

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта

На правах рукописи

Шальнова Светлана Александровна

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ
ПРИ ПРЯМОМ ЛАЗЕРНОМ ВЫРАЩИВАНИИ

Направление подготовки: 15.06.01 «Машиностроение»

Направленность: 15.06.01_07 «Сварка, родственные процессы и технологии»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы:

Шальнова Светлана Александровна

Научный руководитель:

Туричин Глеб Андреевич,

профессор, доктор технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Директор ВШ: Семенча Александр Вячеславович,
кандидат химических наук

Научный руководитель: Туричин Глеб Андреевич,
профессор, доктор технических наук

Рецензент: Земляков Евгений Вячеславович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Цифровые лазерные технологии», СПбГМТУ

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Новые производственные технологии с использованием лазерного излучения в качестве источника нагрева, прямое лазерное выращивание (ПЛВ) в частности, основное отличие классических методов порошковой металлургии, заключается в том, что изготовление изделий сложной геометрической формы с высокими значениями механических свойств возможно без существенных временных затрат на дополнительные технологические операции, например, изготовление оснастки, процесс спекания порошковых композиций, сварка частей изделия.

В связи с широким использованием титановых сплавов в авиационной промышленности, судостроении и машиностроении основной задачей становится повышение механических и эксплуатационных свойств за счет создания мелкозернистой структуры и использовании современных технологий, таких как прямое лазерное выращивание. Для уменьшения размера зерна вводят модификаторы, например, керамические частицы. Изделия из титановых сплавов, изготовленные методом прямого лазерного выращивания обладают высокой прочностью, коррозионной стойкостью. В свою очередь керамические материалы с высокой температурой плавления хорошей износостойкостью и высокой термической стабильностью, такие как карбид кремния (SiC), в основном используются для материалов электродов, режущих инструментов и двигателей. Примечательно, что аддитивные технологии являются превосходным методом для изготовления композитов, состоящих из металлической матрицы и керамических включений.

Несмотря на возросший интерес к аддитивному производству металлматричных композитов и функциональных материалов на сегодняшний день существует проблема несогласованности проводимых исследований, которая ведет к значительным трудностям в направлении внедрения передовых технологий в реальные сектора производства. Эта проблема также явно обозначена в Стратегии развития авиационной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года.

Цель и задачи исследования

Исследование аспектов формирования и способа управления структурой и свойствами образцов из псевдо-альфа титановых сплавов, полученных методом прямого лазерного выращивания.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Установление закономерностей, протекающих при формировании структуры образцов из псевдо-альфа титановых сплавов в процессе прямого лазерного выращивания: исследование возможности образования дефектов; исследование возможности протекания фазовых и структурных превращений в сплаве в исходном состоянии и в процессе термической обработки;

2. Моделирование формирования фазового состава в титановых сплавах с добавлением частиц карбида кремния в процессе прямого лазерного выращивания с помощью программного комплекса ThermoCalc;

3. Установление закономерностей, протекающих при формировании структуры и свойств образцов из псевдо-альфа титановых сплавов с добавлением керамических частиц в процессе прямого лазерного выращивания;

4. Исследование механических характеристик полученных образцов, включая, высокотемпературные испытания на одноосное растяжение и проведение коррозионных испытаний.

Научная новизна

Решение вышеописанной проблемы имеет большое значение для ускорения внедрения в реальные сектора производства новых производственных технологий, разработанных в России. Развитие авиационной промышленности Российской Федерации непосредственно связано с развитием и разработкой адаптивных материалов, металломатричных композиционных материалов, порошковых материалов для аддитивных технологий.

Научная новизна данной работы заключается в том, что впервые получены научные основы прямого лазерного выращивания металлокерамического композита системы Ti-SiC путем комплексного экспериментального исследования. Еще одна особенность - одновременное использование двух порошковых питателей для ввода порошковых компонентов в зону расплава без предварительного механического перемешивания металлической матрицы и керамической арматуры. Вместе с тем разработан способ управления структурно-фазовым состоянием композиционного материала, основанный на варьировании концентрации керамической составляющей SiC.

Теоретическая и практическая значимость

Проведенные исследования по данной тематике позволило усовершенствовать уже существующую технологию прямого лазерного выращивания путём расширения номенклатуры используемых материалов.

Также в виду специфики и отличия физических свойств и морфологии порошков металлической матрицы и керамической добавки модифицирован способ подачи порошков в зону обработки лазерным излучением. В ходе проведения исследования решены актуальные задачи по разработке экспериментальных основ по созданию новых функциональных материалов с применением лазерных технологий. На примере системы Ti-SiC протестирована возможность применения технологии ПЛВ для получения материала с высокими значениями механических свойств, испытанных при повышенной температуре в сочетании с высокими коррозионными свойствами. На основе полученных данных выявлены и сформулированы общие закономерности формирования структуры и свойств подобных металлматричных композитов, перспективных для применения в авиа-ракетно- и двигателестроительной отраслях.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: 9-я, 10-я международная конференция «Beam Technologies and Laser Application» ("Лучевые технологии и применение лазеров"), международная научно-техническая конференция "Пром-Инжиниринг" в 2018, 2019 гг. научная конференция, с международным участием «Неделя науки СПбПУ» в 2017 и 2018 годах.

Публикации

Основные результаты диссертационного исследования представлены в 26-и научных публикациях. Из них 16 статей входит в международную базу данных рецензируемой научной литературы Scopus. 6 статей входят в перечень журналов, рекомендованных ВАК, в базе данных РИНЦ цитируется 4 статьи.

Представление научного доклада: основные положения

1. Результаты анализа влияния технологических режимов ПЛВ и режимов термической обработки на структуру и свойства титанового сплава ПТ-3В.
2. Результаты анализа механизмов формирования фазового состава с точки зрения моделирования процесса взаимодействия титановой матрицы с частицами SiC и последующей проверкой результатов.
3. Результаты исследования механических и коррозионных свойств образцов в зависимости от процентного содержания частиц карбида кремния.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. Обозначена степень достоверности и апробации результатов. Основной материал диссертации распределен по пяти главам.

В первой главе представлено современное состояние исследований по данной тематике, описаны основные направления исследований в мировой науке. Показаны тенденции в исследованиях формирования структуры и свойств титановых сплавов, полученных методами лазерных аддитивных технологий, и особенно выделен метод прямого лазерного выращивания. Отдельным блоком приведен анализ литературы по теме прямого лазерного выращивания металлокерамических изделий на основе титановых сплавов.

