

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

На правах рукописи



Селиверстов Сергей Дмитриевич

**КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
ОБОГРЕВАЕМЫХ ЛОПАТОК ВХОДНЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ  
АППАРАТОВ ГТД, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО  
ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

**05.07.05 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных  
аппаратов**

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
**Марчуков Евгений Ювенальевич,**  
д.т.н., профессор

Москва – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Анализ использования аддитивных технологий при изготовлении деталей ДЛА и ЭУ.....	11
1.2 Классификация и особенности аддитивных технологий на металлической основе.....	15
2 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛОПАТОК С ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ.....	21
2.1 Условия работы и эксплуатационные требования для лопаток с противообледенительной системой.....	21
2.2 Традиционная технология изготовления лопаток с противообледенительной системой.....	22
2.3 Обоснование выбора метода СЛС для изготовления лопаток с противообледенительной системой.....	23
3. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЛС.....	25
3.1 Оборудование и материалы для изготовления образцов.....	25
3.2 Оборудование и методики проведения экспериментов.....	28
3.2.1 Микроструктура и химический состав материала.....	28
3.2.2 Физико-механические свойства материала.....	28
3.2.3 Исследование шероховатости.....	29
3.2.4 Трибологические испытания.....	30
3.2.5 Усталостные испытания.....	32
3.2.6 Коррозионные испытания.....	33
3.2.7 Эрозионные испытания.....	34
3.2.8 Испытания на теплопроводность.....	37
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПОРОШКА CL 20ES МЕТОДОМ СЛС.....	39

4.1 Микроструктура и химический состав .....	39
4.2 Физико-механические исследования.....	46
4.3 Шероховатость поверхности.....	47
4.4 Трибологические исследования.....	48
4.5 Усталостная прочность.....	52
4.6 Коррозионная стойкость.....	54
4.7 Эрозионная стойкость.....	55
4.8 Теплопроводность.....	58
5 МЕТОДИКА КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОБОГРЕВАЕМЫХ ЛОПАТОК ВНА С ПОС, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ СЛС.....	60
5.1 Учет особенностей изготовления обогреваемых лопаток ВНА с ПОС методом СЛС.....	60
5.1.1 Зависимость пористости от угла расположения изделия в зоне построения установки СЛС.....	60
5.1.2 Учет деформации отверстий и пазов при изготовлении изделий методом СЛС.....	61
5.1.3 Учет анизотропии свойств изделий, получаемых методом СЛС.....	67
5.1.4 Методика проектирования и рекомендации по конструированию обогреваемых лопаток с ПОС, получаемых методом СЛС.....	70
5.2 Оценка распределения тепловых потоков и расхода воздуха для обогреваемой лопатки ВНА с ПОС.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Протокол механических испытаний образцов, изготовленных из порошка CL 20ES методом СЛС .....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Результаты измерений объемного износа после трибологических испытаний образцов.....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Изменение топографии поверхности образцов во время эрозионных испытаний.....	119

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** Современные газотурбинные двигатели (ГТД) не только создают тягу или крутящий момент для обеспечения движения ЛА, но и обеспечивают снабжение различных вспомогательных систем. Одной из таких систем является противообледенительная система (ПОС) ЛА и двигателя, которые обычно включают в себя систему отбора воздуха от последних ступеней компрессора или вторичной зоны камеры сгорания, патрубков или полостей транспортировки подогреваемого воздуха, а также подогреваемых элементов входного устройства или коков, стоек и/или лопаток направляющего аппарата. Если для самолетных ГТД время работы ПОС является не значительным, то для вертолетных двигателей данная система имеет гораздо большее значение. В соответствии с устоявшимися летными требованиями и опытом эксплуатации вертолетных двигателей ПОС включается при температуре наружного воздуха ниже  $+10^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности выше 70% [1], для некоторых двигателей подогрев осуществляется при температурах ниже  $+7^{\circ}\text{C}$  без учета влажности. Таким образом ПОС на вертолетных двигателях может находиться в активном режиме достаточно продолжительное время, например при полетах в условиях горной местности и наличии облачности, в условиях северных широт, во время межсезонных дождей и снегопадов и при полетах над обводненными территориями в условиях низкой температуры. В общем цикле налета вертолета около 6000 часов до капитального ремонта, время полетов с включенной ПОС может составлять 50% и более. Известно, что при работе ПОС мощность на валу двигателя снижается и может опускаться на 7% и более, а удельный расход топлива возрастает до 10% [1, 10]. Таким образом, совершенствование элементов ПОС двигателя является актуальной задачей, которая позволит повысить топливную эффективность и запас мощности при выполнении полетов в условиях возможного обледенения.

Ключевым элементом ПОС двигателя, на примере вертолетного двигателя ТВ3-117 [10], является обогреваемая поворотная лопатка направляющего аппарата первой ступени. Конструктивное исполнение лопатки близко к лопаткам турбины прежде всего за счет наличия внутренних полостей. Используемые в изготовлении материалы лопатки являются трудно обрабатываемыми [36, 42, 58], а требования



по шероховатости, коррозионной стойкости и другим характеристикам аналогичны остальным лопаткам компрессора. Появление технологий послойной печати из металлокомпозиций открывает возможность обеспечить более высокие показатели эффективности ПОС лопаток направляющего аппарата, при сохранении или снижении массы лопатки, с одновременным удешевлением ее производства.

Применение аддитивных технологий, или технологий послойной печати сегодня является неотъемлемой частью двигателестроения, как в опытном, так и в серийном производстве. В частности, аддитивные технологии обладают рядом преимуществ перед традиционными технологиями производства: значительная экономия материала за счет изготовления непосредственно по 3D-модели; возможность изготовления сложнопрофильных и полых деталей; снижение числа технологических операций [2, 11, 33, 40, 56, 60]. В тоже время технологии послойной печати имеют ряд особенностей, основное из которых это анизотропия свойств получаемых изделий, зависящая от направления выращивания изделия в установке, режимов работы лазера и др. [29, 67, 70, 102] В производстве деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок наиболее перспективной является технология селективного лазерного сплавления (СЛС), в которой формирование объемного изделия происходит путем синтеза металлического порошка в слое под воздействием лазерного излучения [8, 32, 34, 52].

Положительный опыт применения технологии СЛС демонстрируют как зарубежные, так и отечественные компании. Однако существующие методики проектирования и программного обеспечения имеют недостаточно инструментов для проектирования изделий под аддитивное производство. Программное обеспечение, как правило, предлагает варьировать только параметрами скорости печати, стоимости и коробления детали, в то время как будущие эксплуатационные свойства спрогнозировать невозможно. Поэтому, в настоящее время изучение характеристик изделий, их эксплуатационных свойств осуществляется экспериментальным путем для каждого конкретного изделия. Кроме того, отсутствуют необходимые методики конструирования лопаток ГТД с внутренними полостями, учитывающие особенности материалов и технологии синтеза изделий при реализации процесса СЛС.

**Степень разработанности темы диссертации.** В России и за рубежом исследованием технологии СЛС, а также ее применением для изготовления деталей авиационного двигателестроения занимались многие ученые: М.А. Зленко, А.П. Назаров, И.В. Шишковский, В.Г. Смелов, В.М. Довбыш, J.P. Kruth, T. Ozel, A. Remier, E.M. Weissman, Chee Kai Chua и другие. Исследования большинства авторов направлены на изучение влияния технологических параметров процесса СЛС (мощность лазерного излучения, скорость и стратегия сканирования, толщина единичного слоя изделия и т.д.) на микроструктуру и физико-механические свойства изделий. Не смотря на рост количества отечественных разработок в области производства СЛС-машин, а также порошков для них, возможность варьирования технологическими параметрами не всегда возможна в полном объеме. Этот фактор значительно усложняет проектирование технологических процессов (ТП) для технологии СЛС.

В опубликованных работах недостаточно полно раскрывается вопрос разработки и применения методик проектирования ТП изготовления заготовок деталей ГТД с применением технологии СЛС. Специалисты институтов ВИАМ, ЦИАМ, компании GE Power дают лишь общие рекомендации к проектированию ТП, что недостаточно для получения изделий с заданными свойствами.

**Цель работы:** конструкторско-технологическое совершенствование обогреваемых лопаток ГТД, получаемых методом селективного лазерного сплавления.

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

1. Провести сравнительные экспериментальные исследования эксплуатационных и технических характеристик образцов из прутка марки AISI 316L и полученных по технологии СЛС из близкого по составу к AISI 316L металлического порошка CL 20ES;
2. Определить закономерности влияния угла ориентации образцов в камере построения в процессе СЛС на эксплуатационные и технические характеристики;

3. Разработать методику конструкторско-технологического совершенствования обогреваемых лопаток ВНА с ПОС за счет применения технологии СЛС при их изготовлении;

4. Разработать вариант конструкции обогреваемой лопатки ВНА, который обеспечит снижение расхода отбираемого для обогрева воздуха, а также реализуемый методом СЛС.

**Объект и предмет исследования.** Объект исследования – обогреваемая лопатка ВНА с ПОС. Предмет исследования – ТП изготовления заготовок обогреваемых лопаток ВНА с ПОС с применением технологии СЛС.

#### **Научная новизна:**

1. Установлена зависимость основных эксплуатационных характеристик (шероховатость, коррозионная стойкость, эрозионная стойкость, фреттинг-износ, теплопроводность) от угла ориентации в камере построения, а также определен предел выносливости для образцов из сплава CL 20ES.

2. Разработана комплексная методика проектирования обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, позволяющая реализовать рациональную конструкцию изделия, учитывающую анизотропию свойств, получаемую в процессе СЛС;

3. Определена и расчетно-математическими методами обоснована рациональная конструкция обогреваемой лопатки ВНА с ПОС для вертолетного ГТД, полученная с учетом разработанной методики проектирования обогреваемых лопаток ВНА с ПОС получаемых методом СЛС.

**Теоретическая значимость работы** заключается: в получении зависимостей влияния угла ориентации изделия в камере построения в процессе СЛС на эксплуатационные характеристики; в разработке математической модели, позволяющей прогнозировать эксплуатационные характеристики изделий, получаемых методом СЛС в зависимости от угла ориентации изделия в камере построения.

**Практическая значимость работы** заключается: в снижении расхода воздуха на работу ПОС, и как следствие повышение общего КПД двигательной установки; в снижении итераций при разработке новых конструкций авиационного двигателестроения; в получении методических рекомендаций для конструкторов и технологов в авиационном двигателестроении по конструированию обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Экспериментальные исследования проводились на сертифицированном оборудовании с использованием аттестованных средств измерений. Исследования вариантов конструкций обогреваемых лопаток осуществлялись с использованием программного комплекса Ansys CFX. Для разработки математической модели, позволяющей прогнозировать эксплуатационные характеристики изделий, получаемых методом СЛС в зависимости от угла установки изделия в камере построения использован графоаналитический метод.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментальных исследований зависимости основных эксплуатационных характеристик (шероховатость, коррозионная стойкость, эрозионная стойкость, фреттинг-износ, теплопроводность) от расположения изделий в зоне построения, а также предел выносливости для образцов из сплава CL 20ES для заготовок обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС;
2. Регрессионная модель, позволяющая прогнозировать основные эксплуатационные характеристики изделий, получаемых методом СЛС в зависимости от угла ориентации изделия в камере построения;
3. Методика проектирования технологического процесса производства обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых с применением технологии СЛС.

**Достоверность результатов исследования** подтверждается использованием современного аттестованного оборудования, а также апробированных методик проведения испытаний. Результаты исследований не противоречат опубликованным работам других авторов. Достоверность полученных результатов расчетов подтверждается использованием известного программного обеспечения и методик моделирования, а также сравнением с известными экспериментальными данными.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты работы были представлены на Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, октябрь 2017 г.); форуме аддитивных технологий «Применение 3D-печати в различных отраслях промышленности» (Москва, май 2018 г.); II Международной научно-технической конференции «International Conference on Aerospace System Science and Engineering 2018» (Москва, 2018 г.); XVIII Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2019» (Москва, ноябрь 2019 г.); XLVI Международной научной конференции «Гагаринские чтения – 2020» (Москва, 2020 г.); Международной конференции по аддитивным технологиям и 3D-решениям «Индустрия-3D» (Москва, май 2021 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них в рецензируемых научных изданиях и изданиях, приравненных к ним опубликовано 5 работ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 95 наименований и 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 124 страниц, 67 рисунков и 18 таблиц.

**Личный вклад соискателя** заключается: в постановке задач и формулировании технических требований к экспериментальным работам по определению основных эксплуатационных характеристик образцов, получаемых

методом СЛС; в непосредственном участии в проведении экспериментов; в обработке экспериментальных данных; в разработке регрессионной модели, позволяющей прогнозировать основные эксплуатационные характеристики изделий, получаемых методом СЛС в зависимости от угла установки изделия в камере построения; в разработке основных положений методики проектирования и рекомендаций по конструированию обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС.

# 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. Анализ использования аддитивных технологий при изготовлении деталей ДЛА и ЭУ.

Разработка нового изделия в авиационном двигателестроении требует большого объема научно-исследовательских, опытно-конструкторских и экспериментальных работ. Современные программные комплексы, а также цифровые технологии проектирования, моделирования и расчетов позволяют значительно сократить затраты на этапы НИР и ОКР. Однако сохраняется необходимость в создании экспериментальных и опытных образцов, а традиционные технологии производства, как правило, требуют значительных материальных, организационных и временных затрат. В связи с этим в авиационном двигателестроении интенсивно развивается применение аддитивных технологий.

Аддитивные технологии – процесс изготовления изделий на основе компьютерных 3D-моделей, путем послойного соединения материала. Первые запатентованные установки трехмерной печати появились в середине 80-х гг. XX в. Изначально основным применением аддитивных технологий были макетирование, быстрое прототипирование и изготовление мастер-моделей для последующего литья, однако с развитием функциональной части установок трехмерной печати, программного обеспечения (ПО) и новыми материалами, сегодня уже можно говорить об изготовлении готовых функциональных изделий [14, 68, 88].

Применительно к изготовлению деталей ДЛА и ЭУ наиболее востребованными являются технологии трехмерной печати из металла. Согласно последней классификации, предложенной ASTM в 2012 г., трехмерная печать из металла разделяется по принципу построения на две группы: расплавление порошка в заранее сформированном слое (Powder bed fusion) и осаждение при прямом подводе энергии (Direct energy deposition) [62]. На сегодняшний день в авиационном двигателестроении наиболее востребованной является первая группа, поскольку эти технологии обеспечивают большую точность изделий.

Во многих странах проводится как оснащение предприятий и опытно-конструкторских бюро установками трехмерной печати из металла, так и создание отдельных центров аддитивных технологий. Так, например, специалисты ВИАМ в рамках совместного проекта с Фондом перспективных исследований, а также при участии АО НПО «ОКБ им. М.П. Симонова» изготовили с помощью аддитивных технологий прототип малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД) для беспилотных летательных аппаратов [46] (рис. 1.1). Основная часть деталей и узлов двигателя были созданы по технологии селективного лазерного сплавления из металлопорошковых композиций жаропрочного и алюминиевого сплавов, которые также были разработаны в институте. Новая технология позволила сократить время изготовления двигателя в 20 раз, а также снизить стоимость производства более чем в 2 раза. Этот МГТД успешно прошел летные испытания, дополнительно разработана линейка перспективных МГТД в классе тяг 10, 29, 125 и 150 кгс.

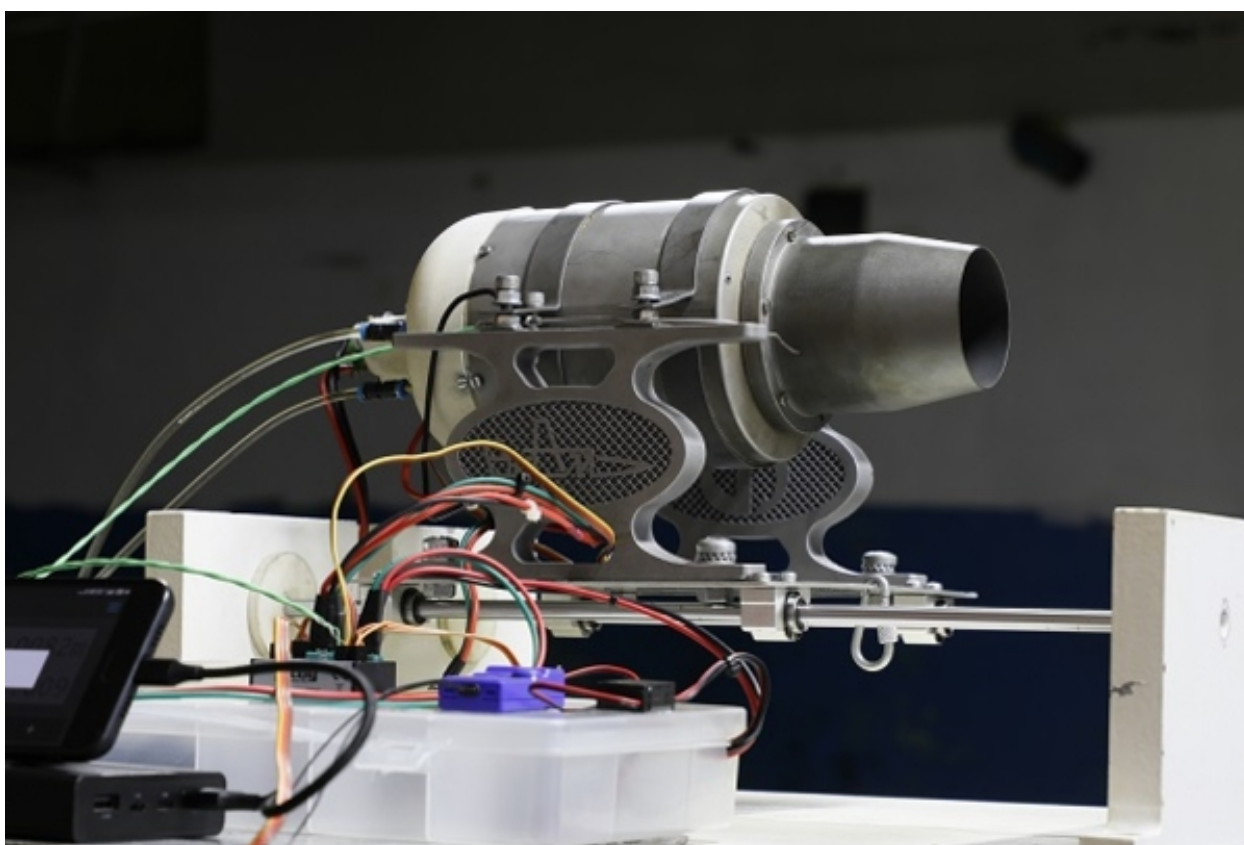


Рис. 1.1. Аддитивный двигатель, ВИАМ

Компания GE Aviation в настоящее время освоила технологию производства топливной форсунки газотурбинного двигателя из сплава кобальт-хром методом трехмерной печати (рис. 1.2). Топливная форсунка уже прошла наземные



испытания и была сертифицирована для использования на ГТД гражданских самолетов. Новая технология позволяет заменить конструкцию из более чем 20 компонентов на единую деталь с меньшим весом, улучшенными эксплуатационными свойствами и уменьшенной стоимостью [83].



Рис. 1.2. Аддитивная топливная форсунка, GE Aviation

SAFRAN Group определяет аддитивные технологии как прорывные для производства прототипов и функциональных деталей двигателей летательных аппаратов. С момента внедрения технологии компании отработали изготовление таких компонентов двигателя, как блок направляющих лопаток и интегрированный топливный коллектор [83].

Для ОАО «Авиадвигатель» также специалистами ВИАМ были изготовлены завихрители фронтального устройства камеры сгорания методом селективного лазерного сплавления, полностью отвечающие требованиям конструкторской документации [24]. Переход на новую технологию сократил цикл производства завихрителей в 10 раз по сравнению с литьем по выплавляемым моделям.

Центр космических полетов им. Джорджа Маршалла (MSFC) начиная с 2010 года развивает использование трехмерной печати металлом для изготовления различных компонентов устройств сгорания [74]. Специалисты центра отмечают фактически полное отсутствие ограничений на сложность геометрии, что позволяет изготавливать конструкции ранее невозможные для традиционных технологий производства. Помимо этого, становится возможным снижение количества деталей и выполняемых технологических операций. За время развития аддитивных технологий в этом центре были продемонстрированы 50-процентная экономия затрат на производство опытных образцов и 50-процентное сокращение времени производства по сравнению с традиционными методами производства.

Компания Rolls-Royce начиная с 2010 года использует аддитивные технологии для ремонта компонентов двигателей, а начиная с 2015 года производит целые узлы двигателей с нуля. Совместно с Национальным центром аддитивного производства (AMBC) и компанией Arcam удалось изготовить крупногабаритный титановый корпус передней опоры двигателя, диаметр которого составляет 1.5 м [90] (рис. 1.3). Узел успешно прошел серию наземных испытаний.



Рис. 1.3. Аддитивный корпус передней опоры двигателя, Rolls-Royce

На основе этого краткого обзора достижений различных организаций в области аддитивных технологий можно утверждать, что технологии печати металлом являются особо перспективными для изготовления деталей ДЛА и ЭУ с внутренними полостями, поскольку при грамотном проектировании изделия под данную технологию, а также самого технологического процесса можно изготавливать уникальные изделия, исключив при этом такие технологические

операции, как сварка, штамповка и другие [48]. Также возможно улучшение параметров теплообмена за счет получаемой шероховатости и псевдопористой структуры [92]. В то же время, такие поверхности, как спинка и корытце лопатки ДЛА и ЭУ требуют меньшей шероховатости, чем сегодня может обеспечить селективное лазерное сплавление. Все это приводит к необходимости всестороннего изучения свойств деталей, получаемых методом селективного лазерного сплавления.

