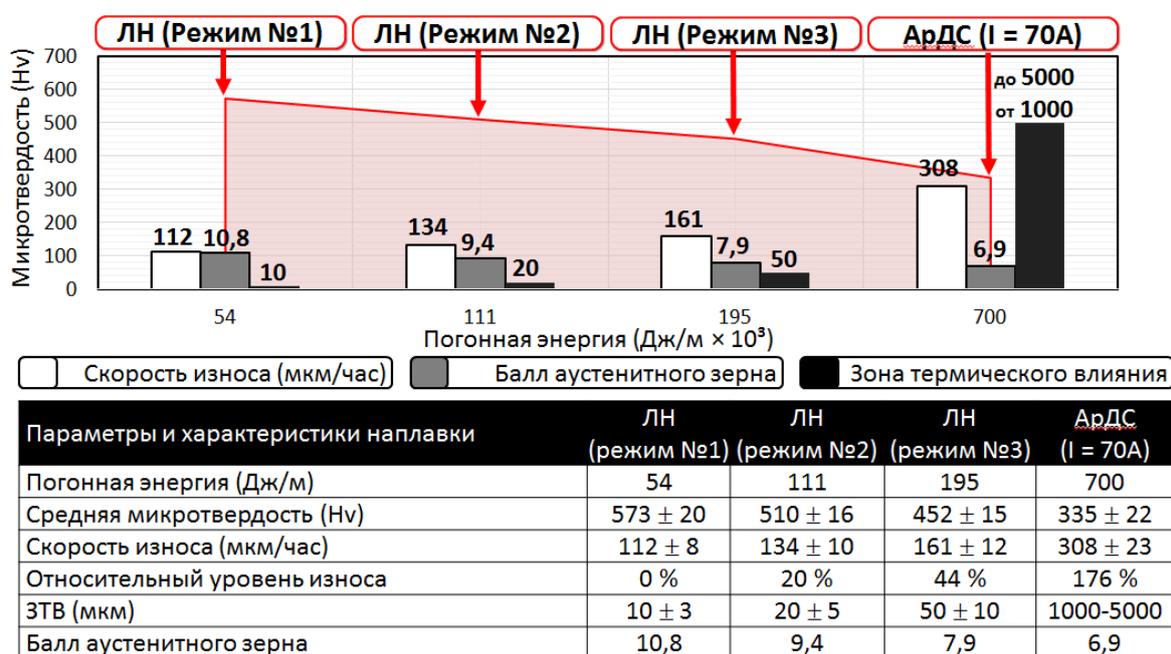


Рисунок 9 – Различные режимы наплавки и их влияние на свойства сплава ВПр11-40Н

Пятая глава посвящена проведению сравнительных стендовых испытаний на усталостную прочность в целях определения предела выносливости восстановленных лопаток ТС с последующим фрактографическим исследованием зон образования усталостных трещин в теле деталей.

В целях соблюдения условий проведения усталостных испытаний по стандартной методике и построения кривых Веллера в соответствии с ОСТ 1 00870-77 «Лопатки газотурбинных двигателей. Методы испытаний на усталость», была изготовлена партия (20 шт.) восстановленных лопаток ТС с применением лазерной наплавки сплава ВПр11-40Н и партия (25 шт.) лопаток ТС, не бывших в эксплуатации, для сравнения предела выносливости.

Восстановленные лазерной наплавкой лопатки подвергались механической обработке для придания ей профиля в соответствии с чертежом. В целях определения качества наплавки сплава ВПр11-40Н, восстановленные лопатки подвергались неразрушающим методам контроля на наличие

микротрещин и внутренних дефектов типа пор или несплавлений. Результатами рентгеновского и люминесцентного контроля восстановленных лопаток, не выявлено внешних и внутренних дефектов наплавки.

На рисунке 10 представлены результаты усталостных испытаний на электродинамическом стенде ВЭДС-400. На основании полученных данных можно сделать выводы, что после восстановления по разработанной технологии лопатки не теряют свой запас прочности, сохраняя эксплуатационные характеристики.