Из литературного анализа следует, что оптимальный выбор технологических параметров прямого лазерного выращивания позволяет добиться бездефектных структур образцов, а последующая термическая обработка обеспечивает необходимые механические свойства, за счет снятия внутренних напряжений или изменения структуры в ходе перекристаллизации. Все больше работ концентрируются на получении изделий из двухфазных $\alpha+\beta$ титановых сплавов, которые широко используются в промышленности, с помощью метода ПЛВ возможно получение изделий с высоким уровнем прочностных свойств из псевдо- α титановых сплавов, а пластические свойства будут выше, чем у $\alpha+\beta$ титановых сплавов. По данному вопросу отмечается отсутствие достаточно полных работ, направленных на исследование формирования структуры и свойств в процессе прямого лазерного выращивания именно псевдо- α титановых сплавов. С точки зрения формирования металлокерамических образцов на основе титановой матрицы, то здесь ученые сходятся во мнении, что благодаря подбору технологических параметров ПЛВ и как следствие формирование заданной микроструктуры и химического состава возможно эффективно повысить механические характеристики изделий при повышенных температурах, с другой стороны возникают сложности при производстве таких изделий из-за формирования пор, микро- и макротрещин, которые являются распространенными дефектами в металлокерамике. Однако систематических исследований микроструктуры и механических свойств, выращенных образцов из псевдо-альфа титановых сплавов и металлокерамик на их основе, не проводилось в полной мере.

Таким образом, метод прямого лазерного выращивания из порошковых материалов титановых сплавов, а также варианты с добавлением частиц карбида кремния являются одним из перспективных направлений формирования новых материалов с комбинацией малого веса, термической и коррозионной стойкости.

Во второй главе описаны оборудование и методика для метода ПЛВ, описаны материалы, методики и методы исследований, выращенных образцов и образцов после термической обработки.

В качестве исследуемого объекта выбраны титановые сплавы ПТ-3В и его аналог ТЛ5. Представлена методика входного контроля порошкового материала порошкового материала. Выращенные образцы были подвергнуты всестороннему анализу. Методика подготовки образцов для анализа включает себя и пробоподготовку для металлографического анализа, а также подготовку образцов для механических и коррозионных испытаний. В данной главе описаны методики микроструктурного и рентгеноспектрального микроанализа, определения концентрации примесей методом восстановительного плавления, измерения микротвердости, механических свойств: прочности и пластичности при комнатной и повышенной температурах, ударной вязкости и коррозионных испытаний. Представлена методика выбора оптимальных параметров термической обработки выращенных образцов. Также описана методика моделирования формирования фазового состава образцов изготовленных из титанового сплава ТЛ5 с добавлением частиц SiC с различным содержанием карбида кремния была использована модель Шайля-Гулливера. Обсуждена целесообразность выбора данных методов исследования.

В третьей главе представлено исследование влияния технологических режимов прямого лазерного выращивания и режимов термической обработки (ТО) на структуру и механические свойства титанового сплава ПТ-3В.

В процессе прямого лазерного выращивания в зависимости от размера изделия нанесения слоя происходит за различное время. В эксперименте было проведено моделирование различных пауз между слоями. В результате

проведения механических испытаний на ударную вязкость (таблица 1) установлено, что увеличение паузы приводит к формированию значений ударной вязкости выше, чем установлено в ОСТ 1 92062-90. Далее в экспериментах была использована наибольшая пауза.

Таблица 1 – Влияние паузы между проходами на формирование свойств

Пауза между проходами, с	КСУ, Дж/см ²
30	70
6	64
ОСТ 1 92062-90	70

В ходе анализа влияния термической обработки были выращены плиты из титанового сплава ПТ-3В методом прямого лазерного выращивания, проведены механические испытания на растяжение и на ударную вязкость при комнатной температуре. Фотографии микроструктуры образцов в исходном состоянии и после термической обработки представлены на рисунке 1.

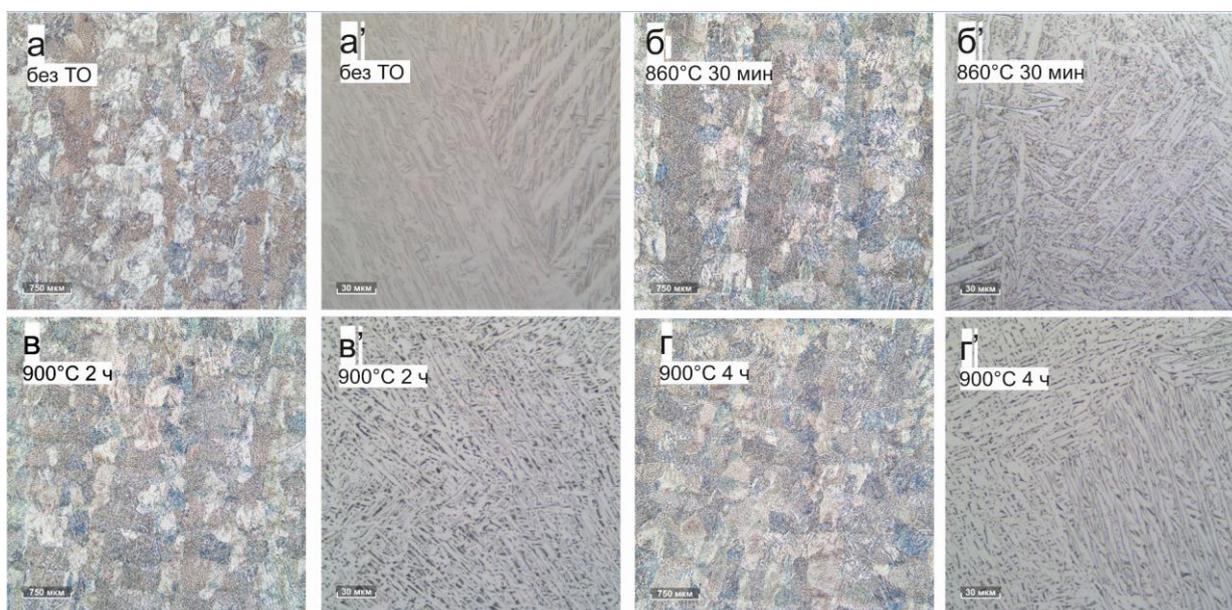


Рисунок 1 – Микроструктура образцов в исходном состоянии и после ТО: (а-а') - без ТО; (б-б') - 860 °С, 30 мин; (в-в') - 900 °С, 2 ч; (г-г') - 860 °С, 4 ч

В ходе анализа установлено, что термической обработки не происходит изменений размера зерна, с точки зрения формирования микроструктуры с увеличением времени выдержки и температуры происходит уменьшение

содержания $\alpha'+\alpha$ мартенситной фазы, а пластины α -фазы увеличиваются. Термическая обработка повлияла на формирования механических свойств образцов (рис. 2).