В научной литературе большое внимание уделяется вопросам микроструктуры материала после сплавления и термообработки [69, 72, 98-100] механических свойств изделий в зависимости от режимов сплавления и термообработки [73, 78, 81, 85, 86], эксплуатационных свойств изделий таких как коррозионная стойкость и сопротивление износу и эрозии [64, 65, 84, 95, 101], а также вопросам образования пор и внутренних дефектов в процессе синтеза [80, 82, 87, 89, 93].

## **1.2. Классификация и особенности аддитивных технологий на металлической основе.**

Аддитивные технологии, которые появились в 80-х годах прошлого столетия, сформировали отдельный метод формообразования. По классификации канадского ученого М. Burns [66] можно выделить 3 метода формообразования:

- субтрактивный метод, где придание изделию формы осуществляется путем удаления части материала исходной заготовки (точение, фрезерование, резание и пр.);
- формативный метод, где придание изделию формы осуществляется путем воздействия элементов технологической оснастки на исходную заготовку или материал без удаления материала;
- аддитивный, где придание изделию формы осуществляется путем синтеза материала по заранее подготовленной компьютерной модели.

Структура аддитивного метода формообразования представлена на рис. 1.4 [94]:



Рис. 1.4. Структура аддитивного метода формообразования [94]

Входными данными для любой аддитивной технологии является трехмерная модель (CAD-модель) будущего изделия, при этом, ряд технологий позволяет получать не только отдельные изделия, но и сборочные единицы. Здесь можно выделить одно из первых преимуществ метода – это цифровизация. STL-файлы сегодня стали неким стандартом для аддитивного производства, поскольку созданные в процессе триангуляции фасетные тела имеют достаточно простую для математического описания структуру (набор соединенных между собой треугольников), которая может быть экспортирована из любого современного программного пакета для трехмерного моделирования. Разделение на слои, как правило, происходит в программном обеспечении, поставляемом с конкретным оборудованием: именно здесь определяются все параметры изготовления под конкретную технологию. Сам процесс печати происходит послойно и без участия человека, а также без необходимости какой-либо дополнительной технологической оснастки. Именно поэтому аддитивные технологии позволяют получать сложные пространственные изделия в относительно сжатые сроки. После процесса изготовления (3D-печати) изделия, чаще всего, необходима финишная обработка: механообработка, термообработка и пр.

Объемная печать металлом, появившаяся в 90-х годах прошлого столетия, как было отмечено выше, имеет две основные разновидности по способу подвода материала: послойный синтез и прямой синтез. К первой группе относятся технологии печати, где синтез металлического порошка осуществляется на заранее сформированном (нанесенном) слое, путем подвода энергии сфокусированным пятном лазерного или электронного излучения по определенной траектории (стратегии сканирования). Ко второй группе относятся технологии печати, где

синтез металлического порошка осуществляется непосредственно в зоне подвода материала и энергии.

Основными представителями первой группы являются технологии селективного лазерного спекания, селективного лазерного сплавления, а также селективное электронно-лучевое плавление. В первых двух технологиях источником энергии синтеза является лазерный луч, в то время как в электронно-лучевом плавлении синтез металлического порошка осуществляется с помощью пучка электронов. Процесс изготовления изделия в этой группе циклический и состоит из следующих этапов:

- нанесение и разравнивание слоя порошка по поверхности рабочей платформы;
- синтез частиц порошка под воздействием энергии в соответствии с текущим слоем изделия;
- перемещение рабочей платформы вниз на величину слоя.

Принципиальной же разницей между спеканием и сплавлением является отсутствие или наличие фазового перехода, что с одной стороны делает процесс более предсказуемым и требует меньших мощностей, а с другой не может обеспечить однородную структуру со 100% плотностью.

Технологии второй группы также можно разделить по источнику энергии: прямое осаждение металла лазерным лучом и прямое осаждение металла электронным лучом.

Основные параметры аддитивных технологий на металлической основе, а также их сравнение представлены в таблице 1.1 [96]:

Таблица 1.1. Основные параметры аддитивных технологий на металлической основе

Характеристика	СЛС	СЭЛП	Лазерная наплавка
Скорость построения	5-20 см <sup>3</sup> /ч	до 80 см <sup>3</sup> /ч	до 70 см <sup>3</sup> /ч
Точность построения	±0,02-0,05 мм	±0,2 мм	±0,125-0,25 мм
Максимальные габариты детали	1500 мм × 1000 мм × 1000 мм	350 мм × 350 мм × 430 мм	Ограничены рабочим диапазоном робота

Исходя из возможностей, наиболее востребованной и перспективной для производства полых деталей ГТД является технология селективного лазерного сплавления.

Модель процесса СЛС строится согласно структуре, показанной на рис. 1.5. На входе имеется трехмерная модель будущего изделия, спроектированная с учетом всех допусков и припусков на процесс печати (модель должна учитывать усадку материала в процессе печати) и постобработки (снятие части материала для уменьшения шероховатости и пр.).

Для дальнейшей работы трехмерную модель конвертируют в STL-формат. Этот этап также должен учитывать все геометрические требования к поверхности изделия, поскольку низкий допуск на триангуляцию может привести к сильному искажению поверхностей. Высокий допуск на триангуляцию не всегда возможен, поскольку с ростом количества треугольников (фасет) возрастает объем конечного STL-файла, который может быть не прочитан программным обеспечением СЛС-машины. Этот фактор также необходимо учитывать при проектировании технологического процесса.

Подготовленный STL-файл загружается в программное обеспечение СЛС-машины, где происходит разбиение модели на слои и создание управляющей программы. На этом этапе определяются все параметры работы установки в процессе синтеза: толщина единичного слоя изделия, мощность лазерного излучения, скорость сканирования (перемещения лазерного пятна) и другие. Толщина единичного слоя напрямую влияет на качество поверхности изделия, а также на время производства: чем меньше толщина слоя, тем выше качество поверхности и уровень детализации, а также больше время производства. Большинство производителей СЛС-машин и программного обеспечения закладывают готовые файлы настроек для конкретных материалов, где прописаны все параметры работы установки. В таком случае оператору достаточно выбрать соответствующий файл настроек и толщину единичного слоя, что обеспечит гарантированную успешную печать изделия. В то же время, многие программы для СЛС-машин имеют либо открытый код, либо возможности по изменению параметров синтеза. Также на этом этапе создаются поддерживающие структуры –

«строительные леса», которые удерживают изделие в процессе печати, а также обеспечивают отвод тепла от изделия к платформе построения. По окончании этапа генерируется файл – управляющая программа для СЛС-машины (рис. 1.5).

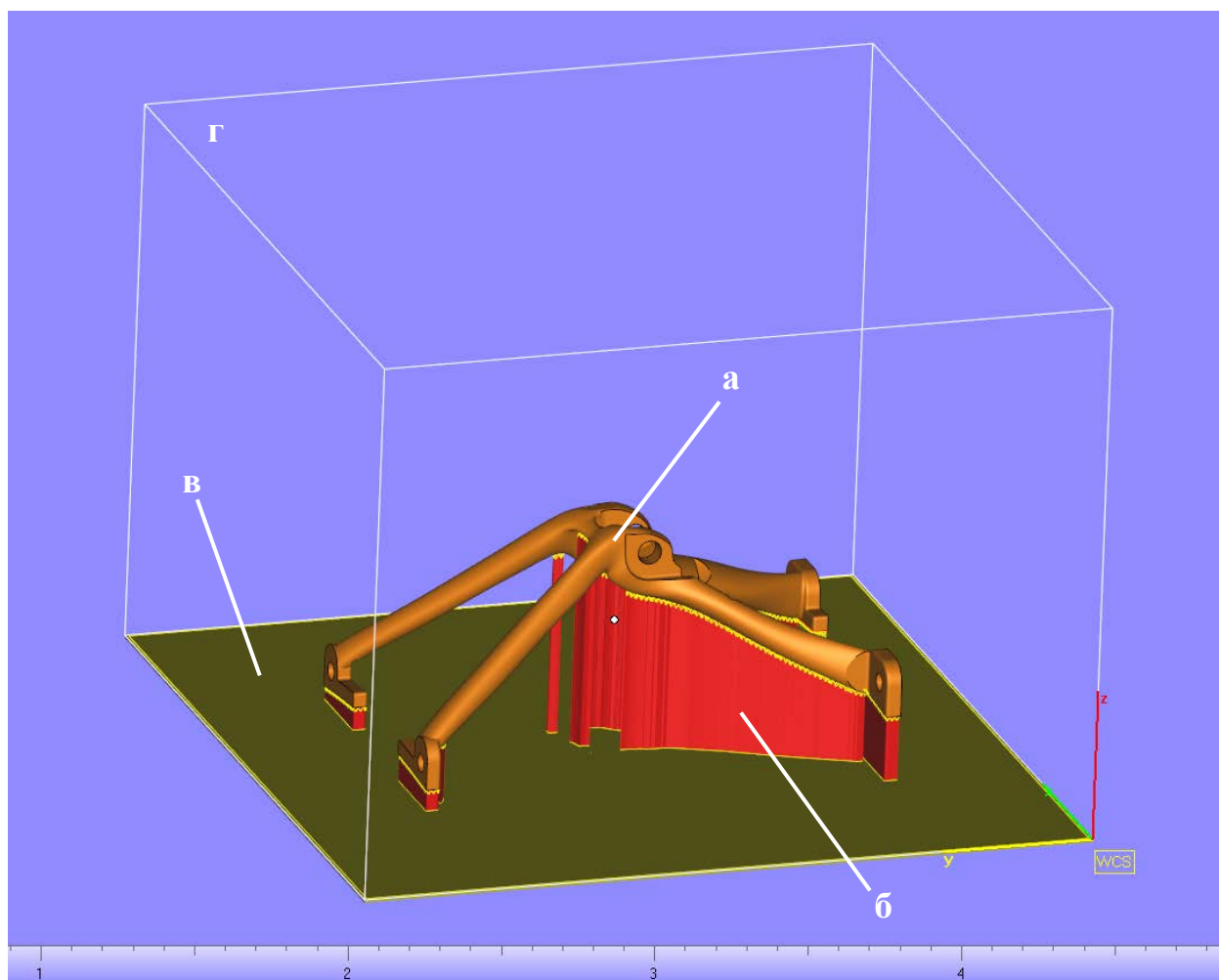


Рис. 1.5. Этап подготовки управляющей программы для печати: а – изделие, б – поддерживающие структуры, в – платформа построения, г – область построения

Параллельно с этапом создания управляющей программы, оператор СЛС-машины подготавливает ее к процессу печати: загружает необходимый материал (порошок), устанавливает платформу печати. В будущем этот процесс может быть полностью автоматизирован, и уже сегодня некоторые производители предлагают роботизированную загрузку материала.

Подготовленная управляющая программа загружается в СЛС-машину и происходит процесс печати изделия. Сам процесс полностью автоматизирован, и одновременно предоставляет оператору информацию о состоянии производства: время печати, технологические параметры и пр. Некоторые производители

интегрируют в свои СЛС-машины системы визуального контроля, в том числе инфракрасные камеры, позволяющие отслеживать тепловое состояние камеры построения.

Заключительным этапом процесса СЛС является извлечение изделия из установки и постобработка. Камера построения и изделие очищаются от не синтезированного порошка, который собирается в отдельный бункер и может быть использован вторично после просеивания. Изделия, полученные методом СЛС, как правило, имеют высокие остаточные напряжения [9, 26, 75, 91]. Поэтому обязательным является последующий низкотемпературный отжиг, снимающий их. Далее изделие отделяется от платформы построения, отделяются поддерживающие структуры. В зависимости от технических требований к изделию, может понадобиться дополнительная обработка поверхностей: чистовая механическая обработка, электрохимическая обработка и другие [7, 53, 59].



## 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛОПАТОК С ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

### 2.1 Условия работы и эксплуатационные требования для лопаток с противобледенительной системой.

Лопатка ВНА имеет сложную пространственно изогнутую аэродинамическую форму. Рабочие условия можно назвать благоприятными, поскольку на ВНА поступает воздух из окружающей среды, но в то же время лопатки ВНА подвержены абразивному и коррозионному износу. В производстве таких лопаток используют высокопрочные коррозионностойкие сплавы (12Х18Н10Т, 03Х17Н14М3 и др.). В процессе работы входные кромки лопаток могут обмерзать, что негативно сказывается на работе всей двигательной установки [19, 23, 45]. По этой причине их делают полыми, с целью подогрева воздухом, отбираемым за V ступенью компрессора.

Лопатка ВНА является поворотной, устанавливается в корпус через втулки.

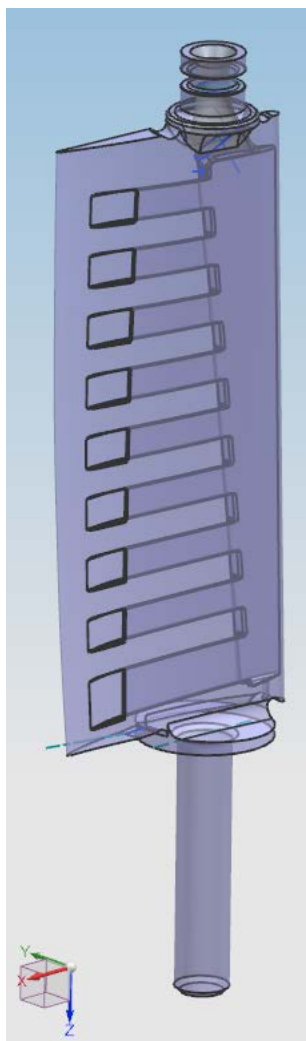


Рис. 2.1. 3Д-модель лопатки ВНА с ПОС

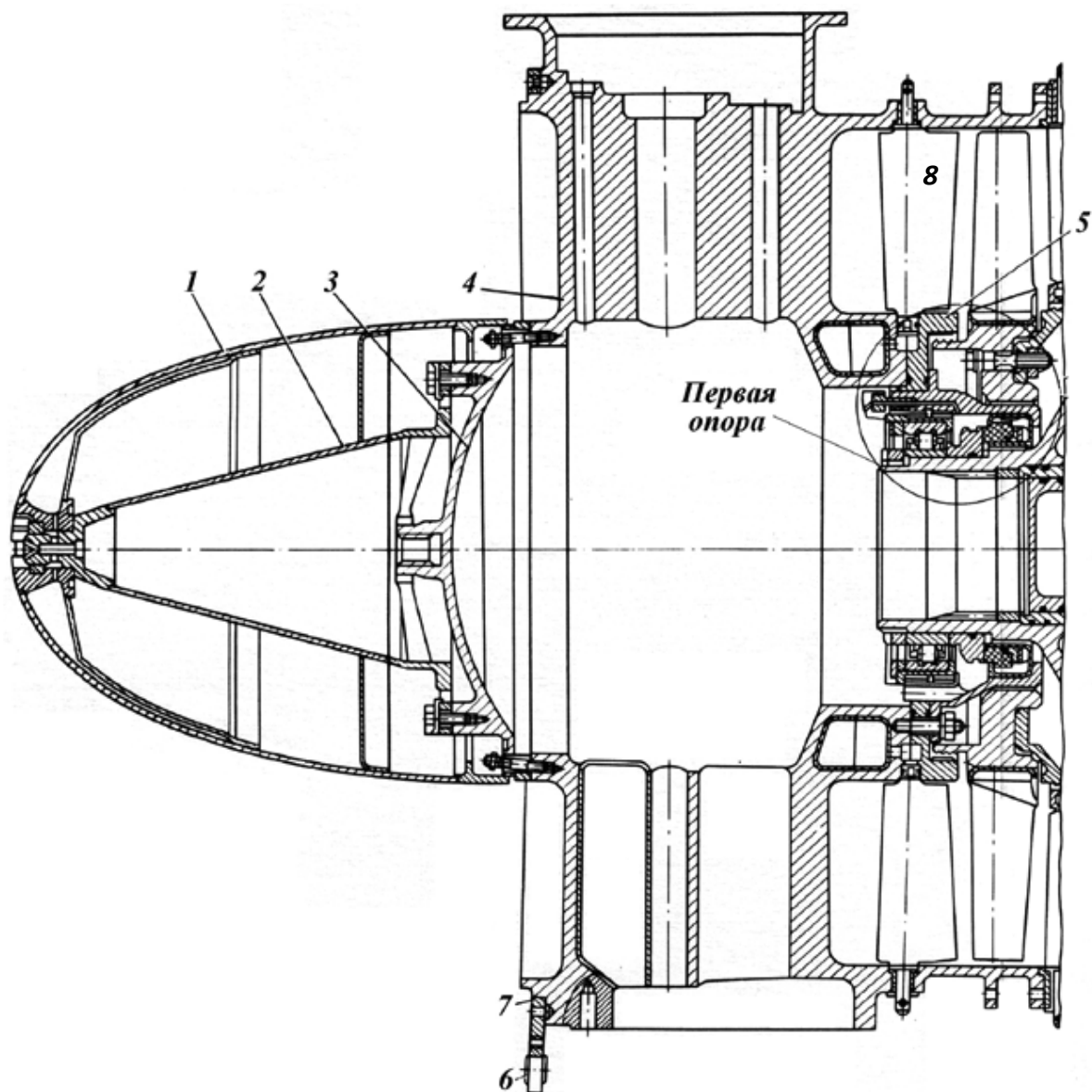


Рис. 2.2 – Разрез корпуса I опоры двигателя ТВ3-117: 1 – кок, 2 – конус, 3 – крышка, 4 – горизонтальная стойка, 5 – узел I опоры, 6 – шарнирное гнездо подвески двигателя, 7 – фланец корпуса I опоры, 8 – лопатка ВНА

## **2.2 Традиционная технология изготовления лопаток с противообледенительной системой.**

Традиционная технология изготовления лопатки ВНА с ПОС включает в себя множество операций, в том числе изготовление металлических пресс-форм методами механической обработки, последующие операции формовки оболочки, фрезерование внутренних каналов, пайку/сварку оболочек, финишную механическую и химическую обработку [44, 47, 57].

Изготовление пресс-формы методом механической обработки – длительный и сложный технологический процесс, включающий получение заготовок деталей

пресс-формы из поковок, проката или литьем из инструментальных сталей, предварительную обработку заготовок на станках с ЧПУ, слесарную обработку, термическую обработку, чистовую обработку заготовок деталей на металлорежущих станках, доводку наиболее ответственных поверхностей заготовок деталей пресс-форм, контрольную сборку и испытание пресс-формы.

Также возможно изготовление лопаток с применением энергофизических методов обработки. Вначале изготавливают части будущей лопатки методом штамповки, соединение которых сваркой формирует внешний и внутренний облик будущего изделия. Некоторые каналы и отверстия могут быть сформированы методом электроэрозии, однако пространственная сложность таких систем подогрева/охлаждения сильно ограничена возможностями технологий.

Одним из вариантов получения внутренних полостей в изделиях ГТД является технология литья металла в форму с керамическим стержнем, формирующим внутренние каналы лопатки [28]. 3D-модель стержня представляет собой сложную внутреннюю полость охлаждаемой лопатки. Стержень будет служить вкладышем в пресс-форму для изготовления литейной формы и в последующем должен удаляться с помощью щелочи. Ввиду сложной конфигурации каналов применение пресс-форм для изготовления таких стержней не всегда возможно.

Большинство перечисленных операций можно исключить за счет использования технологий печати металлом. За один запуск СЛС-машины возможно получить целый комплект заготовок будущих лопаток ВНА, для которых останется лишь термическая обработка, отделение от платформы построения и доводка поверхностей до необходимой шероховатости.

### **2.3 Обоснование выбора метода СЛС для изготовления лопаток с противообледенительной системой.**

Исходя из основных параметров печати, представленных в таблице 1.1, а также формы и допуска на точность изготовления лопатки, наиболее перспективной выглядит технология СЛС: две другие технологии не обеспечат необходимых размеров изделия. Помимо этого, технология СЛС является наиболее востребованной и развитой на сегодняшний день [96], благодаря чему есть

большой выбор оборудования и материалов, а также возможность варьирования параметров.

### 3. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЛС

#### 3.1 Оборудование и материалы для изготовления образцов.

Для оценки возможности использования технологии СЛС в производстве полых деталей ГТД было решено изготавливать образцы для испытаний по двум технологиям: традиционная (механическая обработка) и аддитивная.

Все аддитивные модельные образцы были изготовлены при участии АО «Центр аддитивных технологий» на установке M2 Cusing компании Concept Laser. Основные технические параметры представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Основные технические параметры установки  
Concept Laser M2Cusing

Параметр	Значение
Область построения, XYZ	250x250x350 мм
Технология	LaserCUSING
Толщина слоя	20-80 мкм
Диаметр пятна	50 мкм
Тип лазера	Волоконный лазер 400 Вт
Скорость производства	2-35 см <sup>3</sup> /час (в зависимости от материала)
Потребление инертного газа	<1 м <sup>3</sup> /час
Материалы	сплавы титана, алюминия, кобальт-хрома, нержавеющая сталь, жаропрочная сталь, дисперсионно-твердеющая сталь, чистый титан

Технология LaserCUSING [22] является запатентованной в 2015 году фирмой Concept Laser, в основе которой лежит плавление порошка в слое с помощью лазерного излучения. Таким образом, установка относится к группе Bed deposition и является разновидностью технологии СЛС. Режимы работы установки представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Основные режимы работы  
установки Concept Laser M2Cusing

№	Составляющая режима	Параметры и их значения				
		Мощность, Вт	Скорость, мм/с	Размер пятна, мкм	Офсет, мм	Шаг штриховки, мм
1	Поддержка	130	1000	50	0,1	-
2	Заливка корки	180	700	140	0,0825	0,115
3	Контур корки	150	300	50	0,06	-
4	Заливка сердцевины	370	900	160	-	0,095
5	Контур сердцевины	150	1500	50	0,075	-

Материал, используемый для изготовления аддитивных образцов – порошок стали CL 20ES. Паспортный химический состав представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Химический состав порошка для печати CL 20ES.