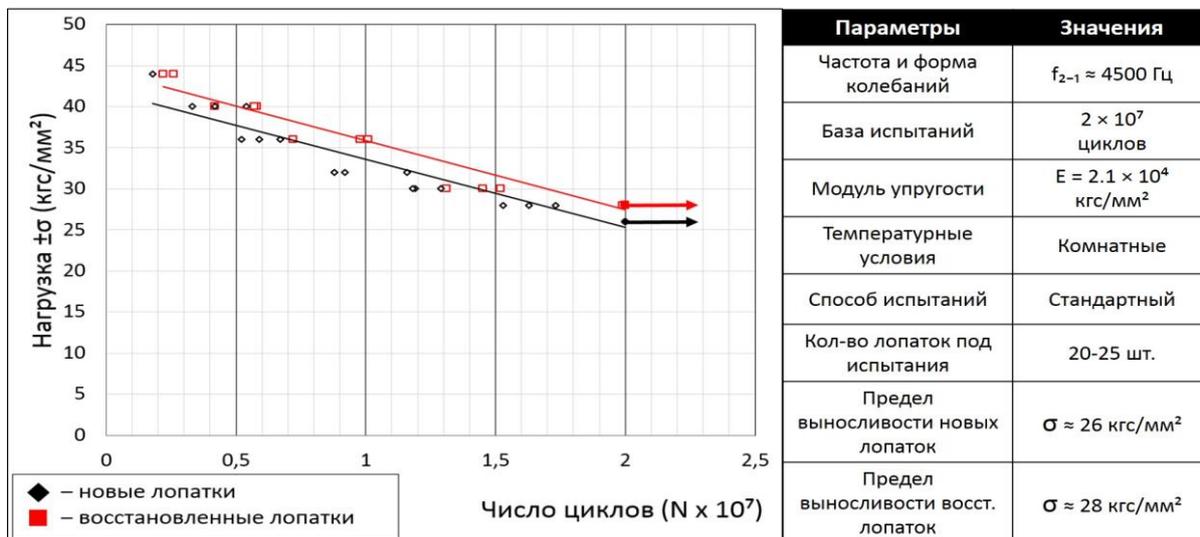


Рисунок 10 – Результаты усталостных испытаний и кривая усталости новых и восстановленных методом лазерной наплавки лопаток ТС

С целью определения характера разрушения и причины сохранения высокого запаса прочности восстановленных лопаток ТС после усталостных испытаний был произведен фрактографический анализ разрушенных областей (рис. 11)