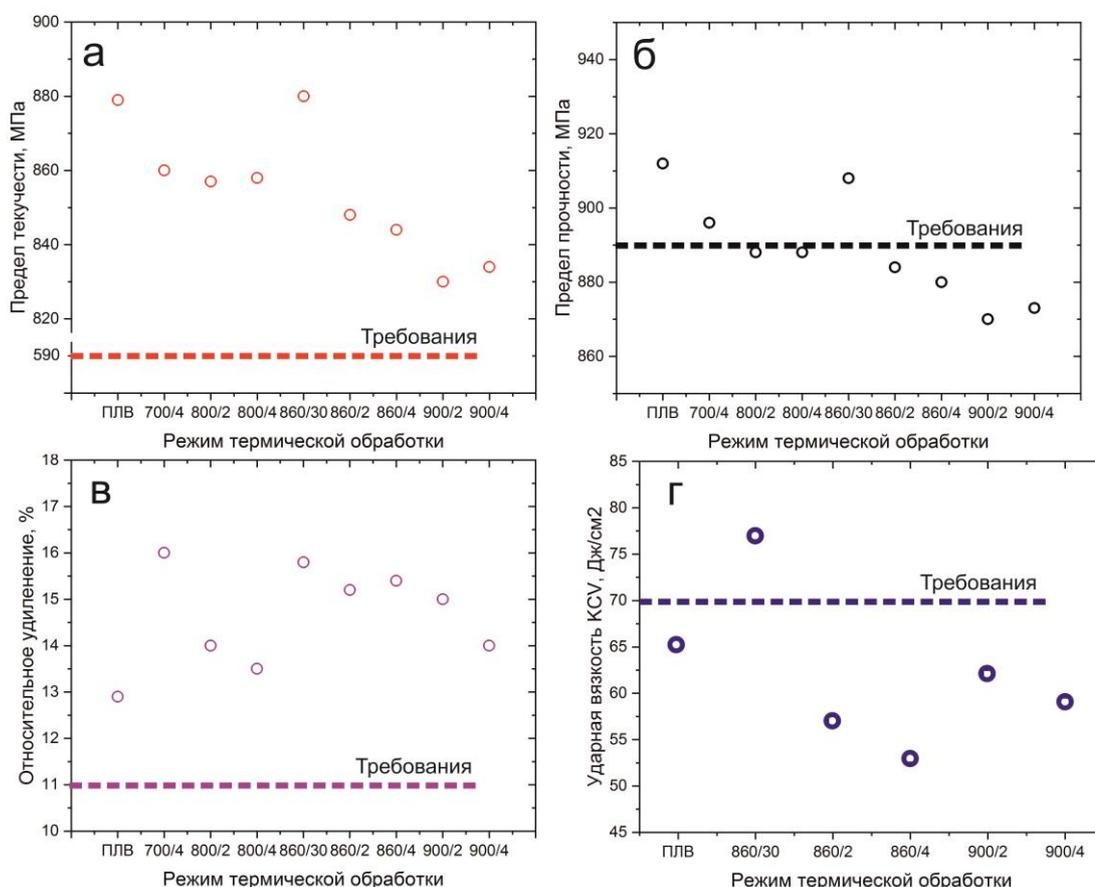


Рисунок 2 –Механические свойства образцов в зависимости от режима термической обработки: (а) предел текучести; (б) предел прочности; (в) относительное удлинение; (г) ударная вязкость KCV

В ходе анализа свойств, выращенных образцов без термической обработки, отмечено, что характеристики соответствуют ОСТ 1 92062-90, кроме параметра ударной вязкости, с помощью термической обработки удается достичь повышения ударной вязкости за счет снятия внутренних напряжений при нагреве до 860°C, выдержки в течение 30 мин и охлаждению на воздухе.

В зависимости от места нанесения надреза для испытаний на ударную вязкость механические свойства изделия могут отличаться, что было продемонстрировано на рис. 3.

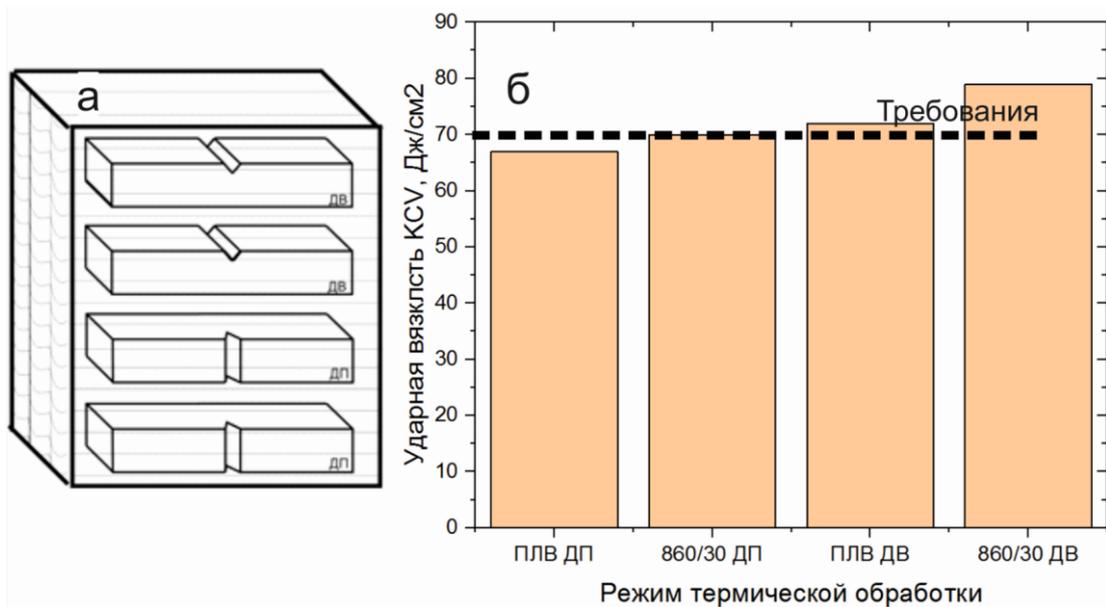


Рисунок 3 – (а) схема нанесения надреза для испытания на ударную вязкость, (б) механические свойства образцов

Понимание процессов, протекающих в ходе формирования структуры, которая приводит к анизотропии свойств, а также способов управления этими процессами позволяет прогнозировать и управлять свойствами выращенных образцов и изделий.