Элемент	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S
Содержание, %	основа	16,5-18,5	10,0-13,0	2,0-2,5	0-2,0	0-1,0	0-0,045	0-0,030	0-0,030

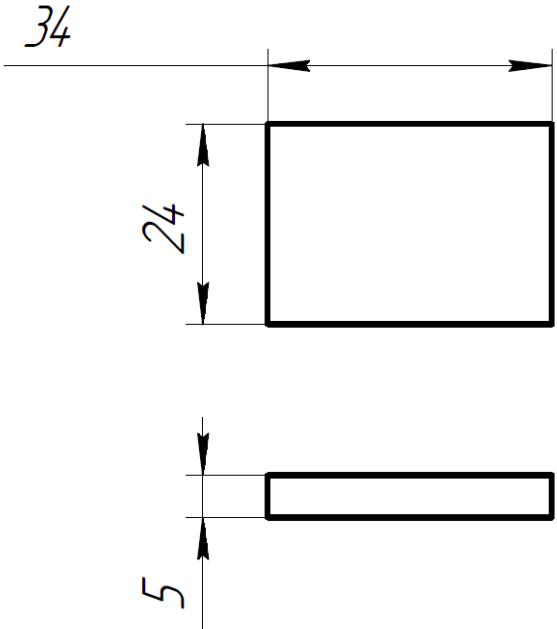
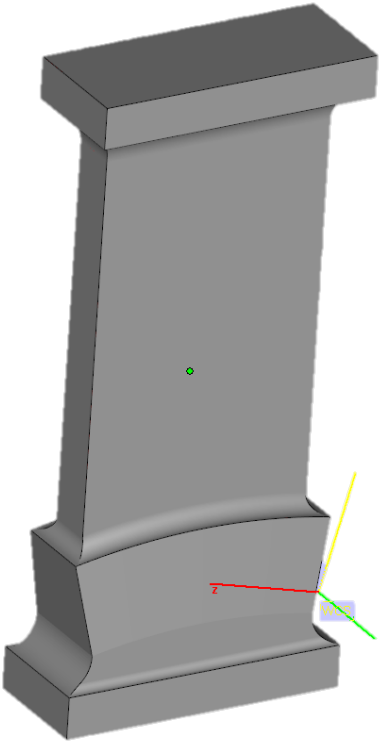
Все образцы сравнения были изготовлены при участии ММП им. Чернышева на механообрабатывающих станках, а также с применением энергофизических методов обработки (электроэрозия). Материал, используемый для изготовления традиционных образцов – нержавеющая сталь AISI 316L в виде прутка из проката. Паспортный химический состав представлен в таблице 3.4.

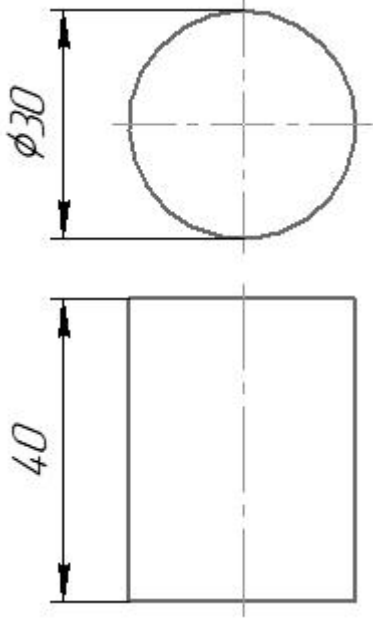
Таблица 3.4. Химический состав прутка стали 316L.

Элемент	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S
Содержание, %	основа	16,720	10,070	2,050	1,570	0,370	0,036	0,022	0,023

Всего было подготовлено 3 вида геометрии образцов: для усталостных испытаний аддитивных образцов, для испытаний на теплопроводность аддитивных образцов и для остальных видов испытаний (таблица 3.5). Геометрия аддитивных образцов доводилась до требуемой к испытаниям путем механической обработки.

Таблица 3.5. Образцы для экспериментов.

Вид образца	Форма образца	Назначение
№1		<p>Микроструктура и химический состав; шероховатость; эрозионная стойкость; коррозионная стойкость; трибологические свойства</p>
№2		<p>Усталостная прочность, аддитивная технология</p>

№3		Теплопроводность
----	--	------------------

### 3.2 Оборудование и методики проведения экспериментов.

#### 3.2.1. Микроструктура и химический состав материала.

Свойства материалов, в том числе сталей непосредственно связаны с химическим составом и микроструктурой [37, 61]. Исходя из этих знаний можно предугадать поведение материала в различных условиях, склонность к определенным дефектам и пр. Для анализа микроструктуры и элементного состава поверхностей исследуемого аддитивного материала применялись методы сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа с использованием установки Carl Zeiss EVO-40 и приставки EDS INCA X-ray Oxford instr. На образцах вида №1 были сделаны поперечный и продольный трекам от лазера шлифы с помощью шлифовально-полировального станка LaboPol-4 с дозатором LaboDoser фирмы Struers. Шлифование проводилось последовательно с использованием абразивных кругов разной размерности зерен до P2000. Для получения контрастных изображений структуры материала, после исследования химического состава образцы подвергались травлению в растворе азотной кислоты.

#### 3.2.2. Физико-механические свойства материала.

Исследование основных физико-механических свойств аддитивных образцов осуществлялось по методикам, аналогичным для других методов формообразования. Испытания проводились по ГОСТ 1497-84 [16].

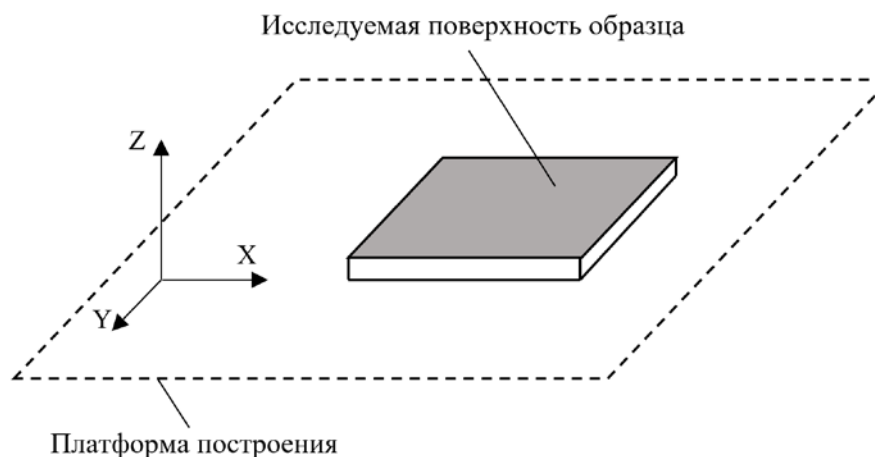


Предварительно были сделаны заготовки образцов методом печати, затем форма доводилась до требуемой методами механической обработки.

### 3.2.3. Исследование шероховатости.

Одной из особенностей технологии СЛС, как было описано ранее, является наличие значительной шероховатости поверхности после печати. На ее величину влияет множество факторов, среди которых сферичность и размер частиц порошка, стратегия и мощность лазерного излучения, а также ориентация поверхности в камере построения [20, 39]. Поскольку параметры порошка и работы установки зачастую недоступны для изменения, интересно исследовать зависимость шероховатости от ориентации изделия в камере построения.

Для решения этой задачи были напечатаны образцы вида 1 под углами 0, 45 и 90 градусов к платформе построения. Отделенные от платформы образцы не подвергались какой-либо дополнительной механической обработке. На образцах под углами 0 и 45 градусов исследовалась плоскость, обращенная от платформы построения, а на образце под углом 90 градусов – боковая плоскость (рис. 3.1). Шероховатость определялась с помощью конфокального интерференционного микроскопа Olympus LEXT OLS 5000.



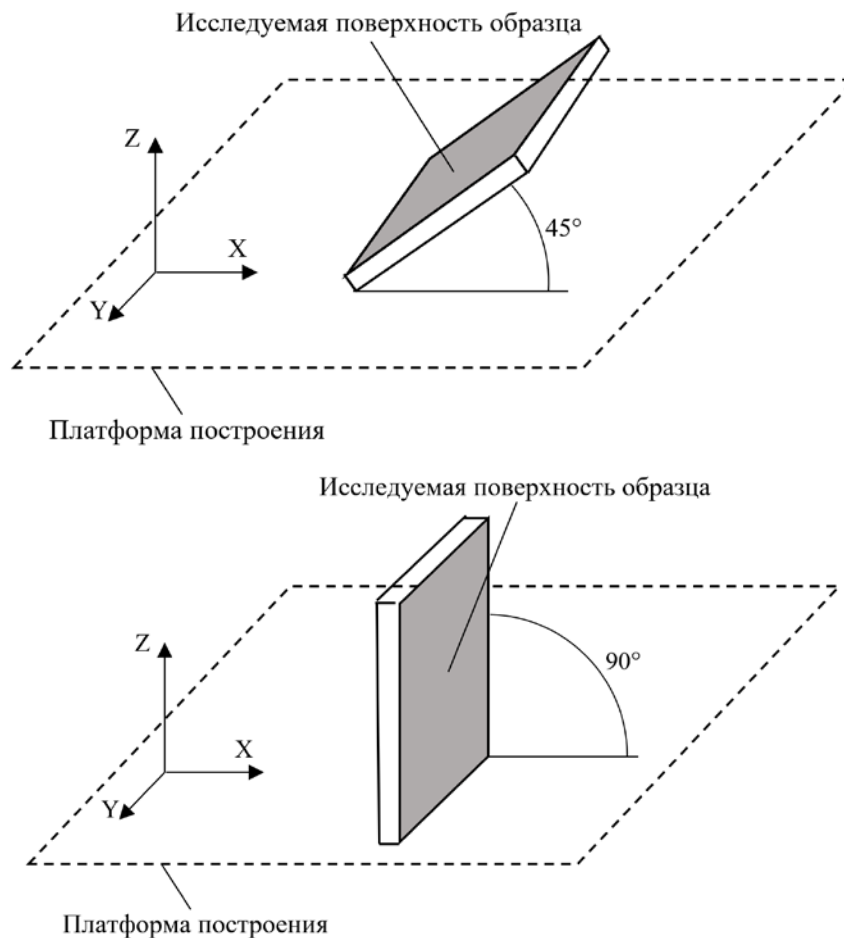


Рис. 3.1. Исследуемые поверхности образцов на шероховатость.

### 3.2.4. Трибологические испытания.

Опыт эксплуатации ГТД и ЭУ показывает, что к поломке деталей приводят в основном поверхностные повреждения, возникающие из-за накапливающихся усталостных дефектов [15, 43, 55]. Причиной же возникновения большинства усталостных дефектов является фреттинг-износ. В связи с этим, было решено проводить сравнительные трибологические испытания для оценки стойкости аддитивных деталей к фреттинг-износу.

Исследования проводились на разработанной на кафедре 205 МАИ машине трения [31] (рис. 3.2). Установка реализована по схеме, где осуществляется возвратно-поступательное движение образцов с контактами различных типов. Исследуемый тип контактного взаимодействия – сфера/плоскость (рис. 3.3). В качестве контртела использовалась сфера из оксида алюминия. Возвратное движение осуществлялось контртелом при постоянной нормальной нагрузке  $F_n=1\text{Н}$  и фиксированном перемещении в 5мкм, что соответствовало режиму частичного проскальзывания (partial slip) и полного скольжения (gross slip), число

циклов перемещения  $n=10^5$ . Исследовались образцы вида №1: 1 образец, сделанный по традиционной технологии, а также 2 образца, сделанных по технологии СЛС (рис. 3.6). На каждом из образцов было проведено по 3 цикла испытаний.

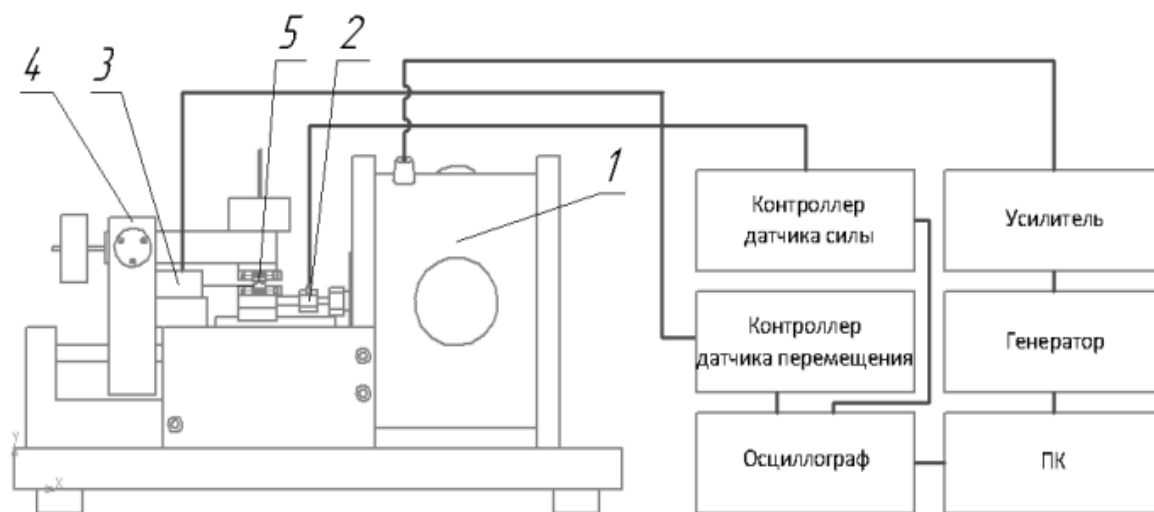


Рис. 3.2. Схема машины трения: 1 – электромагнитный вибратор, 2 – датчик силы, 3 – датчик перемещения, 4 – система нагружения, 5 – место контакта образцов.

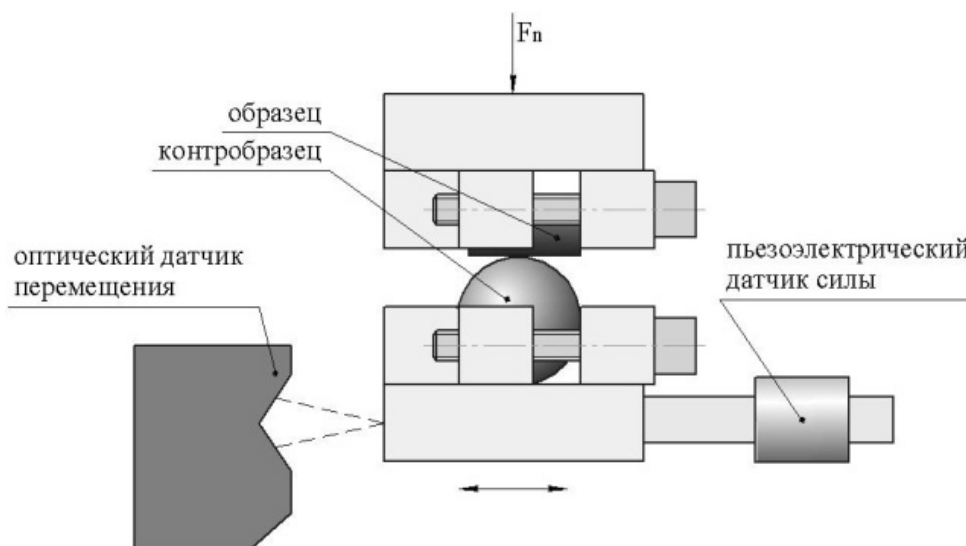


Рис. 3.3. Схема контакта образцов.

После испытаний на образцах исследовались пятна износа. Поскольку процесс фреттинга вызывает унос материала с поверхности, следовательно величина этого уноса (объемный износ) будет характеризовать стойкость поверхности к фреттинг-износу. Объемный износ определялся с помощью конфокального интерференционного микроскопа Olympus LEXT OLS 5000.

### 3.2.5. Усталостные испытания.

Как уже отмечалось ранее, усталостная прочность является одним из ключевых параметров надежности деталей ГТД. Для определения усталостных характеристик были проведены соответствующие испытания для аддитивных образцов.

Эксперименты проводились на испытательном оборудовании специального назначения для проведения усталостных испытаний рабочих лопаток ГТД и других объектов в резонансном режиме возбуждения при симметричном цикле нагружения в условиях рабочих температур по ГОСТ РВ 2840-001-2008 [18]. В состав установки входят: пьезовибратор; зажимное устройство; усилитель мощности; согласующее устройство; система обратной связи в составе: а) механический измеритель амплитуд; б) бесконтактный датчик обратной связи; автономный регулятор уровня сигнала ДОС; нагревательное устройство; блок регулировки температур; персональный компьютер. Общий вид установки представлен на рисунке 3.4.

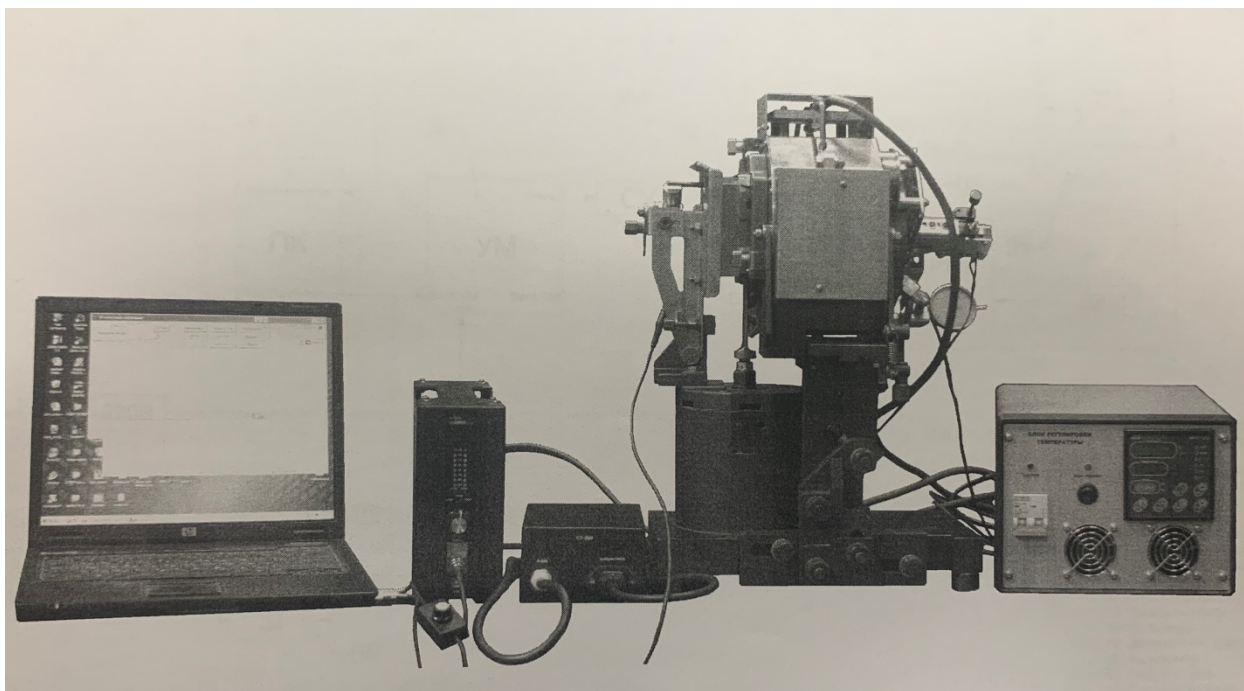


Рис. 3.4. Общий вид установки для усталостных испытаний, ОДК «НИИД»

За предел выносливости принимается то наибольшее значение максимальных напряжений цикла, действующих на поверхности лопатки, при которых не происходит разрушение до заданного числа циклов. За базу испытаний

для лопаток из нержавеющей стали и никелевых сплавов рекомендуется принимать  $N = 2 * 10^7$  циклов.

При ограниченном числе лопаток испытания проводят до разрушения каждой лопатки. Для этого каждую лопатку испытывают до заданной базы испытаний  $N_0$  циклов, начиная с амплитуды напряжения, соответствующего вероятности разрушения  $P = 10 \%$ , т. е. примерно от  $\sigma_a = 0,8\sigma_{-1}$  ( $\sigma_{-1}$  - предел выносливости для вероятности разрушения  $P = 50 \%$ ). Если лопатка не разрушилась, то напряжение повышают на  $\Delta\sigma = 30-50$  МПа и продолжают испытания до базы испытаний  $N_0$  и т. д. Для материалов, чувствительных к эффекту «тренировки», данный метод применять не рекомендуется. Данный метод позволяет получить среднее значение предела выносливости группы лопаток, а при достаточном количестве лопаток, также функцию распределения пределов выносливости.

### **3.2.6. Коррозионные испытания.**

Солевая коррозия может являться причиной снижения усталостной прочности деталей ГТД, и как следствие ограничением ресурса двигателя [6]. Множество работ [5, 13, 38] посвящено вопросу защиты материалов от коррозии, разработке различных защитных покрытий, а также новых сплавов.

Для оценки сопротивления синтезированного аддитивного порошка коррозионному износу были проведены сравнительные испытания на стойкость к питтинговой коррозии. Она оценивалась ускоренным химическим методом, регламентированным ГОСТ 9.912-89 [17]. Данный вид испытаний позволяет оценить стойкость нержавеющей стали к питтинговой коррозии в водных средах, в которых питтинговая коррозия вызывается воздействием на пассивный металл ионов хлора.

Оценку осуществлялась сравнением стационарного потенциала образца ( $E_{ст}$ ), потенциала питтингообразования ( $E_{по}$ ), а также базисы питтингостойкости ( $\Delta E_{ПО}$ ).

Исследуемый металлический образец погружался в испытательный раствор и, измеряя его потенциал с помощью вольтметра в течение 1 ч до достижения стационарного значения ( $E_{ст}$ ), получали хронограмму потенциала. За

стационарное значение потенциала принимали изменяющееся за последние 30 мин не более, чем на 30 мВ.