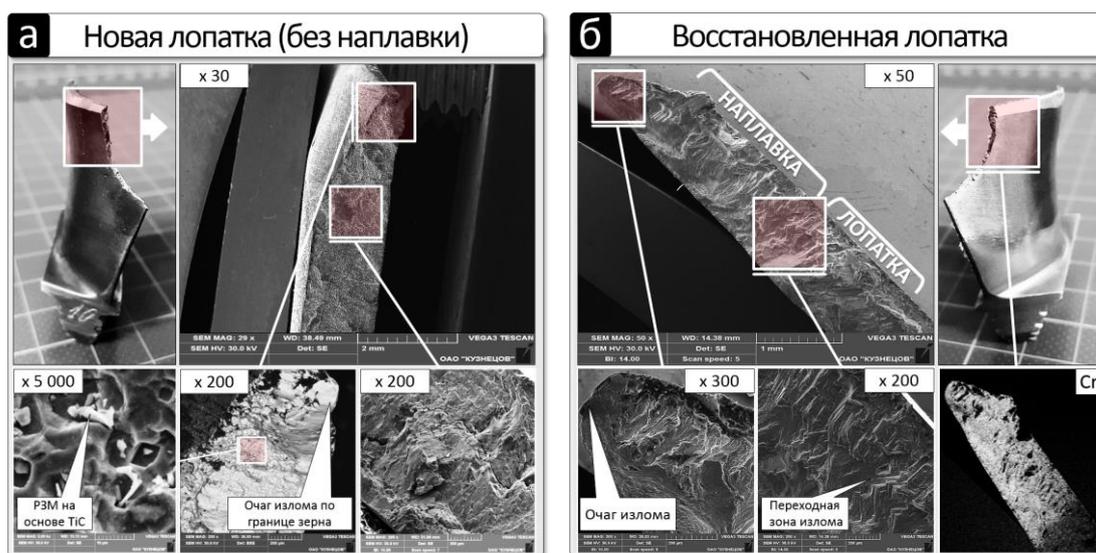


Рисунок 11 – Фрактографический анализ изломов разрушенных лопаток после испытаний на усталостную прочность: а – новая лопатка не бывшая в эксплуатации; б – лопатка, восстановленная лазерной импульсной наплавкой с применением сплава ВПр11-40Н

За счёт формирования мелкодисперсной структуры на вершине пера лопатки после лазерной наплавки, незначительно повышается сопротивление к образованию усталостных микротрещин по границе зерен. Очаг разрушения новых и восстановленных лопаток находится на вершине пера. Разрушение имеет усталостный характер, на что указывает ступенчатый вид излома. Гладкий скол на вершине пера новой лопатки (рис. 11, а) свидетельствует о начале разрушения по границе зерна. По результатам анализа цветовой элементной карты удалось определить границу наплавки в изломе восстановленной лопатки (рис. 11, б).

Результаты настоящего исследования были использованы при разработке и внедрении технологического процесса ремонта лопаток ТС методом лазерной наплавки на предприятии ПАО «Кузнецов», что позволило вести эффективное восстановление данных деталей с сохранением более 80% себестоимости, относительно изготовления новой лопатки.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Главным результатом диссертационной работы является решение проблемы поддержания ресурса лопаток ротора турбины турбостартера авиационного двигателя НК-12МП/МПМ за счёт разработки универсальной ремонтной технологии восстановительной лазерной наплавки. Основные выводы по работе можно сформулировать в виде следующих положений:

1. Проведено определение коэффициента теплового линейного расширения сплавов типа ВПр для оценки склонности данных материалов к образованию трещин в процессе наплавки и выбора оптимальных, КТЛР которых незначительно отличается от материала исследуемой лопатки ГТД (литейный жаропрочный сплав ЖС6К).

2. Впервые применены порошковые сплавы типа ВПр в качестве износостойких присадочных материалов при лазерной импульсной наплавке. Доказаны высокие износостойкие характеристики сплавов ВПр11-40Н и ВПр27 с литой структурой, получаемой при лазерной импульсной наплавке. По результатам проведенных испытаний на локальный абразивный износ установлено, что при оптимальных режимах лазерной наплавки сплавы ВПр11-40Н и ВПр27 обладают высокой износостойкостью, сравнимой со свойствами классического износостойкого композита Рок-Дюр 6740 с включениями 40% литого карбида вольфрама (WC / W_2C). Износостойкие характеристики сплава ВПр11-40Н, со структурой полученной методом лазерной импульсной наплавки, превосходят показатели литого сплава лопатки ЖС6К до 3 раз, а показатели сплава ЭП718 в состоянии закалки до 15 раз.

3. Проведено исследование микроструктуры и микротвёрдости наплавленных материалов линейки ВПр, на основании которого установлено, что при лазерной импульсной наплавке формируется литая мелкодисперсная дендритная структура с равномерно распределённой микротвёрдостью по всему наплавленному слою. С ростом скорости охлаждения расплава, возрастает уровень диспергирования твёрдых частиц и повышается плотность их расположения в матрице наплавки, что увеличивает её среднюю микротвёрдость. Дополнительно стоит отметить, что литая дендритная

структура данных сплавов практически не подвержена седиментации твердых частиц, в отличие от карбидосодержащих композитов – это является дополнительным положительным фактором при сохранении износостойких свойств наплавов на малых контактных поверхностях.