В 4 главе изучены механизмы формирования фазового состава с точки зрения моделирования процесса взаимодействия титановой матрицы с частицами SiC и последующей проверки результатов. В данном исследовании рассматривались образцы с матрицей из титанового сплава ТЛ5, армированного 1 об.%, 5 об.% SiC. Проведено математическое моделирование фазового состава этих образцов. По результатам моделирования были определены фазы, которые будут присутствовать в этих образцах. Моделирование процесса кристаллизации Ti-4Al-2V, Si и C позволило получить представление о фазовом составе в процессе кристаллизации: матрица α -Ti (ГПУ), TiC (ГЦК) и Ti₅Si₃(ГПУ), рисунок 4.

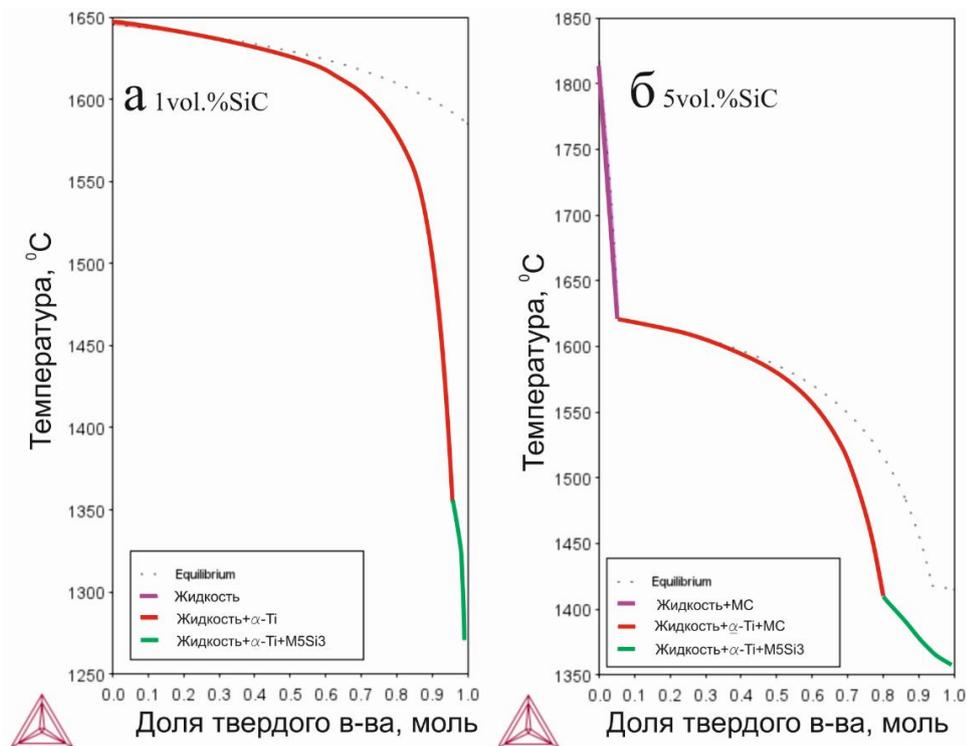


Рисунок 4 – Кривые охлаждения, полученные с помощью модели Шайля-Гулливера: (а) 1 об.% SiC; (б) 5 об.% SiC

Дальнейшие исследования направлены на подтверждение результатов, изучение структуры, фазового состава и механических свойств наплавленных образцов.

Титановая матрица реагирует с продуктами распада SiC. На картинах видны сильные дифракционные пики, соответствующие α -Ti (ГПУ-Ti), SiC (ГПУ), а также новым фазам: TiC (ГЦК) и Ti5Si3 (ГПУ). Закономерность распределения новых фаз зависит от характера распределения армирующих частиц, и важно учитывать, что часть SiC растворилась и прореагировала. С увеличением содержания SiC увеличивается процент растворенного SiC. На рисунке 5 видно, что содержание TiC и Ti5Si3 увеличивается с увеличением содержания SiC, что связано с большим количеством растворенных частиц SiC и последующим увеличением количества свободных атомов C и Si.

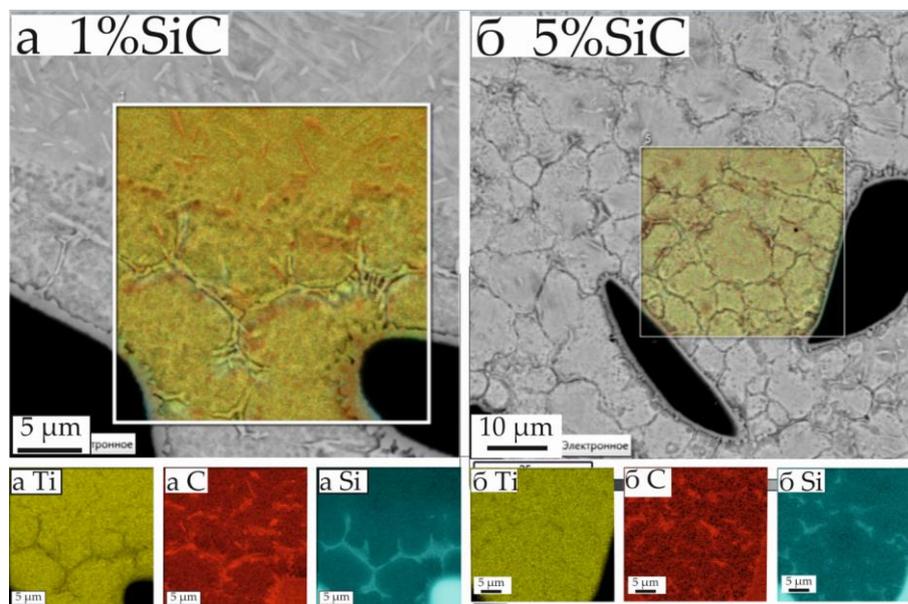


Рисунок 5 – Результаты рентгеноспектрального микроанализа: (а) содержание SiC 1%; (б) содержание SiC 5%

Возможны разные варианты реакции титановой матрицы и атомов Si, но с точки зрения термодинамики энергетически более выгодна реакция образования Ti_5Si_3 . Химический анализ показал, что фазы с «пластинчатой» структурой представляют собой фазы Ti_5Si_3 . Большинство фаз Ti_5Si_3 растет по границам зерен. По мере увеличения процентного содержания частиц SiC происходит увеличение новых фаз TiC и Ti_5Si_3 вокруг частиц SiC за счет реакционной способности армирующей матрицы.