После достижения стационарного значения потенциала начинали анодную поляризацию образца. Для этого использовали потенциостат IPC-ProMF, трехэлектродную электрохимическую ячейку, вспомогательный электрод из платиновой проволоки и в качестве электрода сравнения – хлорсеребряный электрод. Поляризационные анодные кривые были получены при скорости развертки потенциала 0,2 мВ/с.

Анодную поляризационную кривую строили, откладывая по оси абсцисс полученные значения плотности тока  $i$  (А/см<sup>2</sup>), а по оси ординат - значения потенциала  $E$  (мВ).

### **3.2.7. Эрозионные испытания.**

Экспериментальный стенд по изучению абразивного износа конструкционных материалов и защитных покрытий относится к типу струйных установок, на котором проводятся абразивные испытания согласно ASTM G76-13 [63]. Конструктивные особенности стенда обеспечивают проведение исследований влияния различных параметров взаимодействия абразивных частиц (для выполнения данной работы использовался электрокорунд Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), находящихся в воздушно-абразивном потоке, таких как: угол атаки (от 15° до 90°), скорость соударения (до 30±5 м/с) и концентрация частиц, а также температура рабочей поверхности образца (до 600°C), в широком диапазоне значений. Схема стенда показана на рисунке 3.5.

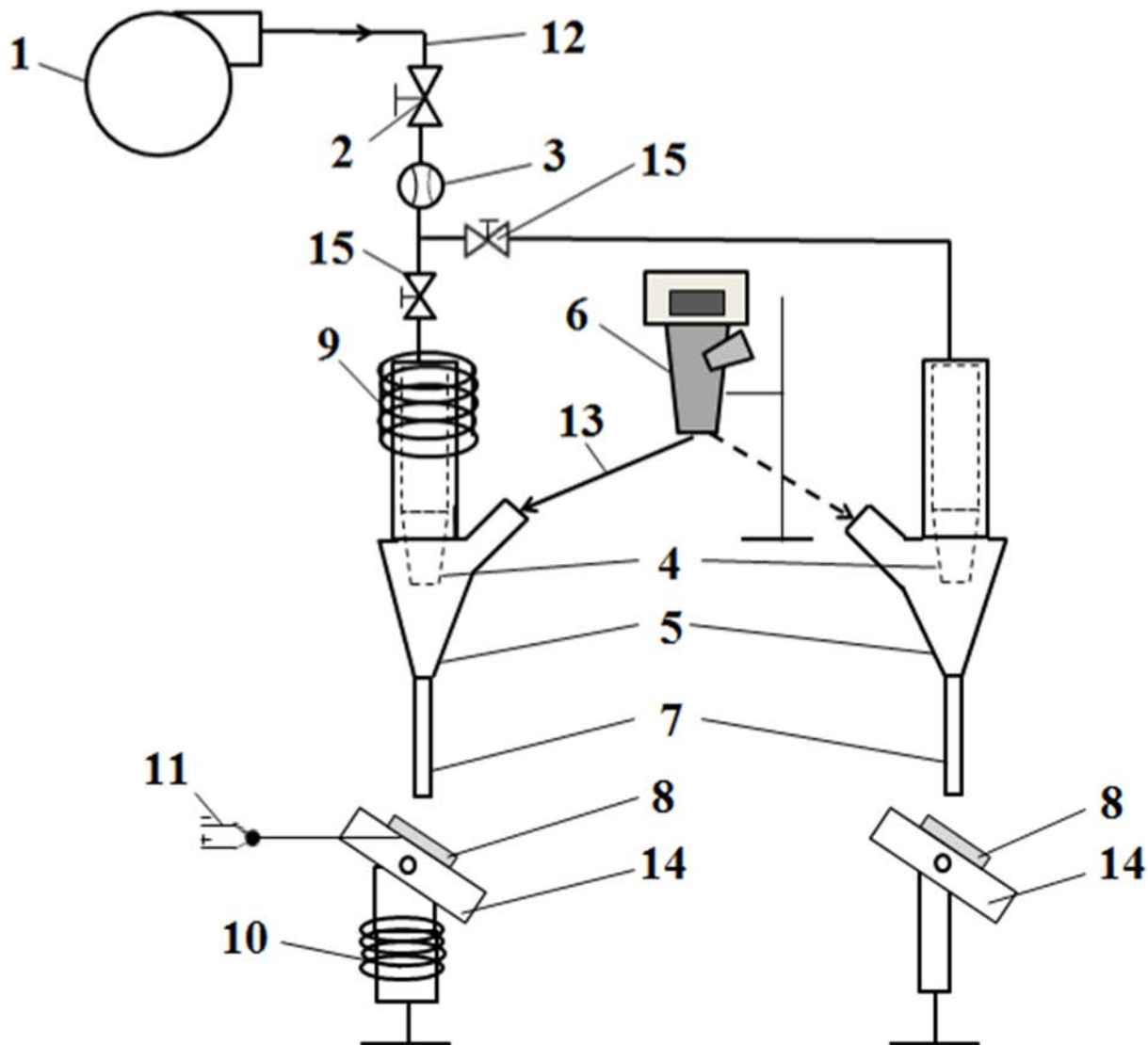


Рис. 3.5. Схема стенда для эрозионных испытаний: 1 - винтовой компрессор; 2 - фильтр; 3 – поплавковый ротаметр; 4 – разгонная трубка; 5 – камера смешения; 6 – дозатор частиц; 7 – стабилизирующая трубка; 8 – образец; 9 – спиральный нагревательный элемент; 10 – керамический нагреватель; 11 – термоэлектрический преобразователь; 12 – магистраль подачи воздуха; 13 – магистраль подачи твердых частиц; 14 – держатель образца; 15 – поворотная задвижка

При проведении абразивных испытаний измерялись и вычислялись следующие параметры: время экспозиции ( $t$ , с); потеря массы образца ( $\Delta m$ , кг) за время экспозиции  $t$  образца на стенде.

Потеря массы образца вычислялась по формуле:

$$\Delta m_i = m_0 - m_i, \quad (1)$$

где  $m_0$  – первоначальная масса образца;  $m_i$  – масса образца после эксперимента;  $i$  – номер эксперимента.

Общее время экспозиции образцов на стенде составило 55 минут. Через 5 минут после начала эксперимента, а затем через каждые 10 минут, образцы взвешивались и сканировались в области, где происходило соударение твердых частиц с поверхностью образца (абразивный след).

Испытания образцов проводились при следующих параметрах:

- скорость соударения газоабразивного потока с поверхностью образца – 170 м/с;
- угол соударения (атаки) твердых частиц с поверхностью образца –  $30^\circ$ ;
- расход твердых частиц –  $5 \cdot 10^{-5}$  кг/с;
- твердые частицы – частицы электрокорунда  $Al_2O_3$  в виде многоугольников неправильной формы со средним размером  $250 \div 300$  мкм, микротвердостью  $1500 \pm 50$  HV<sub>0,1</sub>;
- температура проведения испытаний –  $25^\circ C$ .

В результате проведенных испытаний получали кривые абразивного износа в координатах  $\Delta m = f(t)$ , на основании которых проводили сравнительный анализ процесса абразивного износа образцов.

Схема расположения аддитивных образцов представлена на рис. 3.6. Испытания проводились на не обработанной, а также на обработанной (шлифовка до зерна P600) сторонах образцов.

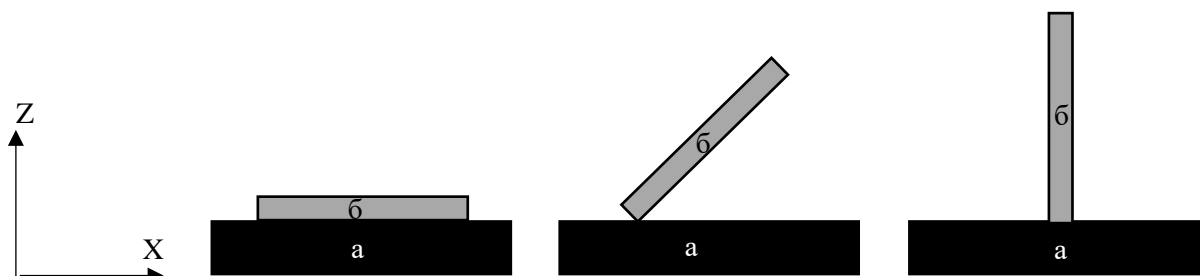


Рис. 3.6. Расположение аддитивных образцов в камере построения: а – образец, б – платформа построения.

### 3.2.8. Испытания на теплопроводность



Испытания на теплопроводность проводились на базе кафедры «Авиационно-космическая теплотехника» МАИ. В исследованиях использовалась установка, представляющая собой стальную основу, гидравлического пресса и рабочим участком внутри (рис. 3.7).

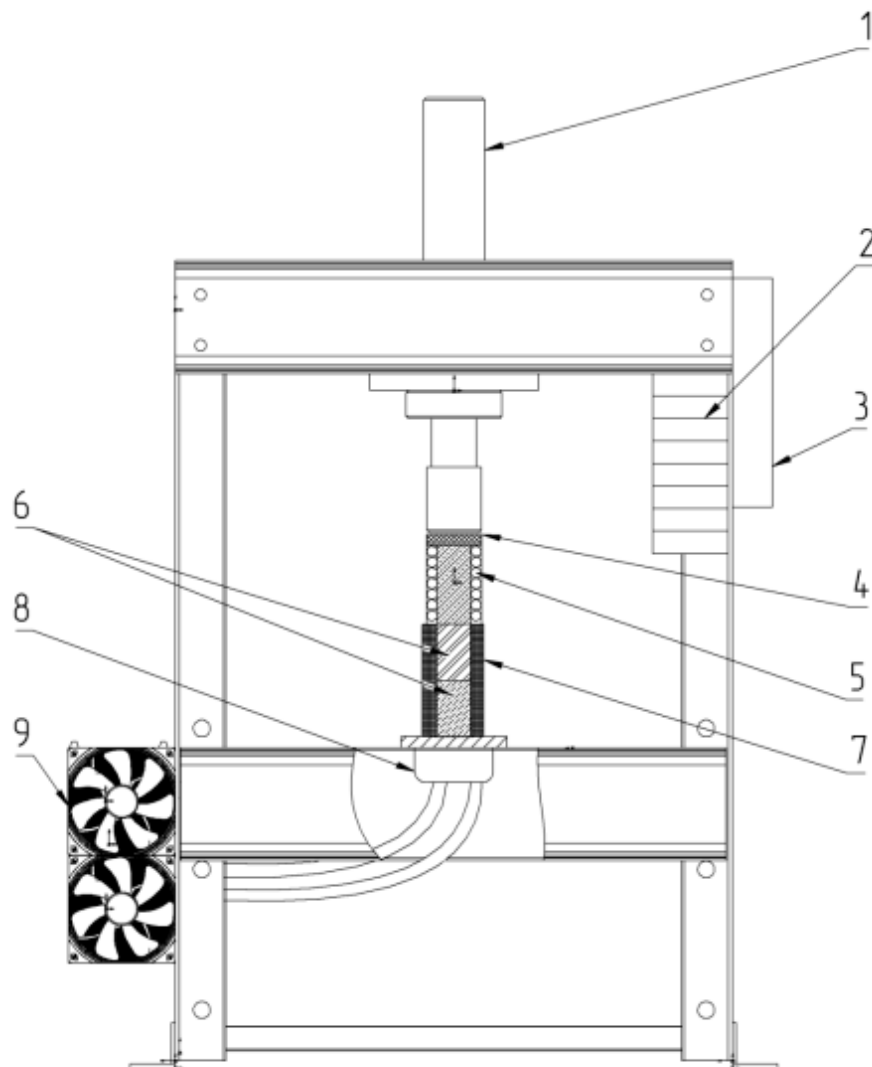


Рис. 3.7. Схема экспериментальной установки для определения теплопроводности: 1 – гидравлический шток, 2 – термопарные модули, 3 – система сбора данных, 4 – текстолитовая прокладка, 5 – электронагреватель, 6 – образец, 7 – компенсационный нагреватель, 8-9 – холодильник.

Методика проведения эксперимента:

- заделка термопар в заранее подготовленные экспериментальные образцы;

- помещение образцов в теплоизоляцию;
- установка образцов на охлаждаемый стол;
- установка нагревателя;
- подсоединение проводов от термопар к преобразователям МАХ6675;
- установка требуемого давления на гидравлическом прессе;
- запуск охлаждения;
- синхронно с включением нагревателя запуск записи выходных данных на компьютер в режиме реального времени;
- когда изменение температуры прекратилось, завершить эксперимент. Завершить запись данных на компьютер, отключить нагреватель;
- когда установка и образцы охладятся до комнатной температуры, отключить охлаждение.

Испытания проводились на образцах вида №4: двух образцах, выращенных под углом  $0^\circ$  и двух образцах, выращенных под углом  $90^\circ$  к платформе построения (рис. 3.8).

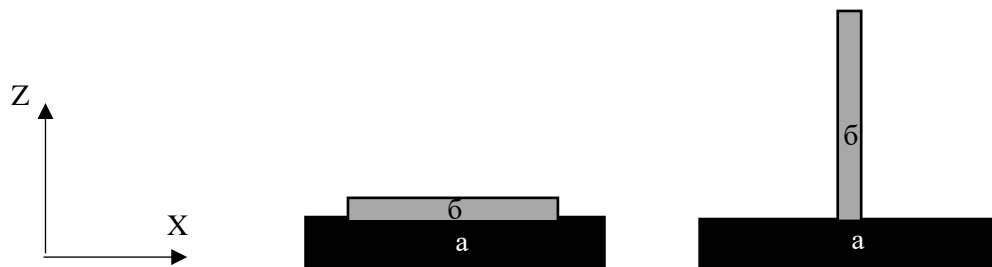


Рис. 3.8. Расположение аддитивных образцов в камере построения: а – образец, б – платформа построения.

## 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПОРОШКА CL 20ES МЕТОДОМ СЛС

### 4.1 Микроструктура и химический состав материала.

Микроструктура исследуемых аддитивных образцов из нержавеющей стали представляет собой типичную структуру синтезированного методом СЛС материала [97], а именно: в плоскости шлифов, изготовленных как в перпендикулярном направлении синтеза (XY) (рис. 4.1), так и параллельно направлению синтеза (XZ) (рис. 4.2) хорошо просматриваются следы трековой структуры, образовавшейся при последовательном линейном сплавлении отдельных участков материала лазером с наложением перекрестного направления предыдущего слоя (рис. 4.2 и 4.3).

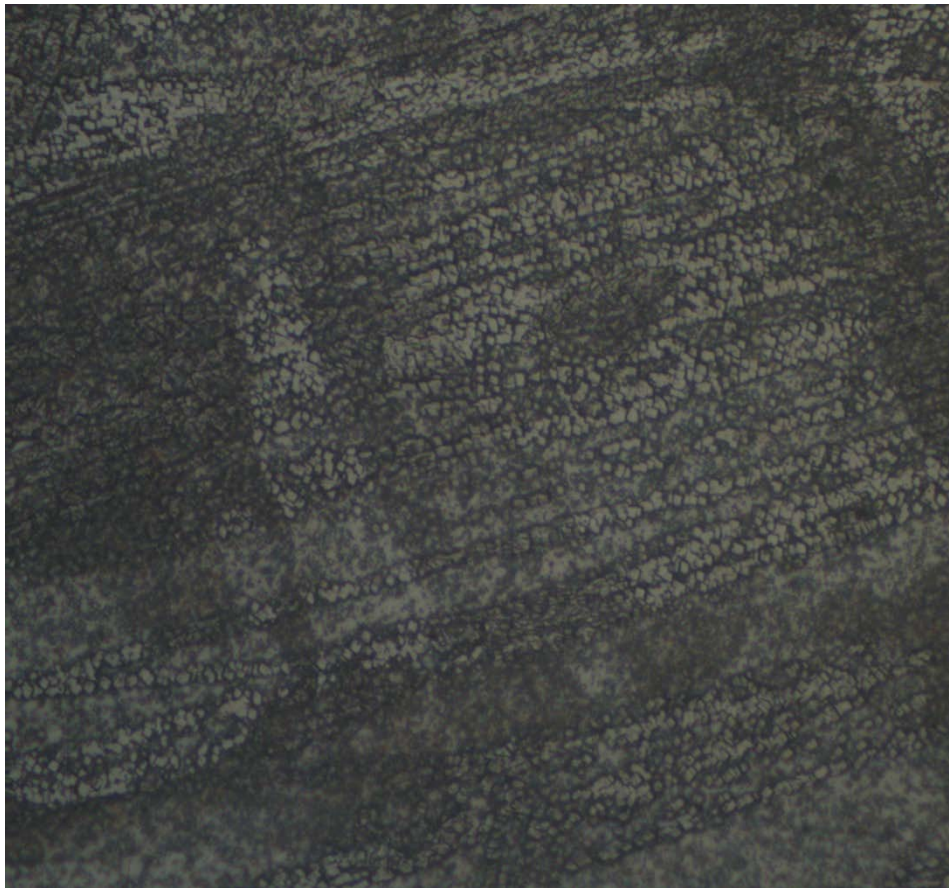


Рисунок 4.1. Продольное сечение, увеличение x500.

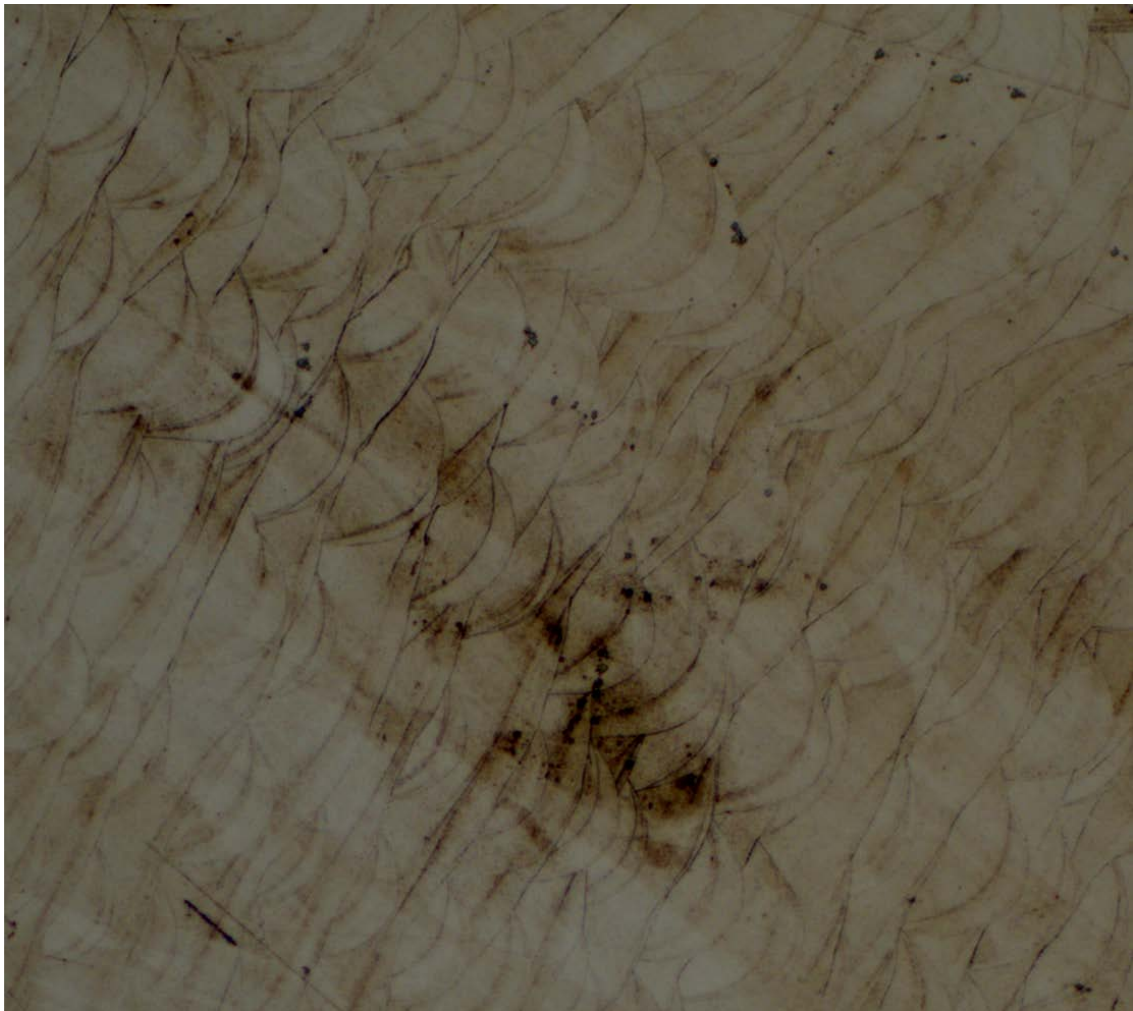


Рисунок 4.2. Поперечное сечение без травления, увеличение x100.



Рисунок 4.3. Поперечное сечение после травления, увеличение x200.

В плоскости шлифа, параллельной направлению синтеза (XZ), видны характерные для процесса СЛС ванны расплава, возникающие при плавлении и



последующей быстрой кристаллизации локальных участков материала в плоскости слоя и вглубь объема с перекрытием предыдущих слоев (рис. 4.4), т.е. отчетливо наблюдается структурная иерархия, образовавшаяся в процессе перекристаллизации порошкового материала. При этом в микроструктуре образцов имеются ванны расплава, внутри которых наблюдаются ячейки меньшего диаметра, но имеющие одинаковую ориентировку с более крупными. Закристаллизованная ванна расплава имеет столбчатую мелкодисперсную структуру, которая ориентирована в направлении теплоотвода. Поэтому в структуре материала преимущественно состоит из вытянутых зерен.