Показано, что при лазерной наплавке в условиях высокоскоростного охлаждения происходит наследование структуры и свойств, близких к исходным порошковым материалам.

4. Установлено, что с ростом скорости охлаждения снижается ликвационная неоднородность в сплавах типа ВПр. При скоростях охлаждения расплава, достигаемых при лазерной импульсной наплавке сплава ВПр11-40Н, среднее содержание Cr в матрице повышается до 9%, относительно медленного охлаждения в печи (3,5-5%). Общее снижение ликвации позволяет повысить жаростойкость получаемого наплавленного слоя.

5. Показана прямая зависимость формируемой литой структуры сплава ВПр11-40Н, включая её микротвёрдость и износостойкие свойства, от скорости охлаждения. Установлен качественный рост износостойких свойств (до 350%) сплава ВПр11-40Н от повышения скорости охлаждения за счёт формирования мелкодисперсной структуры и термостабильных карбоборидных соединений. Предложена возможность управления литой структурой данного сплава посредством изменения режимов лазерной наплавки для получения заданных рабочих характеристик с балансом между твёрдостью, износостойкостью, коррозионной жаростойкостью и усталостной прочностью.

6. На основании стендовых усталостных испытаний установлено, что восстановленные лопатки ротора турбины из сплава ЖС6К с применением материала ВПр11-40Н имеют предел усталостной выносливости сравнимый с вновь изготовленными лопатками, что позволяет эффективно поддерживать назначенный ресурс изделий на всём жизненном цикле.

7. Разработана технология восстановления геометрии лопаток ротора компрессора и турбины из жаропрочных никелевых сплавов оригинальным методом порошковой лазерной наплавки, позволяющего повысить износостойкие свойства контактных поверхностей деталей и сохранить когерентность упрочняющей структуры γ' -фазы Ni_3Al в зоне термического влияния. Технология успешно применена и апробирована в производстве на предприятии ПАО «Кузнецов».

8. Материалы диссертационного исследования широко используются в учебном процессе кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технологический университет».

IV. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus:

1. Klimov V.G. Using VPR11-40N brazing powder as a wear-resistant cladding for GTE blade airfoils / V.G. Klimov, S.S. Zhatkin, A.V. Kogteva // Solid State Phenomena ISSN: 1662-9779, Vol. 284, pp 1257-1262 doi:10.4028/ www.scientific.net/SSP.284.1257 © 2018 Trans Tech Publications, Switzerland.

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

2. Климов В.Г. Особенности восстановления геометрии пера лопатки газотурбинного двигателя методом лазерной порошковой наплавки / В.Г. Климов, С.С. Жаткин, Е.Ю. Щедрин, А.В. Когтева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 17, №2-4. – Самара. – 2015. – С. 782-788.

3. Климов В.Г. Восстановление высоты пера лопаток ГТД высокотемпературными порошковыми припоями / В.Г. Климов, В.И. Никитин, С.С. Жаткин // Литейное производство. №12. – Москва. – 2015. – С. 11-15.

4. Климов В.Г. Сравнение методов восстановления геометрии пера лопаток турбины из жаропрочных сплавов / В.Г. Климов // Вестник Московского авиационного института. Т. 23, №1. – Москва. – 2016. – С. 86-97.

5. Баранов Д.А., Климов В.Г. Структура сварного шва, сформированного при лазерной сварке Cr-Ni сплава при производстве ГТД / Д.А. Баранов, В.Г. Климов, К.В. Никитин, С.С. Жаткин // Металлургия машиностроения. №3. – Москва. – 2016. – С.46-48.

6. Климов В.Г. Использование высокотемпературных порошковых никелевых припоев в качестве износостойких наплавов на торец пера лопатки турбины / В.Г. Климов, С.С. Жаткин, Д.А. Баранов, И.А. Дяговцов, А.М. Хахимов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 18, №1-2. – Самара. – 2016. – С. 229-233.

7. Климов В.Г. Восстановление высоты пера лопаток ГТД высокотемпературными порошковыми припоями / В.Г. Климов, В.И. Никитин, С.С. Жаткин // Литейное производство. №5. – Москва. – 2016. – С. 8-12.