В 5 главе проведен сравнительный анализ механических и коррозионных свойств образцов в зависимости от процента содержание частиц SiC.

На образцах из титанового сплава и образцах с добавлением 1% керамических частиц SiC проведены механические испытания на растяжение при температурах: 23 °C, 250 °C, 450 °C, 600 °C. Результаты механических испытаний представлены на рисунке 6, на рисунке 7 представлены фотографии поверхности изломов образцов.

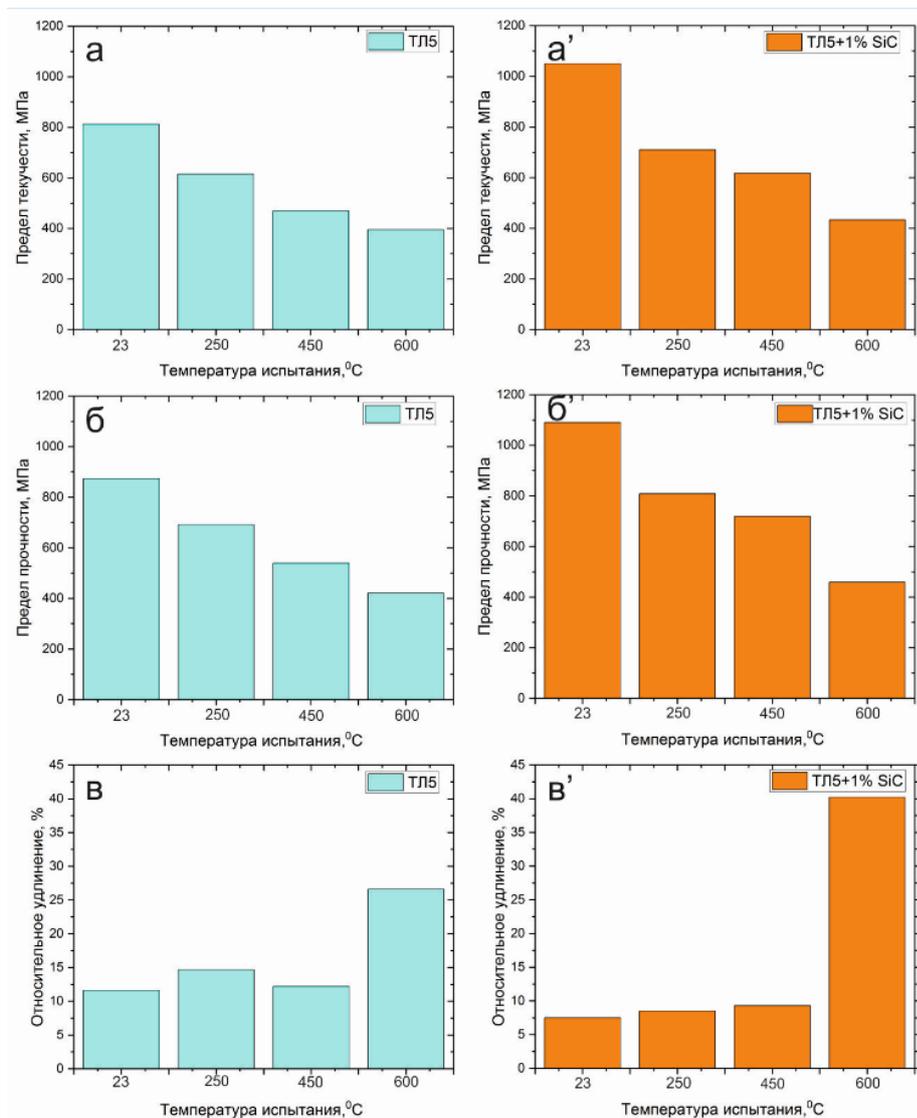


Рисунок 6 – Результаты механических испытаний образцов с содержанием 0%SiC и 1%SiC при различных температурах испытания: (а-а') Предел текучести; (б-б') Предел прочности; (в-в') Относительное удлинение

Снижение пластичности материала, в зависимости от содержания частиц SiC, связано с образованием новых хрупких фаз Ti_5Si_3 и TiC. Введение частиц SiC повышает прочностные характеристики, по сравнению с образцом без добавления керамических частиц (рисунок 6).

Введение частиц SiC повышает прочностные характеристики, понижая пластичность материала. Однако, упрочняющее действие керамических частиц не бесконечно, при повышении температуры увеличивается ползучесть материала, что приводит к снижению сопротивления и разрушению образца.

Анализируя результаты испытаний на растяжение при различных температурах, отмечена общая тенденция к снижению прочностных свойств материала, и увеличению пластических образцов, что обуславливается природой матрицы.

На рисунке 7а-г представлены СЭМ-изображения поверхностей изломов образцов испытанных при различных температурах. Наблюдается разница в разрушении образцов при различных температурах испытаний. Излом образца, испытанного при температуре 23°C является волокнистым с характерным субзерненным разрушением (рис. 7б'). При увеличении температуры испытания формируется смешанный рельеф разрушения, помимо волокнистой внешней зоны присутствует внутренняя округлая зона с радиальными рубцами, что связано с пластичным поведением материала при разрушении.