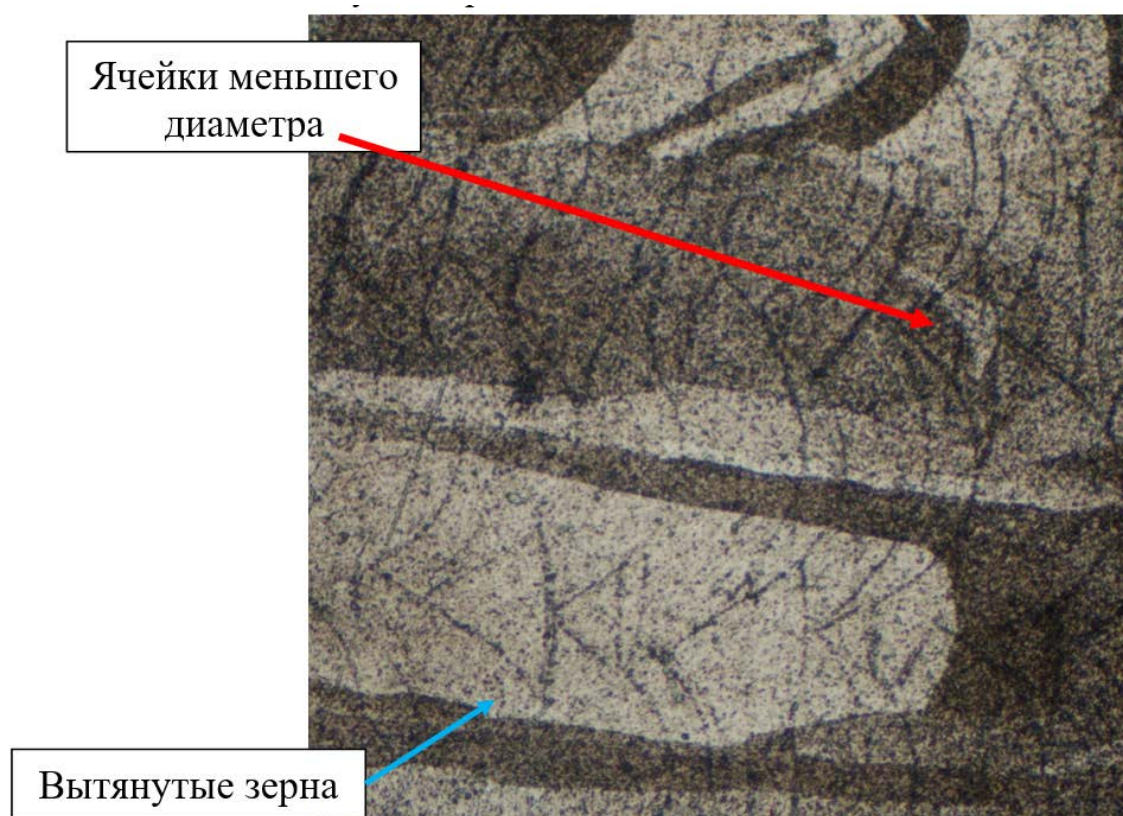


Рисунок 4.4. Поперечное сечение после травления, увеличение x200.

Микроструктура исследованных образцов представляет собой мелкоигльчатый мартенсит с остаточным аустенитом, что характерно для структуры после закалки для материалов, полученных традиционным способом изготовления [30] (рис. 4.5, 4.6).



Рисунок 4.5. Микроструктура образца, увеличение x200.

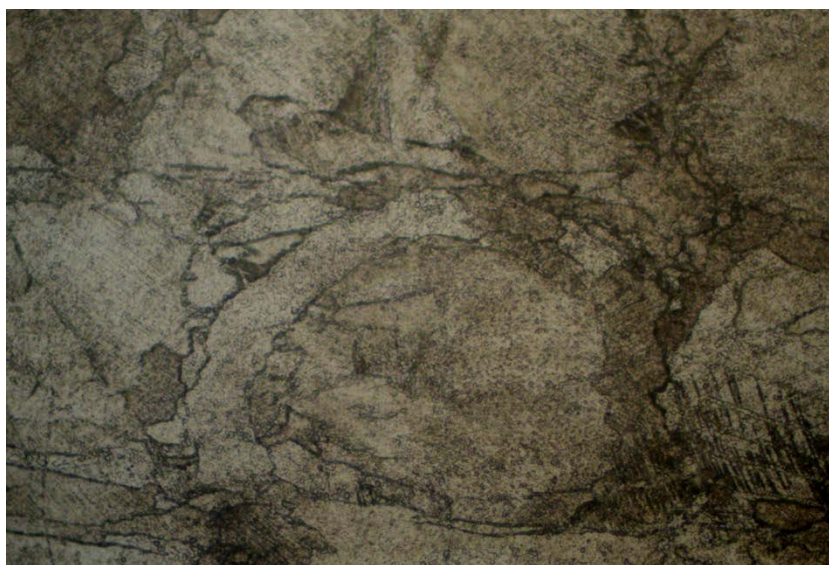


Рисунок 4.6. Микроструктура образца, увеличение x500.

В поверхностном слое исследуемых образцов наблюдаются участки измененного слоя, глубиной от 1,9 до 4,1 мкм (рис. 4.7-4.10). Природу данных участков установить не представляется возможным в виду недостаточности увеличения микроскопа. Также от поверхности образцов идут трещины. Судя по их характеру, часть из них образовалась при охлаждении (наличие окалины внутри трещины), а другие могли образоваться после некоторого времени после изготовления образцов (нет изменений по краям трещины, а также внутри них) (рис. 4.11). Последнее, возможно, связано с релаксацией термических напряжений, которые аккумулируются в следствие высокой скорости кристаллизации в процессе СЛС. Кроме того, в подповерхностном слое хорошо просматриваются поры разных размеров и формы.



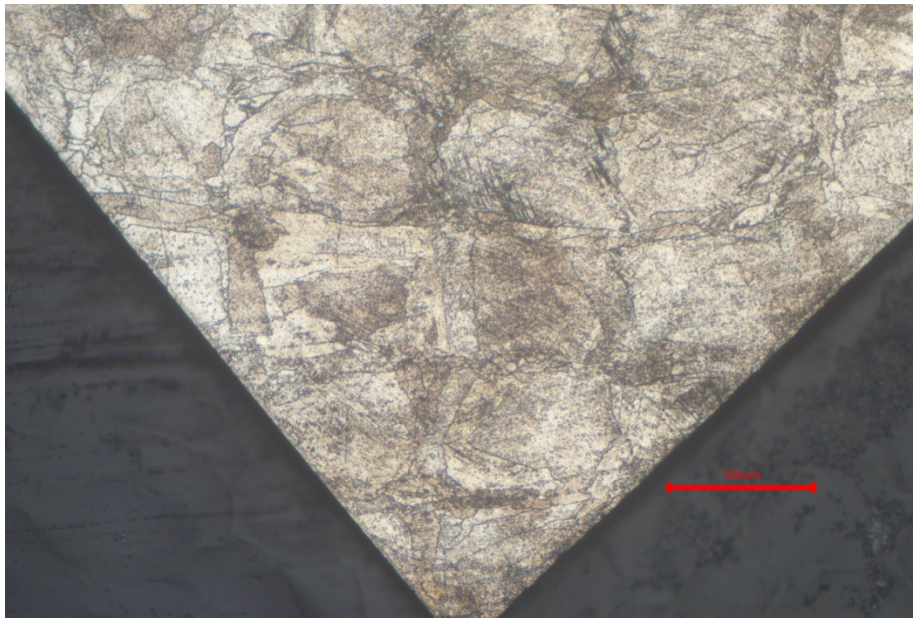


Рисунок 4.7. Поверхностный слой образца, увеличение x100.

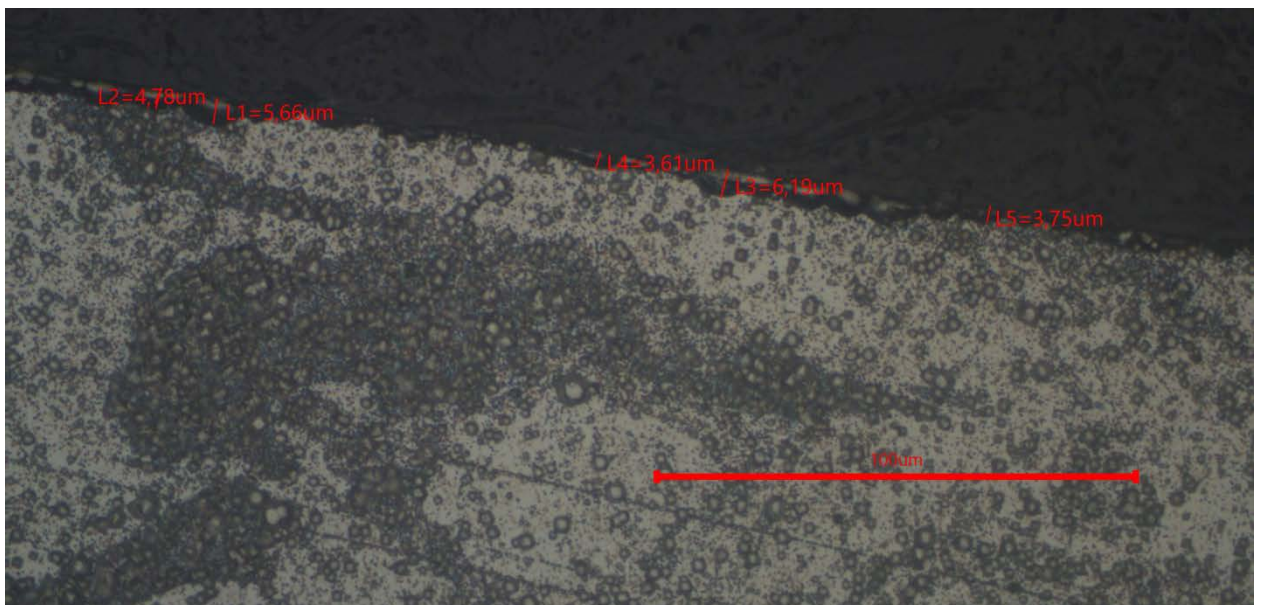


Рисунок 4.8. Поверхностный слой образца, увеличение x500.

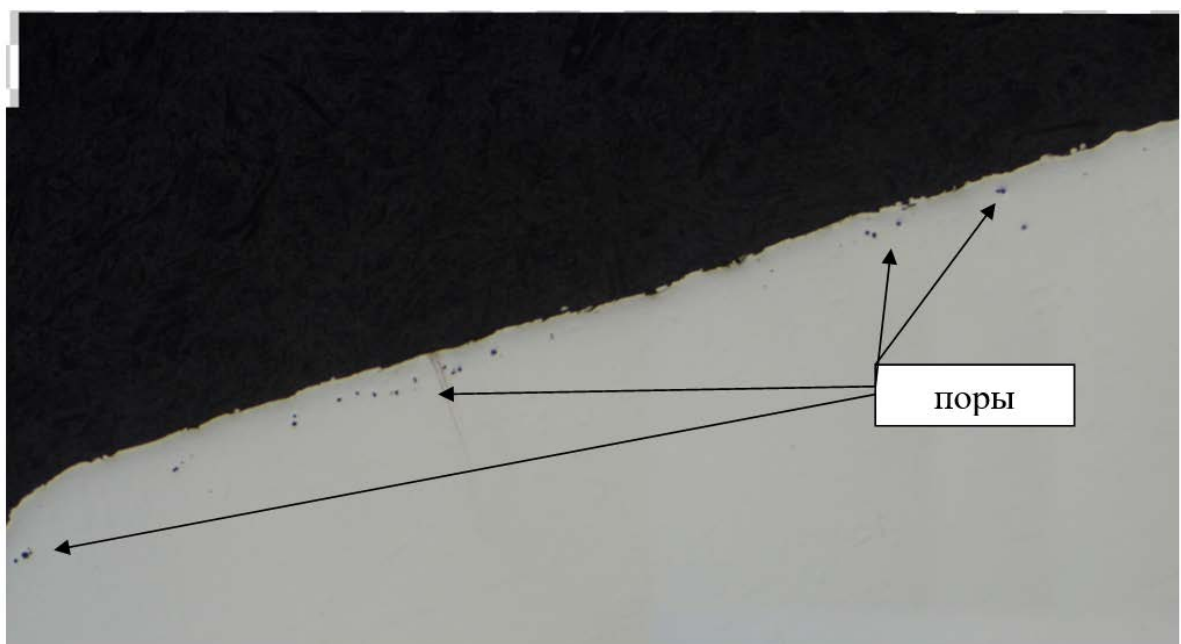




Рисунок 4.9. Образец 2 (поперечное сечение ) x50

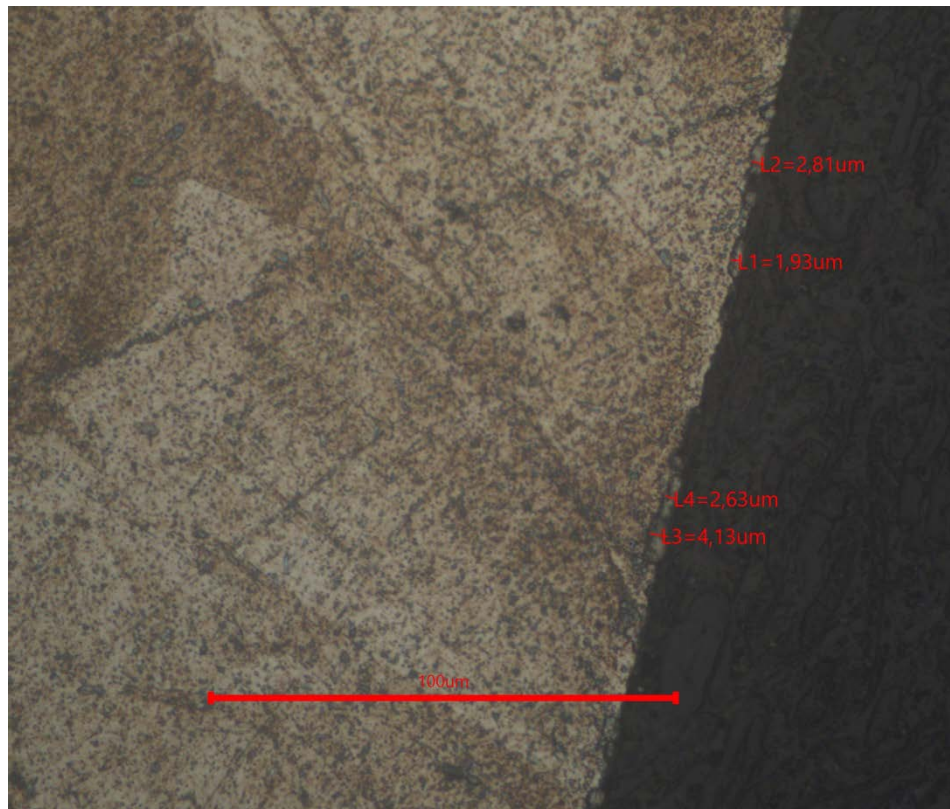


Рисунок 4.10. Образец 2 (продольное сечение) (x500)

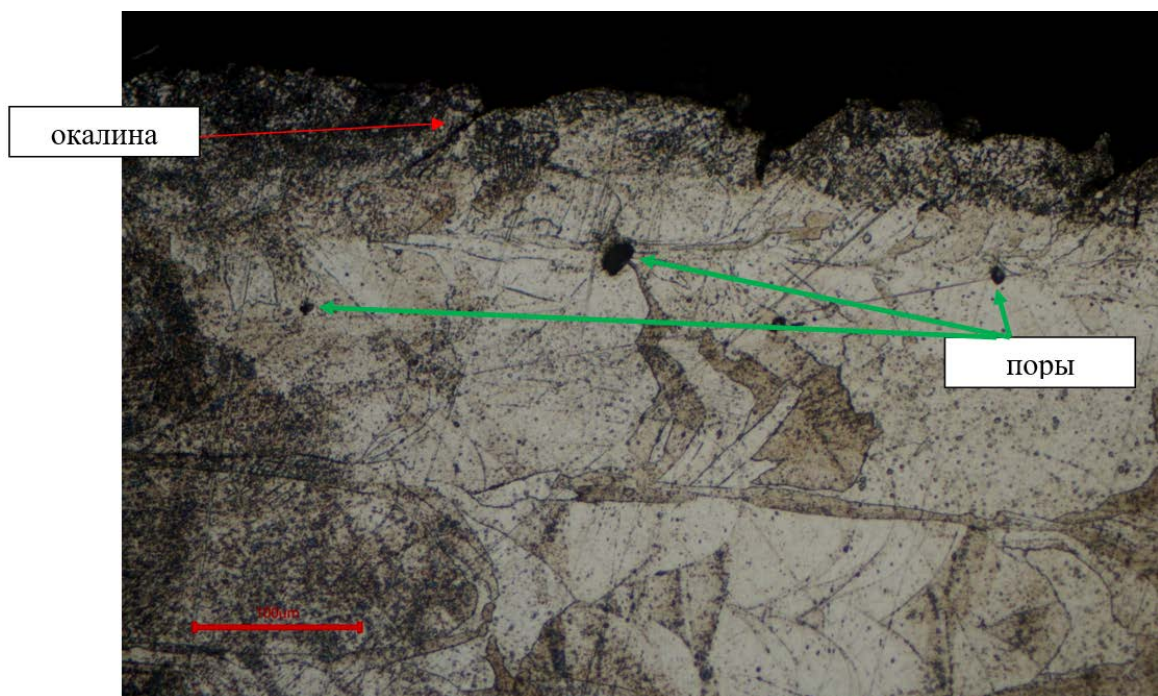


Рисунок 4.11. Образец 2 x200

Проведенный качественный РСМА показал, что химический состав материала близок к сталям 03X17H14M3 и AISI 316L.



Таблица 4.1. Результаты РСМА.

Название спектра	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	C
Спектр 1	0.65	18.65	0.95	64.88	12.52	2.35	-
Спектр 2	0.58	18.56	0.95	65.16	12.39	2.36	-
гост 5632-72	До 0.4	16-18	1-2	Осн.	13-15	2.5-3.1	До 0.03
Паспорт на порошок CL 20ES	До 0,75	17,5-18	до 2	Осн.	12,5-13	2,25-2,5	До 0,03
Измерение порошка CL 20ES	0,5	18	0,7		12,9	2,25	0,015
Паспорт на спеченый материал CL 20ES	0-1,0	16,5-18,5	0-2,0	Осн.	10,0-13,0	2,0-2,5	0-0,03
Паспорт на пруток AISI 316L	0,37	16,72	1,57	Осн.	10,07	2,05	0,022

#### Выводы:

- В структуре исследованного материала вследствие направленного теплового потока от ванны расплава возникает ориентированная столбчатая ячеистая структура, состоящая преимущественно из вытянутых зерен, кристаллизующихся с высокой скоростью.
- Структура материала образцов соответствует структуре закаленной стали (мартенсит + остаточный аустенит).
- Из-за наличия термических напряжений и направленной структуры в материале возникает анизотропия свойств, что имеет большое значение для прочностных характеристик.

#### 4.2 Физико-механические исследования материала.

Результаты проведенных испытаний на разрыв показали следующие результаты: предел прочности по образцу Y составил 62,7 кг/мм<sup>2</sup>, по образцу X 65,1 кг/мм<sup>2</sup>. Среднее значение для прутка из проката стали 316L составляет 58 кг/мм<sup>2</sup>, среднее значение согласно паспорту на материал CL 20ES равно 54 кг/мм<sup>2</sup>. Таким образом, механические свойства аддитивных образцов не уступают традиционным (рис. 4.12).

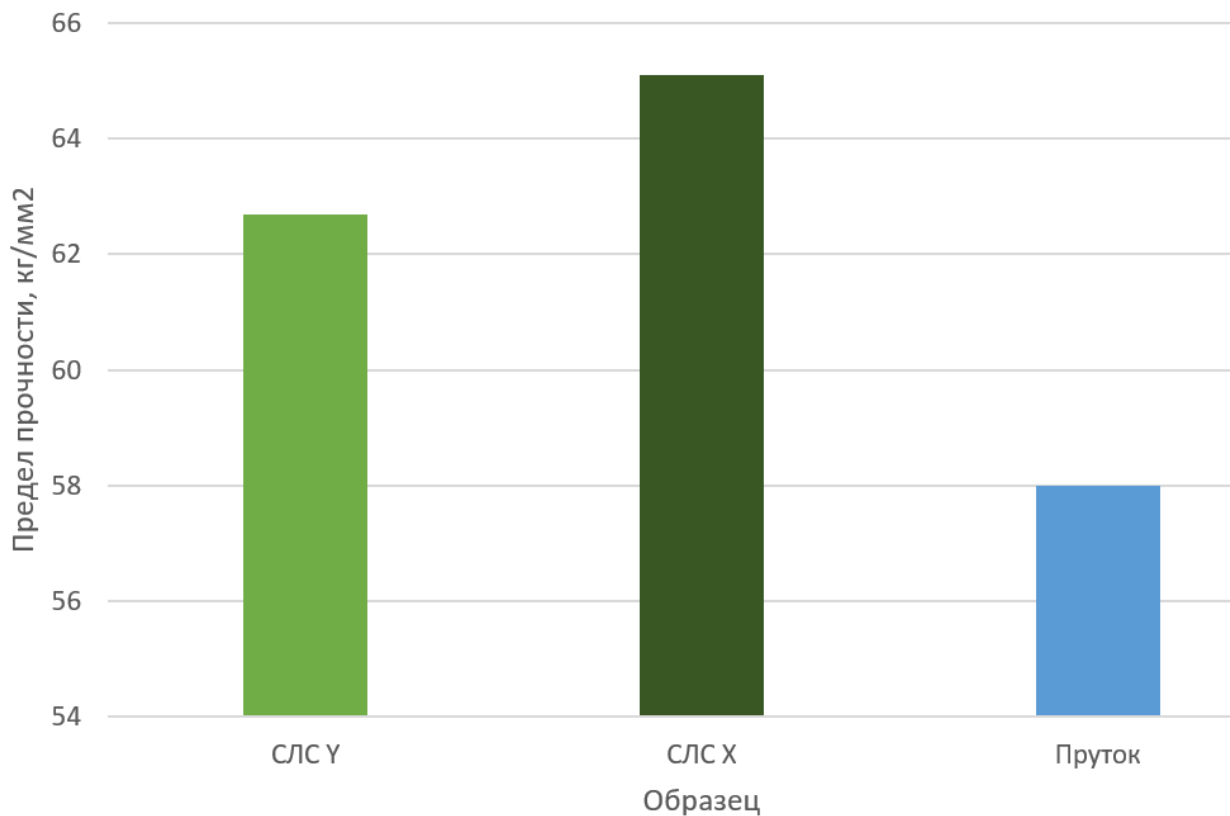


Рис. 4.12. Предел прочности образцов из сплава CL 20ES в сравнении с прутком стали AISI 316L.