8. Климов В.Г. Применение лазерной импульсной наплавки при разработке технологии восстановления рабочих лопаток турбины газотурбинного двигателя / В.Г. Климов // Вестник Московского авиационного института. Т. 24, №1. – Москва. – 2017. – С. 170-179.

9. Хахимов А.М., Климов В.Г. Исследование влияния присадочных материалов на структуру и свойства зон лазерной наплавки лопаток ГТД / А.М. Хахимов, В.Г. Климов, С.С. Жаткин, Д.А. Баранов, И.А. Дяговцов, А.С. Попов, А.В. Пескова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 19, №1-2. – Самара. – 2017. – С. 302-306.

10. Климов В.Г. Особенности формирования структуры и свойств жаропрочного припоя ВПр11-40Н при лазерной наплавке на перо лопатки ГТД / В.Г. Климов, В.И. Никитин, К.В. Никитин, С.С. Жаткин, А.В. Когтева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 20, №4-2. – Самара. – 2018. – С. 159-164.

11. Климов В.Г. Применение износостойких натуральных композитов в технологии ремонта и модифицирования лопаток ротора газотурбинных двигателей / В.Г. Климов, В.И. Никитин, К.В. Никитин, С.С. Жаткин, А.В. Когтева // Вестник Московского авиационного института. Т. 26, №1. – Москва. – 2019. – С. 251-266.

Публикации в прочих изданиях:

12. Климов В.Г. Разработка технологии восстановления лопаток ГТД специальными методами / В.Г. Климов // В сб.: XIII всероссийский молодежный

самарский конкурс-конференция научных работ и по оптике и физике (11-14 ноября 2015 г.). – Москва: Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН. – 2015. – С. 72-80.

13. Климов В.Г. Сравнение методов восстановления геометрии пера лопаток турбины из жаропрочных сплавов / В.Г. Климов // В сб.: 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2015». Тезисы. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Московский авиационный институт (16-20 ноября 2015 г.). – 2015. – С. 487-489.

14. Климов В.Г. Сравнение методов восстановления геометрии пера лопаток турбины из жаропрочных сплавов / В.Г. Климов // В сб.: Молодёжь и будущее авиации и космонавтики 8-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов: аннотации конкурсных работ (16 – 20 ноября 2015 г.). – Москва: Московский авиационный институт. – 2015. – С. 286-287.

15. Климов В.Г. Восстановление геометрии пера лопаток турбины из жаропрочных сплавов методами наплавки / В.Г. Климов, В.И. Никитин, С.С. Жаткин // В сб.: Труды XII съезда литейщиков России (7-11 сентября 2015г.), – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – С. 225-229.

16. Баранов Д.А., Климов В.Г. Исследование структуры сварного шва, сформированной при лазерной сварке жаропрочного сплава на хромоникелевой основе при производстве ГТД / Д.А. Баранов, В.Г. Климов, К.В. Никитин, С.С. Жаткин // В сб.: Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства: Материалы 7-го всероссийского научно-технического семинара. – Самара: Самарский государственный технический университет. – 2016. – С. 340-345.

17. Климов В.Г. Исследование влияния типа присадочного материала на структуру и свойства зон лазерной наплавки ГТД / В.Г. Климов, А.М. Хакимов, С.С. Жаткин // В сб.: 71-я научно-техническая конференция студентов и магистрантов СамГТУ «Дни науки-2016». – Самара: Самарский государственный технический университет. – 2016. – С. 98-99.

18. Климов В.Г. Исследование влияния присадочных материалов на структуру и свойства зон лазерной наплавки лопаток ГТД / В.Г. Климов, А.М. Хакимов, С.С. Жаткин // В сб.: Высокие технологии в машиностроении. Материалы всероссийской научно-технической интернет-конференции. А.Ф. Денисенко (отв. редактор). – Самара: Самарский государственный технический университет. – 2016. – С. 216-218.