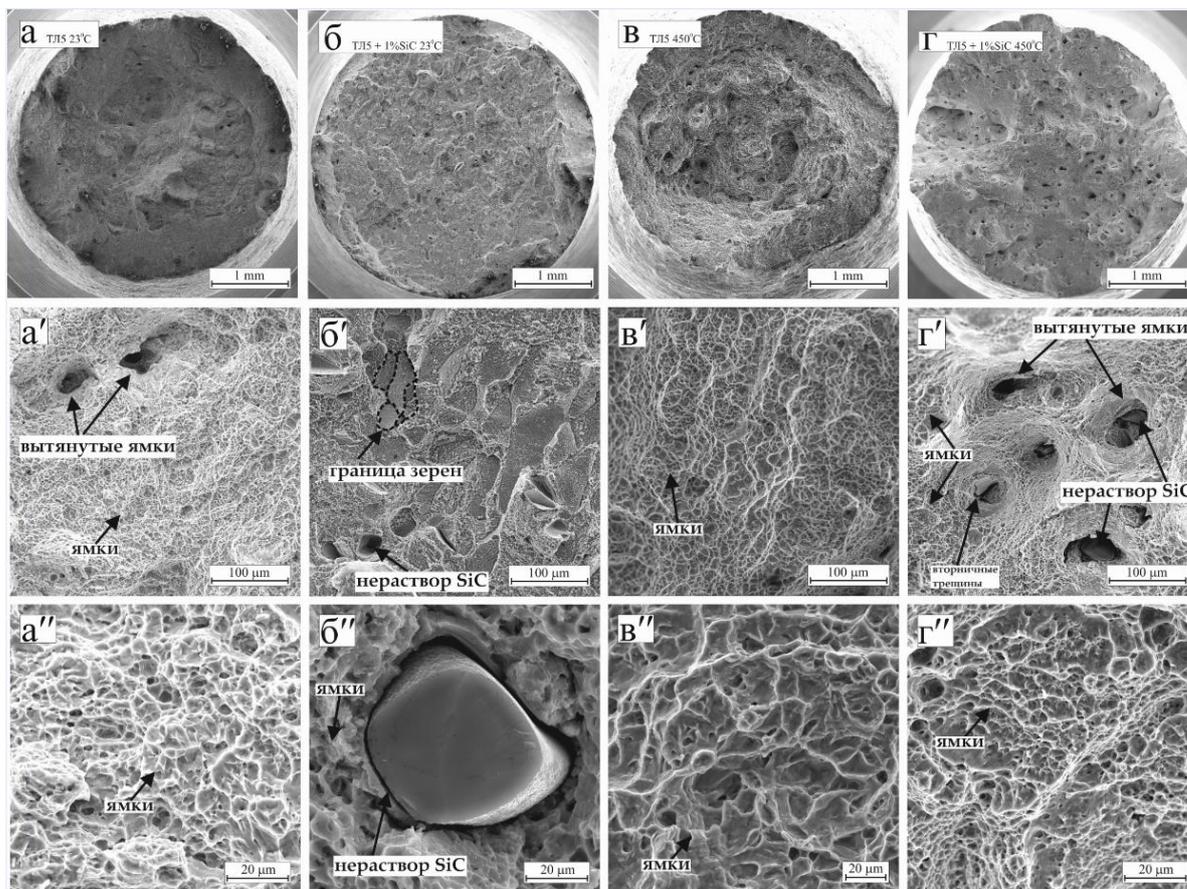


Рисунок 8 – Поверхность излома образцов: (а-а'') ТЛ5 при 23°C (б-б'') ТЛ5+ 1%SiC при 23°C; (в-в'') ТЛ5 при 450°C; (г-г'')ТЛ5+ 1%SiC при 450°C

На поверхности всех изломов нерасплавленные частицы SiC распределены случайным образом. Судя по состоянию частиц SiC (рис. 7б'') трещина полностью пересекала частицу, когда образец подвергался растягивающему напряжению. Пограничная связь между нерастворенными частицами SiC и матрицей оказалась прочной.

Поверхность всех изломов состоит из множества мелких ямок (рис. 7а'-г'), характерный элемент вязкого разрушения титановых сплавов, детальный анализ изломов (рис. 7б'-г') выявил, что на некоторых участках присутствуют большие и гладкие ямки, что свидетельствует о процессе вытяжки металла. На изображениях поверхности излома с большим увеличением (рис. 7б', г'), были обнаружены ямки, окружающие нерастворенные частицы SiC, таким образом установлено, что матрица разрушается по вязкому механизму разрушения. В образцах с частицами SiC (рис. 7б', рис. 7г'') излом характеризуется довольно маленькими и неглубокими ямками, по сравнению с изломами на рис. 7а' и рис. 7в', что свидетельствует о более низкой пластической деформации.

Различное поведение материала при растяжении соответствует разнице в полученных значениях прочности и пластичности. В процессе ПЛВ частицы SiC взаимодействуют с титановой матрицей образуя новые фазы, что значительно повышает прочность при растяжении. С увеличением температуры испытаний образцы становятся более пластичными из-за пластичной титановой матрицы, однако за счет добавления керамических частиц удается достичь незначительной потери прочностных свойств по сравнению с образцами без упрочняющих частиц SiC.

Проведена линейная анодная поляризация образцов с маркировкой ТЛ5 (образец из чистого титанового сплава ТЛ5), ТЛ5+1%SiC (с добавлением 1% карбида кремния), ТЛ5+5%SiC (с добавлением 5% карбида кремния) в 15% растворе NaCl в течение 5 часов при постоянной температуре $35 \pm 1^\circ\text{C}$ для определения потенциала коррозии и питтингообразования. Результаты измерения коррозионных потенциалов образцов представлены на рисунке 8.