Данные о результатах о механических испытаниях представлены в Приложении 1.

### **4.3 Исследование шероховатости.**

Проведенные исследования показали, что шероховатость  $R_a$  на поверхностях образцов выглядит следующим образом:

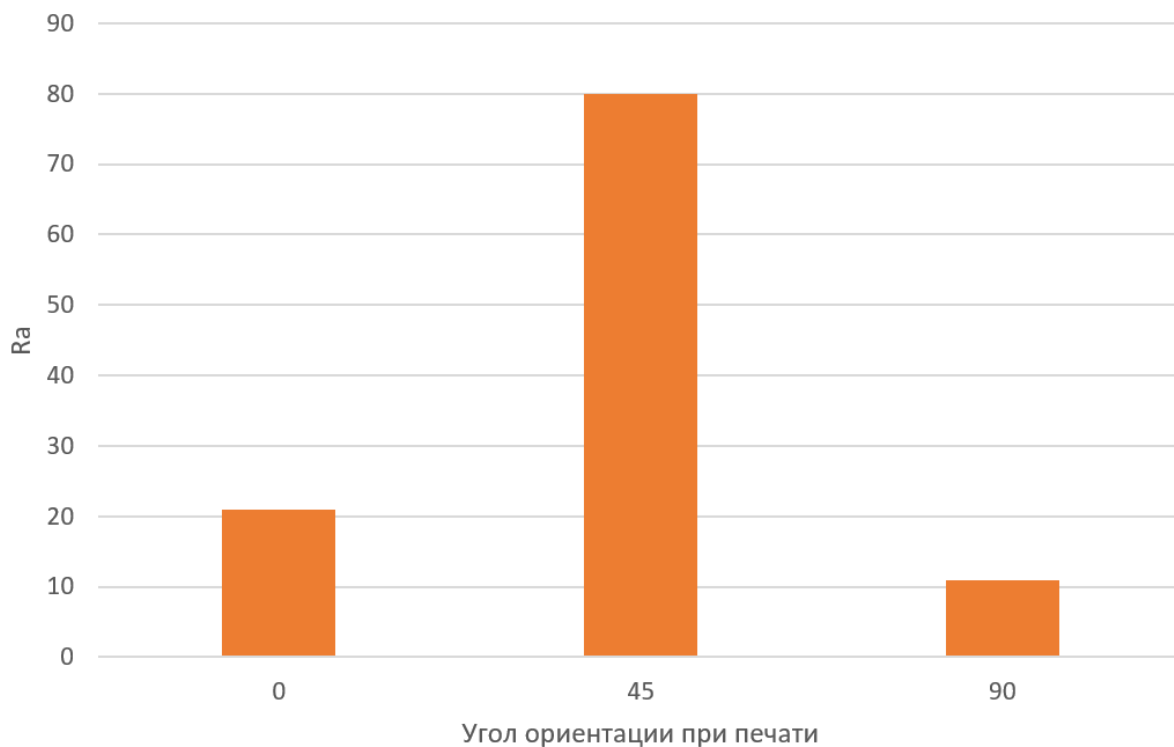


Рис. 4.13. Зависимость шероховатости поверхности образца после СЛС от угла ориентации при печати.

Изменение угла ориентации при печати непосредственно влияет на стратегию разделения изделия на слои, а также на саму стратегию сканирования. Так, при угле 45 градусов к платформе построения получается выраженная ступенчатая поверхность с наивысшей шероховатостью. Интересно заметить, что при угле 0 градусов шероховатость выше, чем при 90 градусов. Это связано с особенностью стратегии сканирования единичного слоя, которая хорошо просматривается на исследуемом образце (рис. 4.14). Фактически, на этой поверхности видны треки от лазера. Возможно, при большем перекрытии треков видимая штриховка уйдет и поверхность будет более гладкой.

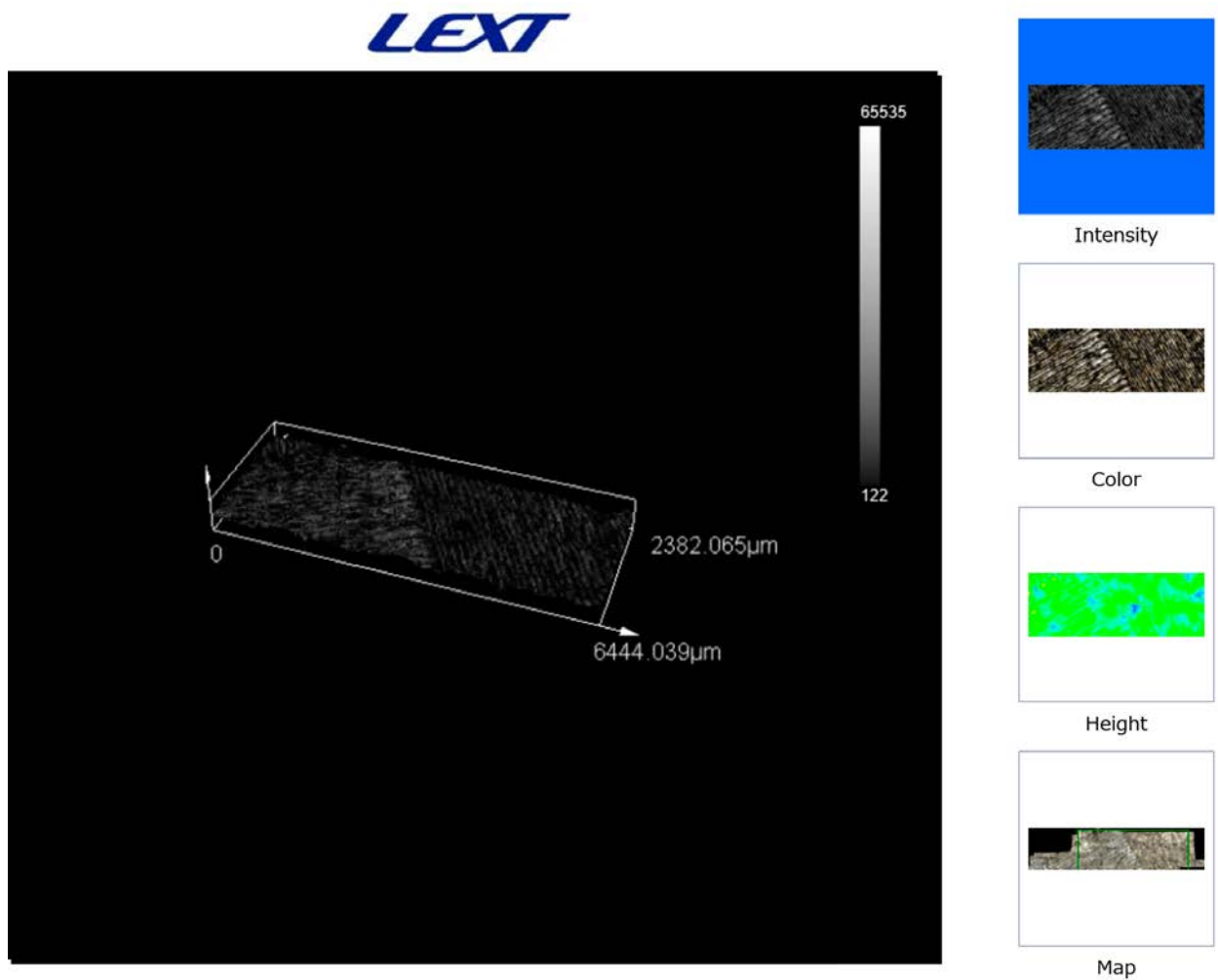
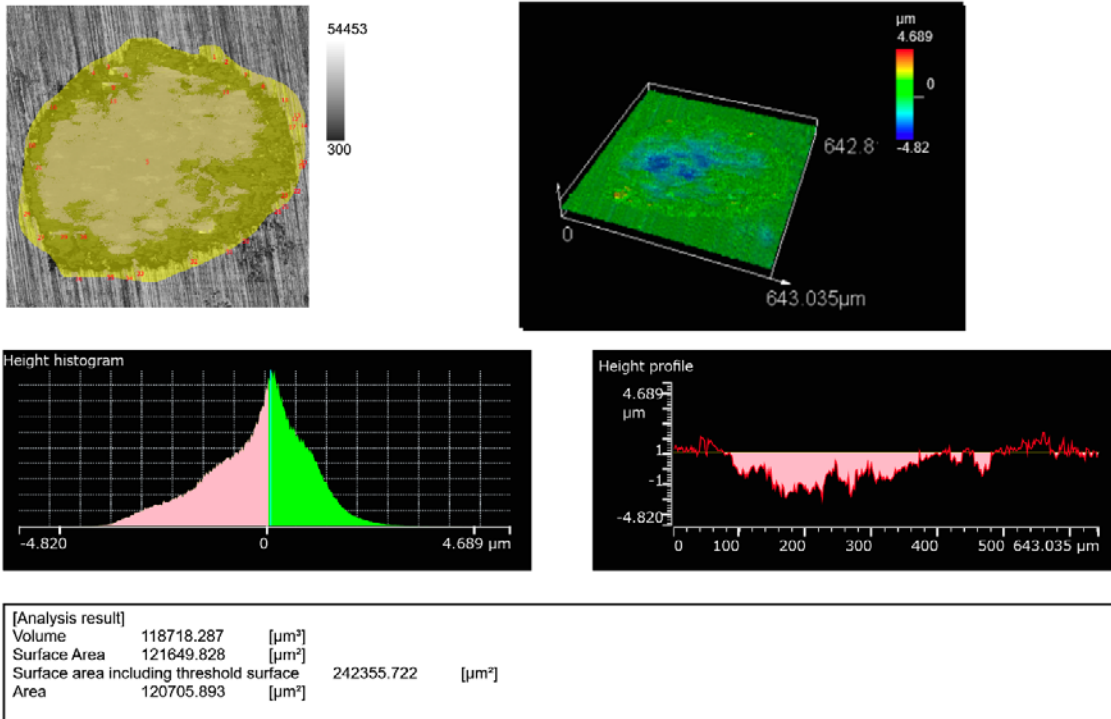


Рис. 4.14. Видимая стратегия сканирования поверхности образца СЛС 0.

#### 4.4 Трибологические исследования материала.

По результатам испытаний образцов было получено 12 снимков пятен износа, а также соответствующие им величины объемного износа [41, 50, 51]. Пример получаемого отчета показан на рис. 4.15, подробный отчет для всех образцов в Приложении 2.



1/3

9/9/2020

Рис. 4.15. Отчет о трибологических испытаниях образца СЛС 0°.

Данные по измеренному объемному износу для всех образцов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Износ трением аддитивных и традиционных образцов.

№ испытания	Образец	Режим трения (нагрузка (Н)/перемещение (мкм))	Величина объемного износа, мкм <sup>3</sup>
1	СЛС 0°	1/60	118718,287
2	СЛС 0°	1/60	187686,451
3	СЛС 0°	1/60	180093,169
4	СЛС 0°	4/5	27696,870
5	СЛС 0°	4/5	13938,083
6	СЛС 0°	4/5	13001,266
7	СЛС 90°	1/60	224211,310
8	СЛС 90°	1/60	148828,607

9	СЛС 90°	1/60	224634,702
10	СЛС 90°	4/5	32494,923
11	СЛС 90°	4/5	12142,710
12	СЛС 90°	4/5	17368,766
13	образец сравнения	1/60	154386,627
14	образец сравнения	1/60	177849,249
15	образец сравнения	1/60	219628,262
16	образец сравнения	4/5	27180,777
17	образец сравнения	4/5	17302,560
18	образец сравнения	4/5	22237,678

Для наглядности данные были представлены в виде графиков на рис. 4.16.

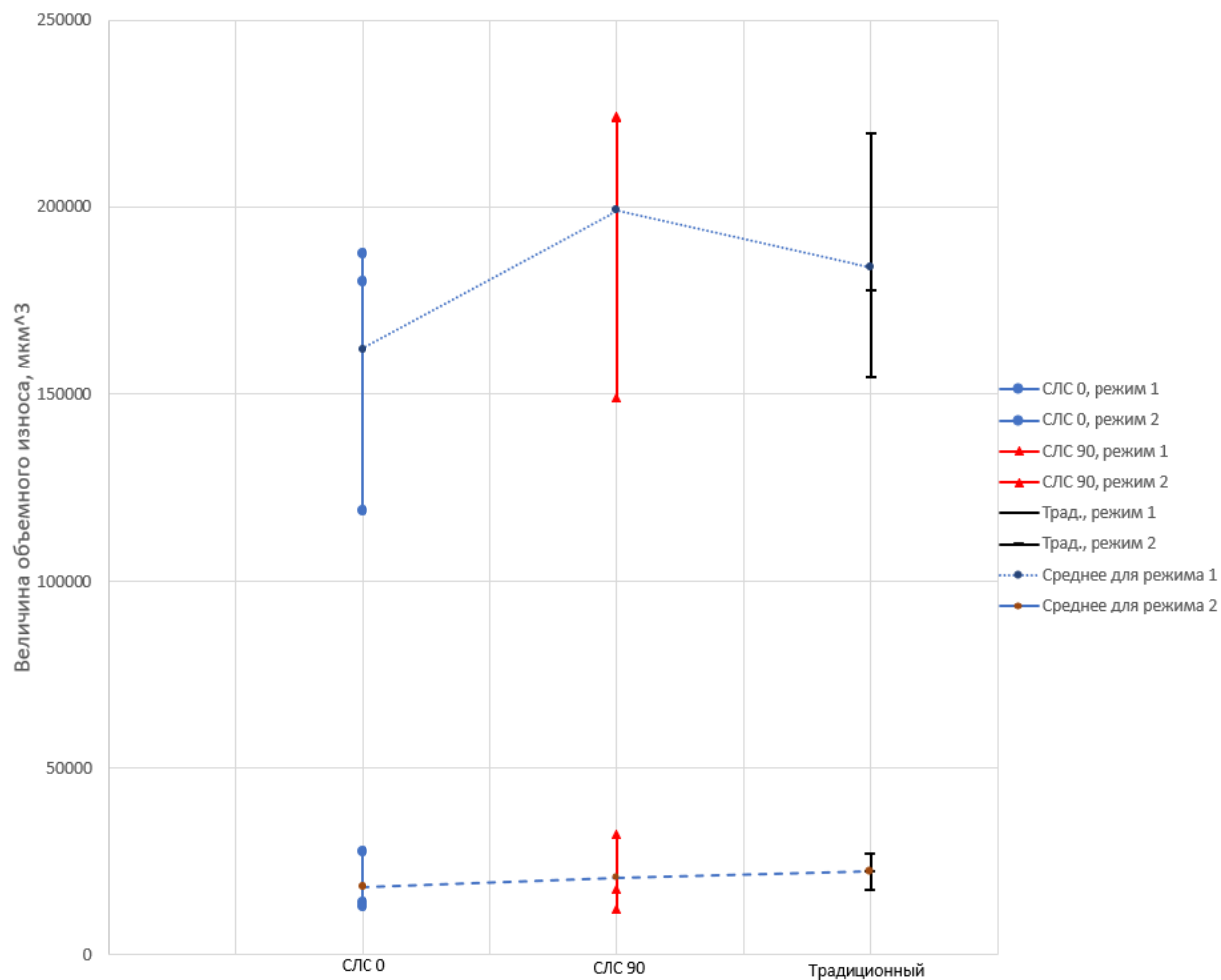


Рис. 4.16. Износ трением аддитивных и образцов сравнения.

Из графиков видно, что для второго режима трения объемный износ практически одинаковый для всех трех образцов, а среднее значение укладывается в доверительный интервал. На первом режиме образец СЛС 0 показывает меньший объемный износ, нижнее значение на 21% отличается в меньшую сторону от аналогичных для других образцов, однако среднее значение для этого режима также укладывается в доверительный интервал. Тем не менее, для уточнения был проведен дополнительный эксперимент на режиме 1 для образца СЛС 0, в результате которого объемный износ составил  $208415,460 \text{ мкм}^3$ .

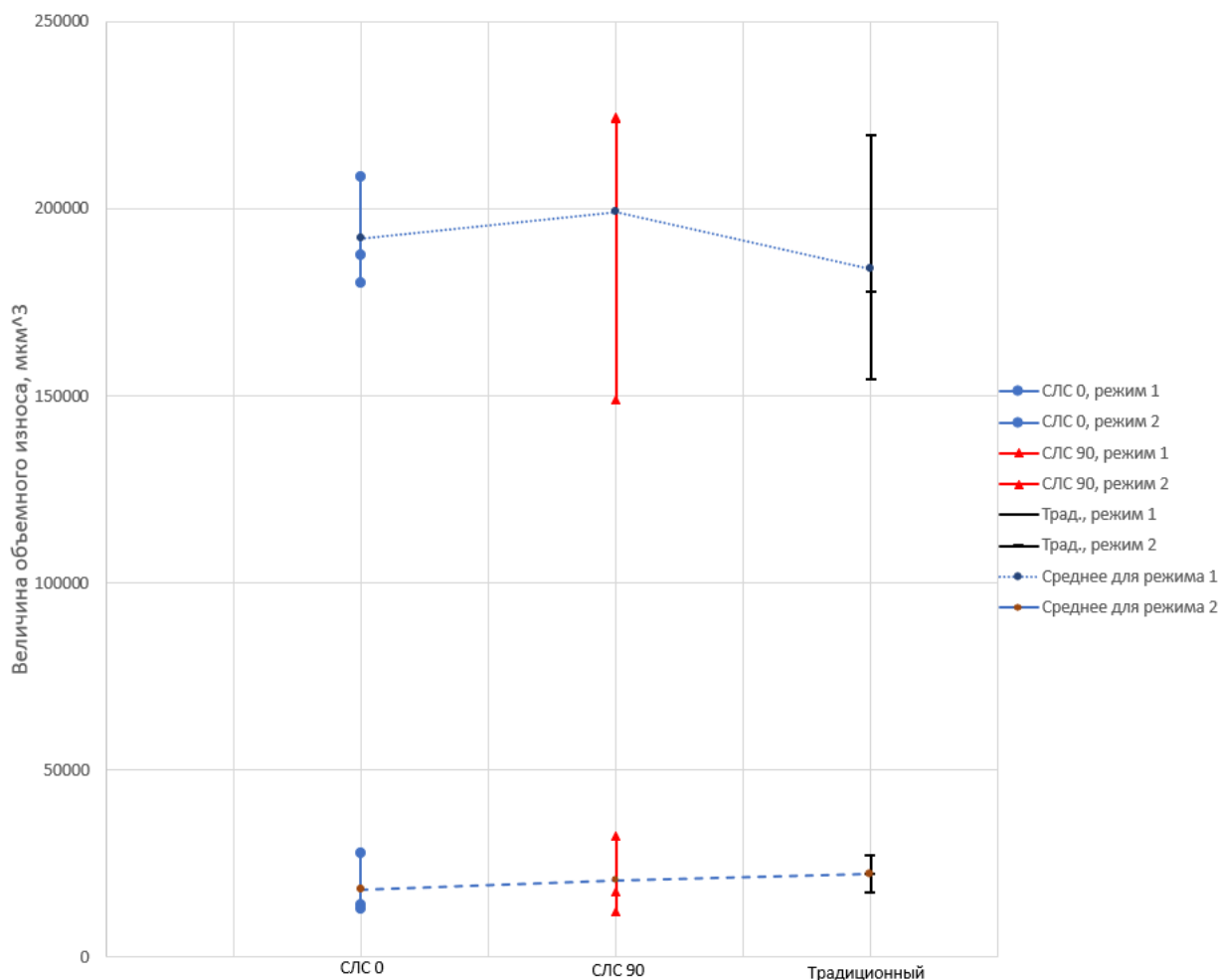


Рис. 4.17. Износ трением аддитивных и образцов сравнения с уточненными данными.

Из полученных данных справедливым будет сделать вывод о том, что трибологические свойства изделий, полученных методом СЛС, вне зависимости от угла установки в камере построения, отличаются от изделий, полученных по традиционной технологии в пределах 7%, что можно приравнять к погрешности измерений. В целом угол установки детали в камере построения не будет влиять на будущий износ трением.

#### 4.5. Усталостные исследования материала.

Всего было изготовлено 10 аддитивных образцов вида №4, которые прошли механическую обработку, в том числе полировку.

Согласно описанной выше методике, следующий образец дополнительно полировался после каждого разрушения предыдущего образца, тем самым минимизировался фактор наличия поверхностного дефекта, который мог бы



привести к образованию трещины. В таблице 4.3 представлены данные по испытанию аддитивных образцов.

Таблица 4.3. Усталостные испытания аддитивных образцов.