19. Баранов Д.А., Климов В.Г. Особенности воздействия CO₂-лазера на структуру сварного шва при лазерной сварке жаропрочного сплава, используемого в производстве деталей и узлов ГТД / Д.А. Баранов, В.Г. Климов, А.А. Паркин, С.С. Жаткин, А.С. Попов, А.М. Хакимов, Е.Ю. Щедрин, И.А. Дяговцов // В сб.: Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов международной Научно-технической конференции (22-24 июня 2016г.). – Самара: Самарский университет. – 2016. – С. 19-20.

20. Климов В.Г. Применение литых порошковых никелевых припоев при лазерной наплавке на торец пера лопаток ГТД / В.Г. Климов, Д.А. Баранов, С.С. Жаткин, А.С. Попов, И.А. Дяговцов // В сб.: Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов международной Научно-технической конференции (22-24 июня 2016г.). – Самара: Самарский университет. – 2016. – С. 15-16.

21. Попов А.С., Климов В.Г. Перспективы применения технологии прямого лазерного выращивания деталей при производстве современных газотурбинных двигателей на ПАО «Кузнецов» / В.Г. Климов, Д.А. Баранов, И.А. Дяговцов, Е.Ю. Щедрин, А.В. Когтева // В сб.: Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов международной Научно-технической конференции (22-24 июня 2016г.). – Самара: Самарский университет. – 2016. – С. 29-30.

22. Климов В.Г. Разработка технологии восстановления лопаток турбины с применением специальных методов / В.Г. Климов // В сб.: Фундаментальные проблемы локализации производств в России деталей горячего тракта ГТУ, использующихся в

национальной экономике: Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции – LXIII научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин. – Рыбинск: ИД Газотурбинные технологии. – 2016. – С. 77-81.

23. Климов В.Г. Применение лазерной импульсной наплавки при разработке технологии восстановления рабочих лопаток турбины ГТД / В.Г. Климов // В сб.: Молодёжь и будущее авиации и космонавтики 8-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов: аннотации конкурсных работ (14 – 18 ноября 2016 г.). – Москва: Московский авиационный институт. – 2016. – С. 354-355.

24. Климов В.Г. Порошковые материалы в технологии гетерофазной лазерной металлургии для производства деталей газотурбинных двигателей / В.Г. Климов, А.В. Пескова, А.С. Попов // В сб.: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение. Материалы III-ей Всероссийской научно-практической конференции. Под редакцией И.Е. Илларионова. – Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. – 2017. – С. 310-314.

25. Климов В.Г. Исследование структуры наплавленного порошкового припоя ВПр11-40Н, формируемого лазерным импульсным излучением / В.Г. Климов, С.С. Жаткин, А.А. Паркин, А.В. Когтева // В сб.: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение. Материалы III-ей Всероссийской научно-практической конференции. Под редакцией И.Е. Илларионова. – Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. – 2017. – С. 304-309.

26. Климов В.Г. Восстановление лопаток газотурбинных двигателей за счет применения модифицирования и структурной наследственности присадочных материалов / В.Г. Климов, С.С. Жаткин, А.А. Паркин, А.В. Когтева // В сб.: Наследственность в литейно-металлургических процессах VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием (8-11 октября 2018 г.). – Самара: Самарский государственный технический университет. – 2018. – №8 – С. 294-305.

27. Климов В.Г. Применение износостойких естественных композитов в технологии ремонта и модифицирования лопаток ротора ГТД / В.Г. Климов // В сб.: Молодёжь и будущее авиации и космонавтики 10-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов: аннотации конкурсных работ (19 – 23 ноября 2018 г.). – Москва: Московский авиационный институт. – 2018. – С. 288-289.

Научное издание

Климов Вадим Геннадьевич

АТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему:
Структура и свойства восстановленных лазерной наплавкой лопаток газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета
Д999.122.02 ФГБОУ ВО «Самарский технический университет»
(протокол № 2 от « 20 » июня 2019 г.).

Формат 60 x 90 1/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.