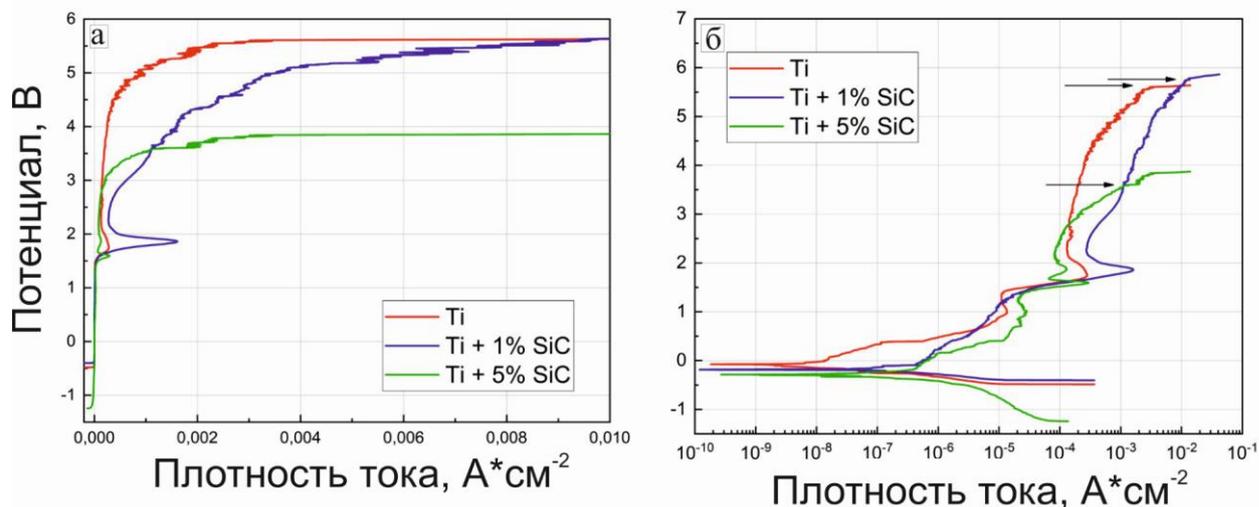


Рисунок 8 – (а) Поляризационные кривые, полученные на исследуемых образцах; (б) Поляризационные кривые в логарифмических координатах

Коррозионная стойкость выше всего у образца титана без добавок (красная кривая). На первом графике (рис. 8а) (потенциал-плотность тока) видно, что данный образец дольше держит плато пассивности, плотность тока на плато пассивности держится на невысоких значениях, почти стабильно на протяжении всего плато. Потенциал пробоя порядка 5,6 В (рис. 8б).

На втором месте по коррозионной стойкости образец титана с добавкой 1% SiC (синяя кривая). Потенциал пробоя пассивной пленки в районе 5,7 В, однако первичный пробой пассивной пленки произошел в районе 1,7В -1,8В. Далее видно, что этот пробившийся питтинг запассивировался, но в диапазоне 2,6В -2,7В начался плавный, но активный рост плотности тока (рис. 8а), что говорит о протекании замедленных процессов коррозии вплоть до пробоя (образования активного питтинга и его дальнейшего роста) при потенциале 5,7В.

Самую слабую коррозионную стойкость проявляет образец титана с добавлением 5% SiC (зеленая кривая). На графике видно, что плато пассивности и невысокие значения плотности тока этого плато в районе 0,5В -3 В. У данного образца не наблюдается первичного пробоя пассивности как у образца с 1% SiC, но пробой пассивной пленки происходит раньше, чем у других образцов. Пробой пленки и образование активного питтинга происходит в районе 3,6 В (рис. 8б).

Низкая коррозионная стойкость образцов с добавками карбида кремния проявляется, так как что с точки зрения электрохимической коррозии добавленные частицы SiC в данном случае служат включениями и являются местами для развития коррозии. Т.е. растворяются не сами включения, а их граница раздела фаз - между титаном и карбидом кремния, что служит потенциально слабым местом для образования питтингов и их дальнейшего развития.

Таким образом, при создании металломатричных композитов на основе Ti-6Al-4V и SiC целесообразно учитывать межфазные реакции и образование новых фаз, которые уменьшают размер зерна и приводят к увеличению прочности.

Заключение

1. Рассмотрены и проанализированы отечественные и зарубежные исследования в области формирования изделий из титановых сплавов методами аддитивных технологий. В результате анализа разработан план исследований, направленный на полное исследование закономерностей формирования структуры и свойств образцов из псевдо-альфа титановых сплавов, изготовленных методом прямого лазерного выращивания.

2. Установлены взаимосвязи влияния режимов ПЛВ и режимов ТО на структуру и свойства титанового сплава ТТ-3В. С помощью термической обработки удастся достичь повышения ударной вязкости за счет снятия внутренних напряжений.

3. Изучены механизмы формирования фазового состава с точки зрения моделирования процесса взаимодействия титановой матрицы с частицами SiC и последующей проверки результатов. С помощью программного пакета ThermoCalc возможно установить формирование фазового состава образцов, полученных ПЛВ, что подтверждает рентгеноспектральный микроанализ.

4. Для проверки влияния межфазных реакций на свойства сплава проведены механические и коррозионные испытания образцов с 0% SiC, 1% SiC, и 5% SiC. Описано поведение образцов изготовленных с добавлением

керамических частиц SiC в процессе одноосного растяжения при повышенных температурах. Установлено, что с увеличением температуры испытаний образцы становятся более пластичными из-за пластичной титановой матрицы, однако за счет добавления керамических частиц удается достичь незначительной потери прочностных свойств.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. С. А. Шальнова. Структура и свойства изделий из титанового сплава ВТ6, полученных методом прямого лазерного выращивания с использованием вторичного порошка / О. Г. Климова-Корсмик, М. О. Гущина [и др.] // Титан. – 2019. – № 4(66). – С. 24-31.

2. В. П. Леонов. Исследование свойств, структуры и качества металла заготовок титанового сплава Ti-4,25Al-2V, полученных методом прямого лазерного выращивания / Н. Ф. Молчанова, С.А. Шальнова [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 1(109). – С. 40-53. – DOI 10.22349/1994-6716-2022-109-1-40-53.

3. С. В. Разоренов. Динамическая прочность титанового сплава ВТ6, полученного методом прямого лазерного выращивания / Г. В. Гаркушин, А. С. Савиных [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2021. – Т. 24. – № 3. – С. 17-25. – DOI 10.24412/1683-805X-2021-3-17-25.

4. Д. В. Волосевич. Прямое лазерное выращивание металлокерамических сплавов на основе титана / С. А. Шальнова, А. М. Вильданов [и др.] // Фотоника. – 2021. – Т. 15. – № 4. – С. 296-307. – DOI 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.4.296.306.

5. О. Г. Климова-Корсмик. Исследование структуры и свойств изделий из титанового сплава ВТ6, полученных методом прямого лазерного выращивания с последующей термической обработкой / М. О. Гущина, С. А. Шальнова, П. А. Головин // Титан. – 2019. – № 3(65). – С. 8-15.

6. М. О. Гущина. Особенности получения качественных изделий из титановых сплавов, изготовленных технологией прямого лазерного выращивания / О. Г. Климова-Корсмик, С. А. Шальнова [и др.] // Фотоника. – 2019. – Т. 13. – № 8. – С. 722-735. – DOI 10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.8.722.733.

Публикации в других изданиях

7. S. A. Shalnova. Effect of recycled powder content on the structure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy produced by direct energy deposition / O. G. Klimova-Korsmik, A. M. Vildanov [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 893. – P. 162264. – DOI 10.1016/j.jallcom.2021.162264.