№п.п.	$\sigma$ [кгс/мм <sup>2</sup> ]	2A [мм]	f [Гц]	t <sub>нар</sub> ч <sup>М</sup>	N·10 <sup>6</sup> циклов	Результат
1	34	1,21	1241	0 <sup>10</sup>	0,7452	Разруш.
2	30	1,06	1250	0 <sup>17</sup>	0,75	Разруш.
3	34	1,20	1237	4 <sup>27</sup>	20,0	Прошла
	38	1,35	1234	1 <sup>25</sup>	6,375	Разруш.
4	34	1,21	1240	4 <sup>27</sup>	20,0	Прошла
	36	1,28	1239	4 <sup>27</sup>	20,0	Прошла
	38	1,35	1239	3 <sup>51</sup>	17,325	Разруш.
5	36	1,27	1245	4 <sup>28</sup>	20,0	Прошла
	38	1,36	1243	4 <sup>10</sup>	18,75	Разруш.
6	36	1,29	1231	4 <sup>28/</sup>	20,0	Прошла
	38	1,37	1229	4 <sup>28</sup>	20,0	Прошла
	40	1,44	1229	0 <sup>15</sup>	1,125	Разруш.
7	38	1,36	1235	4 <sup>28</sup>	20,0	Прошла
	40	1,42	1235	1 <sup>34</sup>	7,05	Разруш.
8	38	1,35	1240	3 <sup>40</sup>	16,5	Разруш.
9	36	1,26	1239	4 <sup>28</sup>	20,0	Прошла
	38	1,36	1237	4 <sup>28</sup>	20,0	Прошла
	40	1,43	1237	3 <sup>45</sup>	16,875	Разруш.
10	38	1,36	1260	4 <sup>28</sup>	20,0	Прошла
	40	1,44	1258	2 <sup>12</sup>	9,9	Разруш.

Как видно из таблицы, предел выносливости установился в районе 38 кгс/мм<sup>2</sup>, что соответствует 372 Н/мм<sup>2</sup>. При этом, согласно источникам, нормальная усталостная прочность прокатного материала составляет 260 Н/мм<sup>2</sup>. Причина такой разницы требует дополнительного изучения и подтверждения данных на образцах, полученных по традиционной технологии.

#### 4.6. Коррозионная стойкость материала.

В ходе экспериментов были получены зависимости плотности тока от потенциала по времени. Эксперимент проводился до появления сквозного отверстия от питтинговой коррозии. Пример подучаемых зависимостей приведен на рис. 4.18.

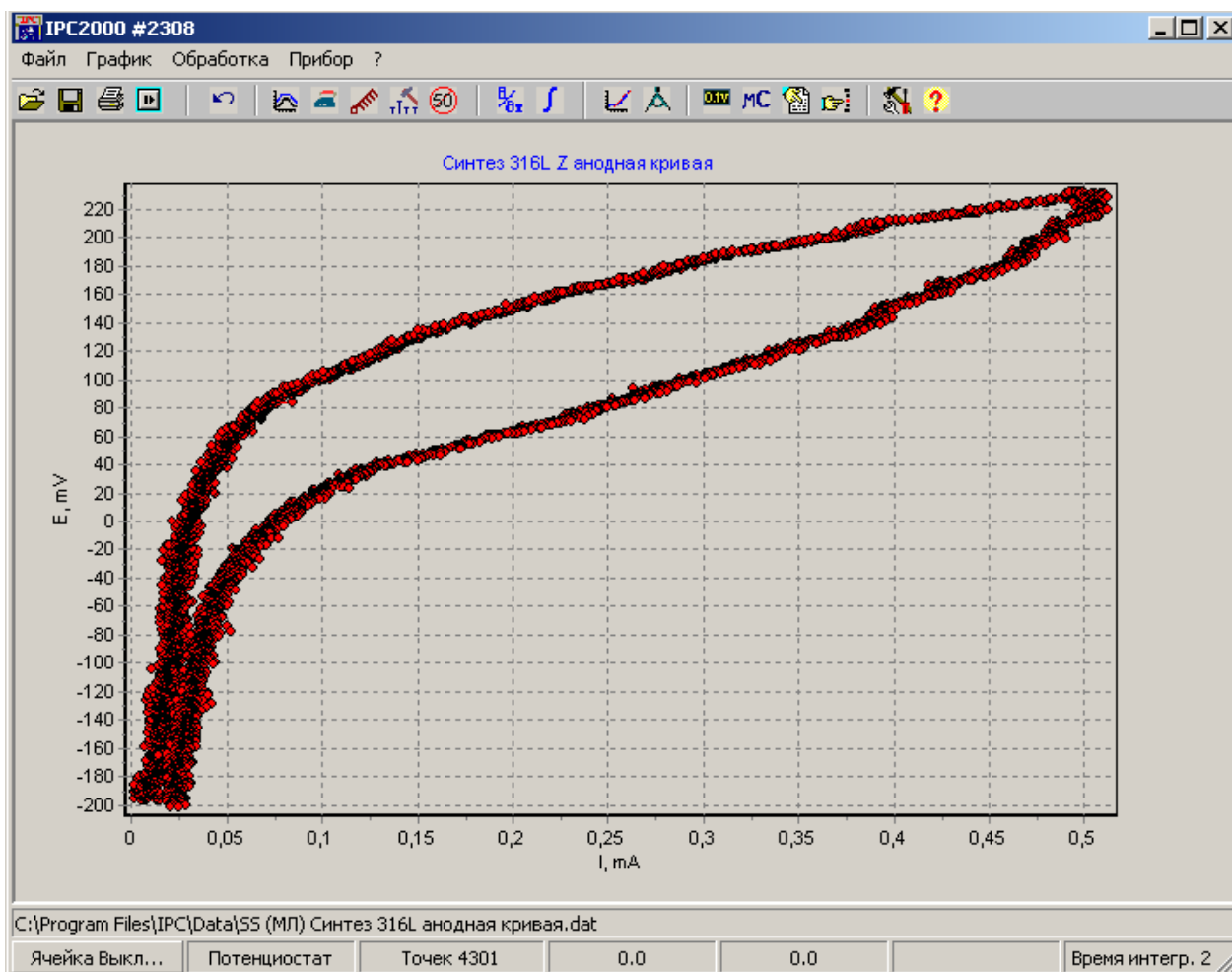


Рис. 4.18. Отчет об исследовании на коррозионную стойкость образца СЛС 90.

Полученные значения стационарного потенциала, потенциала питтингообразования и базиса питтингостойкости приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Значения потенциалов

Образец	$E_{ст}$ , мВ	$E_{по}$ , мВ	$\Delta E_{по}$ , мВ
Образец сравнения 1	-75	360	435
Образец сравнения 2	-50	350	400

Образец сравнения 3	-60	350	410
СЛС 0	-38	200	238
СЛС 45	-100	200	300
СЛС 90	-187	85	272

Основными показателями являются ЕПО и ΔЕПО. Чем выше значения ЕПО и ΔЕПО, тем выше стойкость к питтинговой коррозии. Также более положительное значение стационарного потенциала часто указывает на более высокую коррозионную стойкость материала. Исходя из полученных данных видно, что синтезированные образцы имеют более низкую стойкость к питтинговой коррозии.

#### 4.7 Эрозионные исследования материала.

На рис. 4.19 изображены полученные кривые абразивного износа аддитивных образцов без обработки, а также образца сравнения. Изменение топографии поверхности экспериментальных образцов с течением времени представлено в протоколе испытаний (Приложение 3).

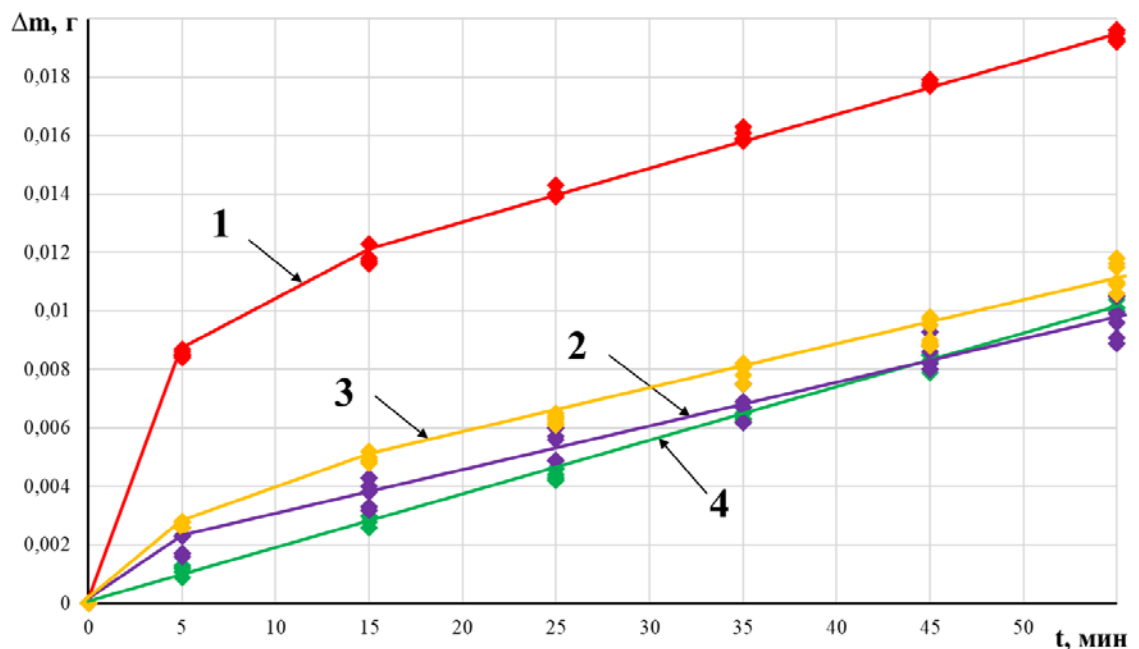


Рис. 4.19. Кривые абразивного износа аддитивных образцов без обработки поверхности и образца сравнения: 1 – СЛС 45, 2 – СЛС 0, 3 – СЛС 90, 4 – образец сравнения.

Как видно из рисунков выше, все аддитивные образцы имеют в начале эксперимента крутой участок кривой, где наблюдается большой износ материала. Поскольку после печати исследуемая поверхность имеет высокую шероховатость по сравнению с образцов сравнения (таблица 4.5), этот эффект связан с тем, что в начале эксперимента идет выглаживание поверхности образца.

Таблица 4.5. Шероховатость не обработанных поверхностей исследуемых образцов.

Образец	Шероховатость Ra
СЛС 0	21
СЛС 45	79,2
СЛС 90	11
Образец сравнения	6,3

В рамках исследования были проведены аналогичные испытания на отшлифованных аддитивных образцах (рис. 4.20).

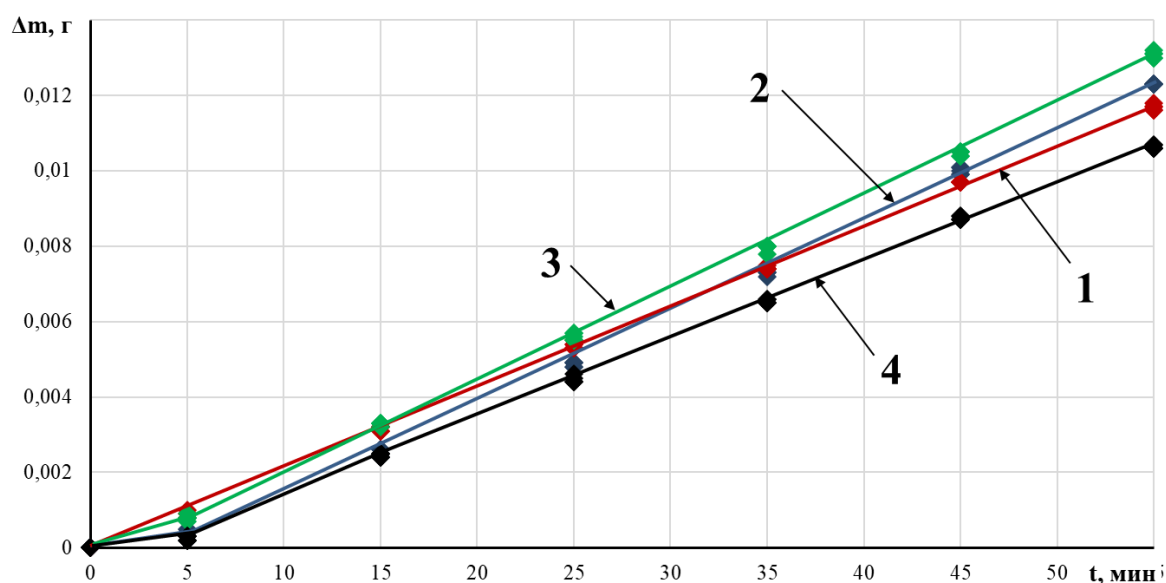


Рис. 4.20. Кривые абразивного износа аддитивных образцов с обработкой поверхности и образца сравнения: 1 – СЛС 45, 2 – СЛС 0, 3 – СЛС 90, 4 – образец сравнения.

Как видно из графиков, шлифовка поверхности обеспечивает более равномерный абразивный износ.

Для наглядного сравнения аддитивных образцов с образцом сравнения были построены гистограммы относительной абразивной стойкости по потере массы за 55 минут испытаний, за эталон принят образец сравнения (рис. 4.21, 4.22).

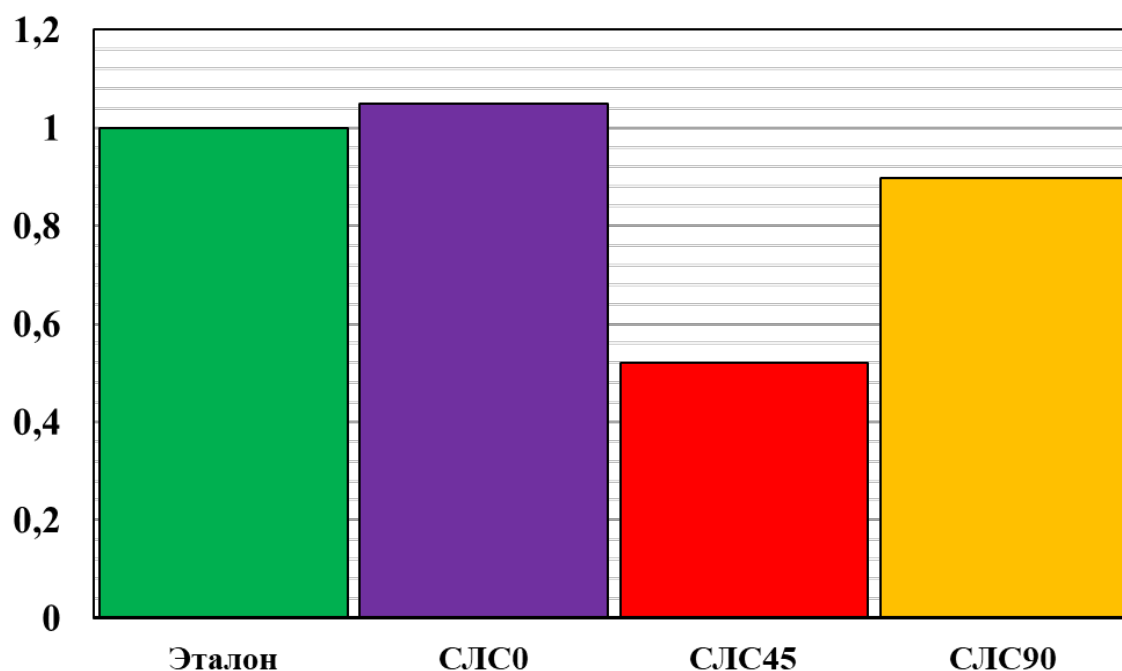


Рисунок 4.21. Гистограммы относительной абразивной стойкости по потере массы за 55 минут испытаний для необработанных аддитивных образцов.

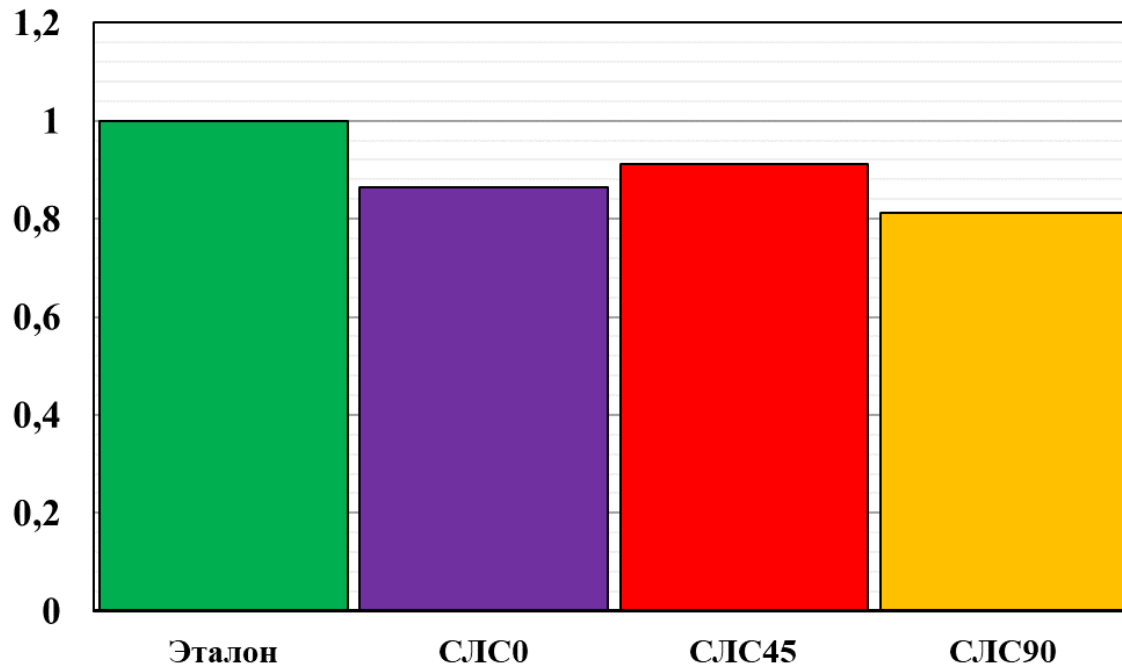


Рисунок 4.22. Гистограммы относительной абразивной стойкости по потере массы за 55 минут испытаний для обработанных аддитивных образцов.

По результатам исследований абразивного износа можно сделать следующие вывод о том, что относительная абразивная стойкость аддитивных образцов ниже образца сравнения в диапазоне от 10 до 15 процентов.

#### 4.5. Исследования теплопроводности материала.

Для проверки предположения наличия анизотропии свойств, в частности теплопроводности, у материалов, напечатанных с по технологии СЛС были проведены натурные эксперименты на четырех образцах вида №4 [27]. Результаты экспериментов и график распределения температуры в рабочем участке представлены на рисунке 4.23 и в таблице 4.6.

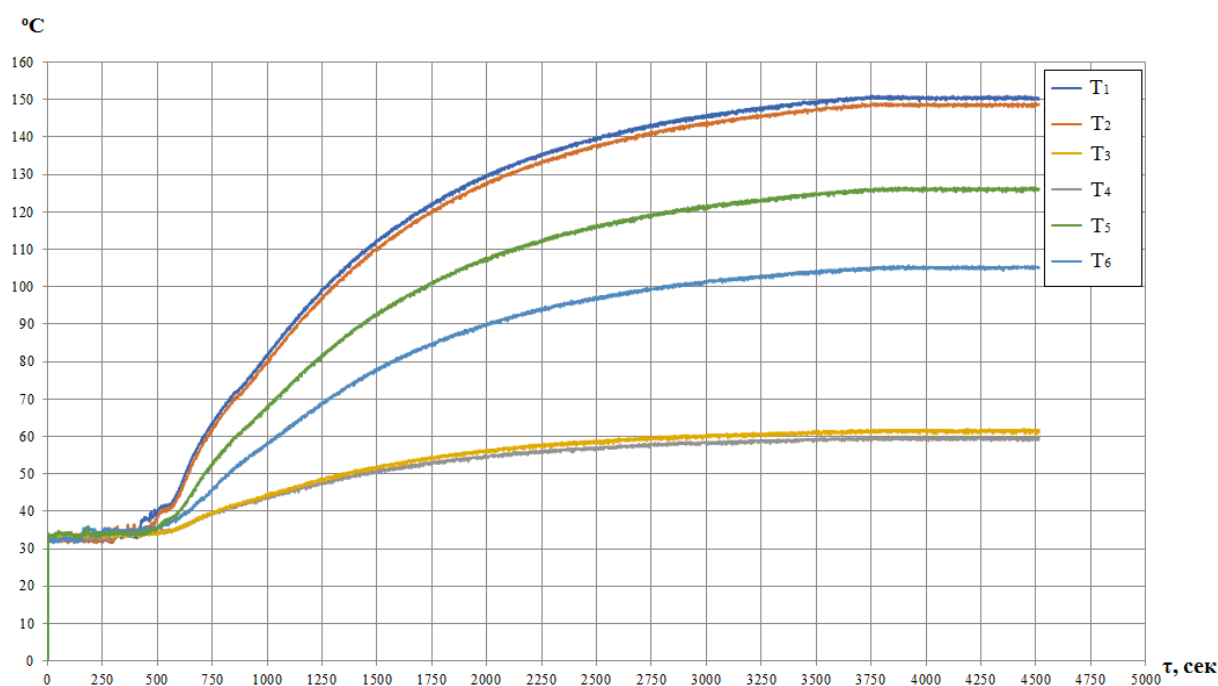


Рис. 4.23. График распределения температур по времени эксперимента для образца №1.

Таблица 4.6. Теплопроводность исследуемых образцов.