8. S. A. Shalnova. Electrochemical properties of the heat-treated Ti-6Al-4V alloy manufactured by direct energy deposition / M. O. Gushchina, O. G. Klimova-Korsmik [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 899. – P. 163226. – DOI 10.1016/j.jallcom.2021.163226.

9. Svetlana A. Shalnova, Direct energy deposition of SiC reinforced Ti-4Al-2V metal matrix composites: Structure and mechanical properties / Daria V. Volosevich, Maksim I. Sannikov, Ilya S. Magidov, Konstantin V. Mikhaylovskiy, Gleb A. Turichin, Olga G. Klimova-Korsmik // Ceramics International. – 2022. – In Press. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.08.097>

10. Razorenov S.V. Dynamic Strength of VT6 Titanium Alloy Manufactured by Laser Metal Deposition / Garkushin G.V., Savinykh A.S., Klimova-Korsmik O.G., Shalnova S.A., Gushchina M.O. // (2022) Physical Mesomechanics. – 2022. – 25 (1). – p. 26-32. – DOI: 10.1134/S1029959922010040

11. M. Larin. Laser welding modes optimization of the selective laser melted ti-6al-4v thin-thickness parts with complex shape / Y. Pevzner, S. Shalnova, P. Petrovskiy // Metals. – 2021. – Vol. 11. – No 12. – DOI 10.3390/met11122013.

12. S. A. Shalnova. Structure and properties of near- α titanium products obtained by direct laser deposition and heat treatment / O. G. Klimova-Korsmik, A. V. Arkhipov, F. A. Yunusov // Journal of Physics: Conference Series : 10, St. Petersburg, – St. Petersburg, 2021. – P. 012018. – DOI 10.1088/1742-

6596/2077/1/012018.

13. Volosevich D.V. Direct Metal Deposition of Titanium-Based Cermets / Shalnova S.A., Vildanov A.M., Magidov I.S., Mikhailovsky K.V., Klimova-Korsmik O.G. // Photonics Russia. – 2021. – 15 (4). – pp. 296 – 306. – DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.4.296.306

14. S. A. Shalnova. Effect of process parameters on quality of Ti-6Al-4V multi-layer single pass wall during direct laser deposition with beam oscillation / O. G. Klimova-Korsmik, M. Gushchina, G. A. Turichin // Solid State Phenomena. – 2020. – Vol. 299. – P. 716-722. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.716.

15. E. Dolgun. The influence of heat treatment on the microstructure of products manufactured by direct laser deposition using titanium alloy Ti-6Al-4V / E. Zemlyakov, S. Shalnova [et al.] // Materials Today: Proceedings : 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC 2019, Saint Petersburg, 20–21 ноября 2019 года. – Saint Petersburg: Elsevier Ltd, 2020. – P. 688-693. – DOI 10.1016/j.matpr.2020.01.523.

16. Gushchina M.O., Comparison of titanium powders and products manufactured by the direct laser deposition method / Shalnova S.A., Gerasimov N.I., Lebedeva N.V., Klimov G.G. // Key Engineering Materials, – 2019. – 822. – pp. 473-480.

17. S. A. Shalnova. Structure and phase composition of Ti-6Al-4V samples produced by direct laser deposition / G. A. Panova, N. Buczak // Key Engineering Materials. – 2019. – Vol. 822. – P. 467-472. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.822.467.

18. Гущина М.О., Шальнова С.А., Климова-Корсмик О.Г. Возможность повторного использования титановых порошков в процессе прямого лазерного выращивания // «АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЦИФРОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ. МЕТАЛЛЫ, СПЛАВЫ, КОМПОЗИТЫ»: Сборник тезисов докладов. Материалы I Всероссийской школы – конференции с международным участием. Москва, Национальный

исследовательский технологический университет «МИСиС», 2 – 4 октября 2019 г. – 56 с.

19. S. A. Shalnova. Influence of the roughness on the mechanical properties of Ti-6Al-4V products prepared by direct laser deposition technology // M. O. Sklyar, O. G. Klimova-Korsmik // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Vol. 284. – P. 312-318. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.312.

20. O. G. Klimova-Korsmik. Structure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy products obtained by direct laser deposition and subsequent heat treatment, / S. A. Shalnova, M. O. Gushchina [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*, Saint Petersburg. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing. – 2018. – P. 012061. – DOI 10.1088/1742-6596/1109/1/012061.

21. Turichin G.A. Features of structure formation in $\alpha+\beta$ titanium alloys / Klimova-Korsmik O.G., Gushchina M.O., Shalnova S.A., Korsmik R.S., Cheverikin V.V., Tataru A.S.// – *Procedia CIRP*. – 2018. . – 74. – pp. 188-191.

22. Gushchina, M.O. / Influence of the protective atmosphere on the structure and properties parts from titanium alloy Ti-4Al-2V produced by direct laser deposition // Klimova-Korsmik, O.G., Vildanov, A.M., Shalnova, S.A., Tataru, A.S., Norman, E.A. – *Journal of Physics: Conference Series*, – 2018.

23. Sklyar M.O. Influence of technological parameters of direct laser deposition process on the structure and properties of deposited products from alloy Ti-4Al-2V // Klimova-Korsmik O.G., Turichin G.A., Shalnova S.A. // *Solid State Phenomena*. – 2018. – 284 SSP. – p. 306.

24. С.А. Шальнова, О.Г. Климова-Корсмик, М.О. Гущина Структура и свойства изделий из титанового сплава ВТ6, полученных с помощью технологии прямого лазерного выращивания // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт металлургии машиностроения и транспорта. Ч.1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – с. 100-103.

25. М.О. Гущина, О.Г. Климова-Корсмик, С.А. Шальнова, А.М. Вильданов Влияние режимов прямого лазерного выращивания на структуру и свойства изделий из титанового сплава ВТ6 // Неделя науки СПбПУ:

материалы научной конференции с международным участием. Институт металлургии машиностроения и транспорта. Ч.1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – с. 88-91.

26. Шальнова С.А. Влияние атмосферы на механические свойства изделий из титанового сплава ВТ6, полученных с помощью прямого лазерного выращивания Туричин, О.Г. Климова-Корсмик, М.О. Скляр // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт металлургии машиностроения и транспорта. Ч.1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – с. 177-180.

Аспирант _____ Шальнова С.А.