№ образца	1	2	3	4
Теплопроводность, Вт/м <sup>2</sup> К	24,51	29,40	18,62	19,24

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод, что в изделиях, созданных с применением аддитивных технологий, присутствует анизотропия свойств теплопроводности. Разница в значениях в диапазоне 25-30% может быть обусловлена характером формирования материала, зависящего от

условий печати. Так, например, при печати образцов 1, 2 направление спекания происходило вдоль оси протекания теплового потока в эксперименте. Так же можно предположить, что в процессе спекания происходит упрочнение материала, что в свою очередь влияло на теплофизические свойства материала. При печати образцов 3, 4 спекание происходило поперек оси протекания теплового потока в эксперименте. Упрочнение материала происходило хаотичным способом, зависящим от образовавшегося микрорельефа на каждом слое печати.

Также стоит отметить, что теплопроводность напечатанных образцов на 16-83% выше, чем у аналогичного материала из прутка (рис. 4.24). Это свойство может быть очень полезно для задач тепломассообмена в деталях ГТД.

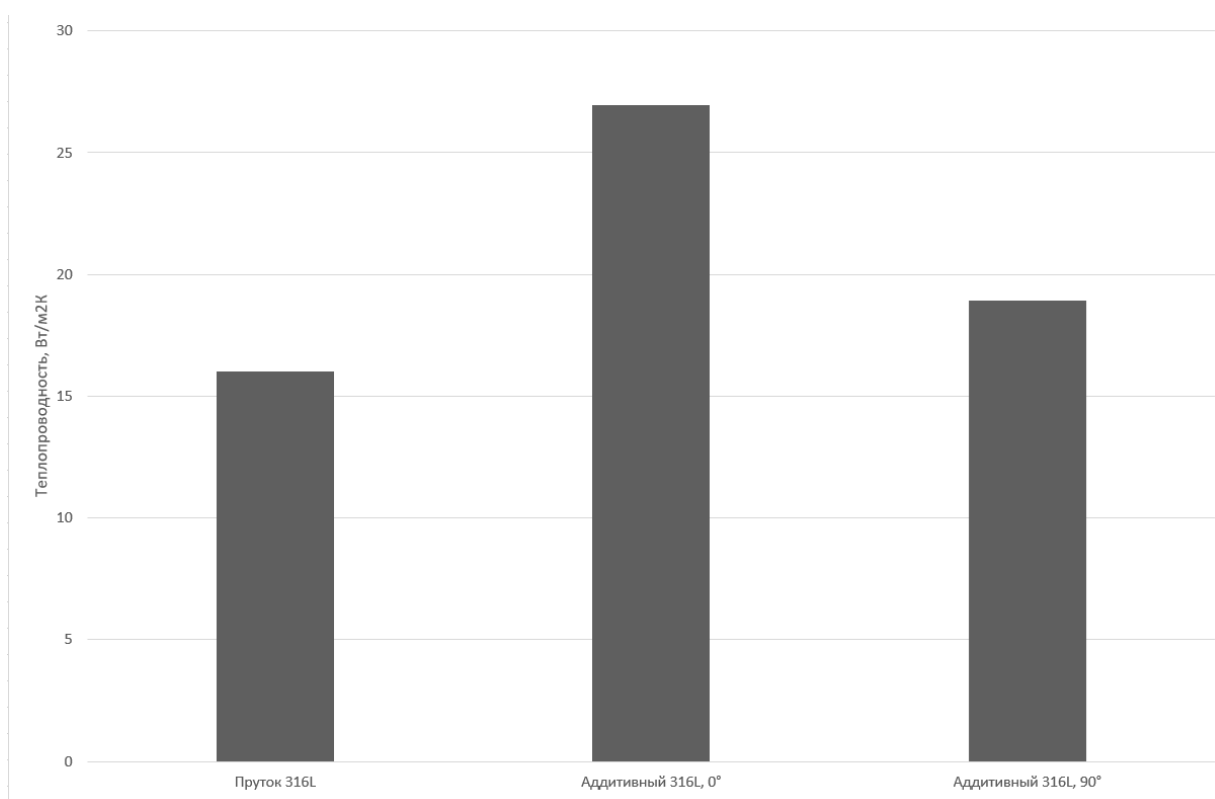


Рис. 4.24. Сравнение теплопроводности образцов из CL 20ES и 316L

## 5 МЕТОДИКА КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОБОГРЕВАЕМЫХ ЛОПАТОК ВНА С ПОС, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ СЛС

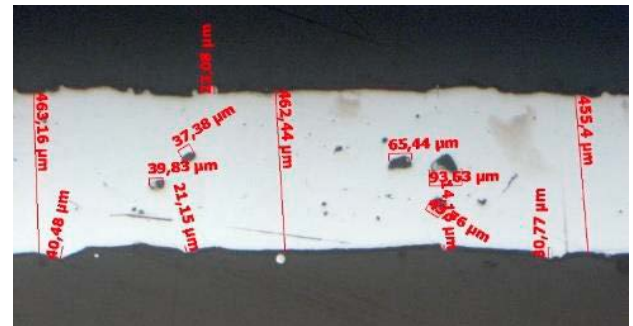
### 5.1 Учет особенностей изготовления обогреваемых лопаток ВНА с ПОС методом СЛС.

#### 5.1.1 Зависимость пористости от угла расположения изделия в зоне построения установки СЛС.

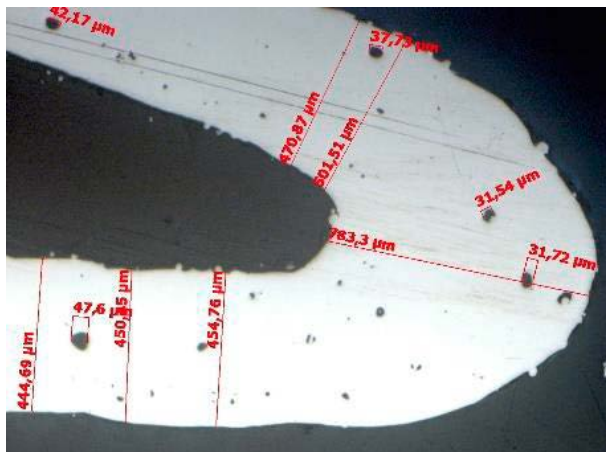
Как уже отмечалось ранее, одним из распространенных дефектов метода СЛС является пористость, которая может в свою очередь может являться источником роста трещин. В работе [12] авторы проводят исследование лопаток ВНА, напечатанных под разными углами к платформе построения.



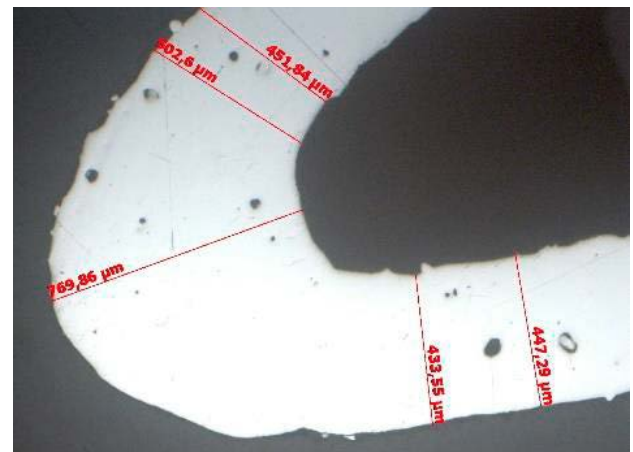
а



б



в



г

Рис. 5.1. Толщина стенки и образующиеся поры: а – корыто оболочка середина, б – спинка оболочка середина, в – нижняя цапфа, г – верхняя цапфа.

Методом оптической микроскопии установлено (рис. 5.1), что наименьшая пористость при СЛС образуется при расположении детали в  $45^\circ$  относительно платформы построения (при аналогичных режимах обработки материала). По



результатам измерений величины пор при угле расположения в  $45^\circ$  к плоскости построения имеют значения в диапазоне от 0,012 до 0,085 мм при толщинах стенки до 0,42 мм. Также авторы сделали вывод о том, что чем меньше толщина фрагмента лопатки, тем большее количество пор образуется.

### **5.1.2 Учет деформации отверстий и пазов при изготовлении изделий методом СЛС.**

Не смотря на геометрические возможности технологии СЛС, необходимо учитывать определенные технологические ограничения, накладываемые на будущее изделие. Так, в презентации [76] компании EOS приводятся данные о необходимости генерации поддержек в отверстиях, сечение которых расположено перпендикулярно плоскости построения. Производитель рекомендует для своей технологии DMLS оставлять поддержки в отверстиях диаметром более 8 мм, в отверстиях меньшего диаметра поддержки не нужны.

Исследовательский институт VTT Technical Research Centre of Finland Ltd в своем отчете [71] провел комплексное исследование различной геометрии для печати. Авторы отмечают, что, используя технологию SLM им удалось получить минимальные по диаметру отверстия 1 мм, как для расположенных перпендикулярно, так и параллельно плоскости построения. Заложенные в CAD-модель отверстия меньшего диаметра не пропечатываются, а полностью заполняются материалом. Также авторы утверждают, что отверстия до 25 мм в диаметре не нуждаются в поддержках и может только понадобится постобработка чтобы убрать задиры и заусенцы.

Среди отечественных работ стоит отметить [4], в которой проводятся похожие исследования. Автор так же изготовил образцы с отверстиями различного диаметра (от 0,1 до 2,0 мм) под углами 0, 45 и 90 градусов к плоскости печати. Исследование интересно тем, что приведены фактические размеры получаемых отверстий: так, под углом 90 градусов к плоскости построения реально получить отверстия от 0,5 мм, при этом фактический диаметр будет отличаться лишь на 0,01 мм в меньшую сторону. Однако, для отверстий, расположенных под углом 0 градусов относительно плоскости печати получить диаметр менее 0,8 мм не

представляется возможным, а фактический диаметр будет на 0,12 мм (27,5%) меньше (таблица 5.1-5.3).

Таблица 5.1. Действительные размеры отверстий образца, изготовленного под углом 0° относительно плоскости печати [2]

Номинальный диаметр отверстий, мм	Действительный диаметр отверстий, мм		
	Толщина ступеньки, мм		
	1	5	10
0,10	-	-	-
0,20	-	-	-
0,30	-	-	-
0,40	-	-	-
0,50	-	-	-
0,60	-	-	-
0,70	-	-	-
0,80	-	0,58	0,58
0,90	-	0,69	0,68
1,00	0,77	0,79	0,92
1,10	0,92	0,92	0,96
1,20	1,02	1,04	1,03
1,30	1,13	1,08	1,17
1,40	1,23	1,30	1,24
1,50	1,35	1,31	1,27
1,60	1,46	1,42	1,44
1,70	1,67	1,62	1,56
1,80	1,76	1,71	1,63
1,90	1,84	1,80	1,74
2,00	1,92	1,88	1,78

Таблица 5.2. Действительные размеры отверстий образца, изготовленного под углом 45° относительно плоскости печати [2]

Номинальный диаметр отверстий, мм	Действительный диаметр отверстий, мм		
	Толщина ступеньки, мм		
	1	5	10
0,10	-	-	-
0,20	-	-	-
0,30	-	-	-
0,40	-	0,87	0,28
0,50	0,17	0,24	0,33
0,60	0,39	0,41	0,58
0,70	0,44	0,55	0,67
0,80	0,48	0,59	0,84
0,90	0,78	0,82	0,93
1,00	1,01	0,97	1,06
1,10	1,09	1,07	1,12
1,20	1,18	1,18	1,15
1,30	1,29	1,28	1,28
1,40	1,41	1,38	1,38
1,50	1,50	1,48	1,48
1,60	1,59	1,58	1,58
1,70	1,70	1,69	1,68
1,80	1,79	1,79	1,80
1,90	1,89	1,91	1,89
2,00	2,00	1,98	2,02

Таблица 5.3. Действительные размеры отверстий образца, изготовленного под углом 90° относительно плоскости печати [2]

Номинальный диаметр отверстий, мм	Действительный диаметр отверстий, мм		
	Толщина ступеньки, мм		
	1	5	10
0,10	-	-	-
0,20	0,04	0,05	0,04
0,30	0,12	0,15	0,13
0,40	0,21	0,24	0,23
0,50	0,49	0,49	0,50
0,60	0,59	0,59	0,60
0,70	0,70	0,70	0,70
0,80	0,79	0,79	0,79
0,90	0,89	0,90	0,89
1,00	0,99	0,99	0,99
1,10	1,10	1,10	1,09
1,20	1,19	1,19	1,19
1,30	1,30	1,30	1,29
1,40	1,40	1,39	1,39
1,50	1,50	1,50	1,50
1,60	1,59	1,60	1,60
1,70	1,69	1,70	1,69
1,80	1,80	1,79	1,79
1,90	1,89	1,90	1,89
2,00	1,99	2,00	1,99

Исследование автора показывает, что под углом 0 градусов к плоскости печати получить отверстия без искажения формы невозможно вплоть до диаметра 2 мм. По отверстиям без искажения формы можно сделать вывод, что для углов 45 и 90 градусов максимальное отклонение от фактического диаметра составит -0,02 мм, а для угла 0 градусов отклонение может увеличиться до -0,23 мм.

Для отработки вопроса изготовления методом СЛС отверстий в деталях ГТД, было проведено экспериментальное исследование моделей каналов полых лопаток [3, 35]. Для эксперимента было изготовлено 3 одинаковых образца моделей каналов, которые имитируют каналы входной кромки рабочей лопатки турбины высокого давления (рис. 5.2). Материал образцов – сплав Inconel 718, размер частиц 40-60 мкм.

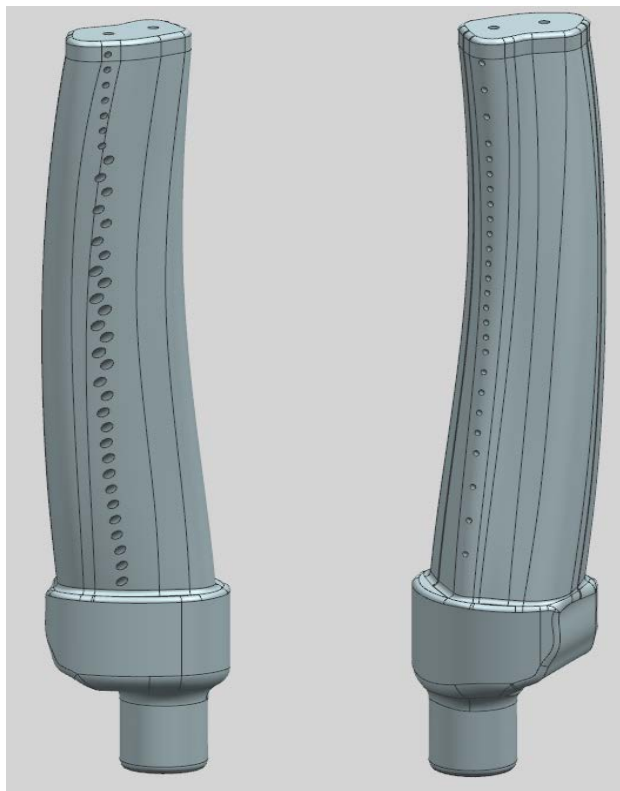


Рис. 5.2. Модель каналов для обработки изготовления отверстий методом СЛС.

После изготовления проводились следующие испытания:

- продувка образцов при перепадах давления  $\pi = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7; 1,9; 2,1;$
- проливка образцов под давлением на входе в деталь  $P_{вх} = 0,3...6,0$  кгс/см<sup>2</sup> с шагом 0,3 кгс/см<sup>2</sup> и расходом воды 60...280 г/с.

Схема подключения образца к стенду показана на рис. 5.3.

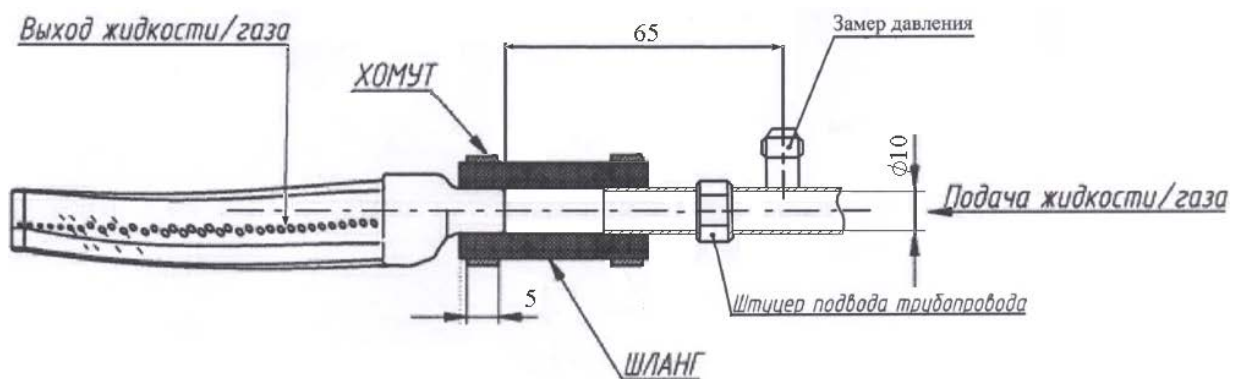


Рис. 5.3. Схема подключения образца к стенду.

Также для сравнительных испытаний были изготовлены аналогичные образцы методом литья и проведены соответствующие эксперименты. Результаты продувок литых и аддитивных лопаток представлены на рис. 5.4.

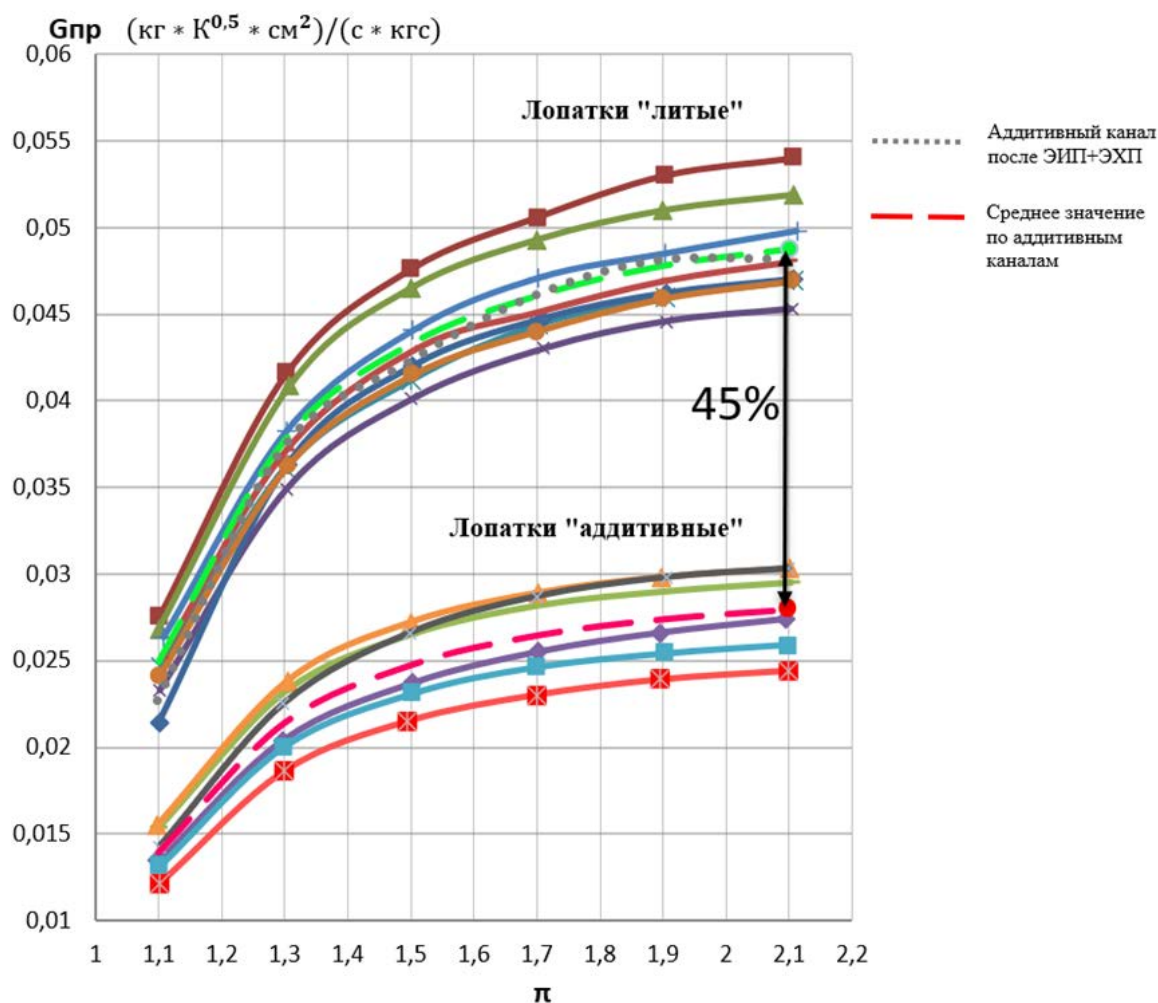


Рис. 5.4. Результаты продувок литых и аддитивных лопаток.

Как видно из графиков, расходная характеристика аддитивных каналов значительно ниже расходной характеристики каналов, полученных методом литья (при продувке – на 45%). Измерение диаметров отверстий аддитивных каналов (таблица 5.4) показало, что фактический диаметр образцов уменьшился до 70% от номинального значения 1 мм, что и приводит к уменьшению расходной характеристики.

Таблица 5.4. Измерение диаметров отверстий аддитивных каналов.

№ Образца	№ отверстия	Фактический диаметр, мм
1	1	0,80
	2	0,80
	3	0,76
	4	0,70
2	1	0,85
	2	0,79
	3	0,80
	4	0,70
3	1	0,93
	2	0,93
	3	0,83
	4	0,83

Нивелировать меньший размер отверстий можно путем последующей постобработки. Были исследованы методы электрохимической обработки (ЭХО), а также совокупность электроимпульсной полировки (ЭИП) вместе с электрохимической полировкой (ЭХП). Повторные продувки каналов после обработки показывают, что после ЭИП+ЭХП расходная характеристика аддитивного канала близка к литому (рис. 5.5).

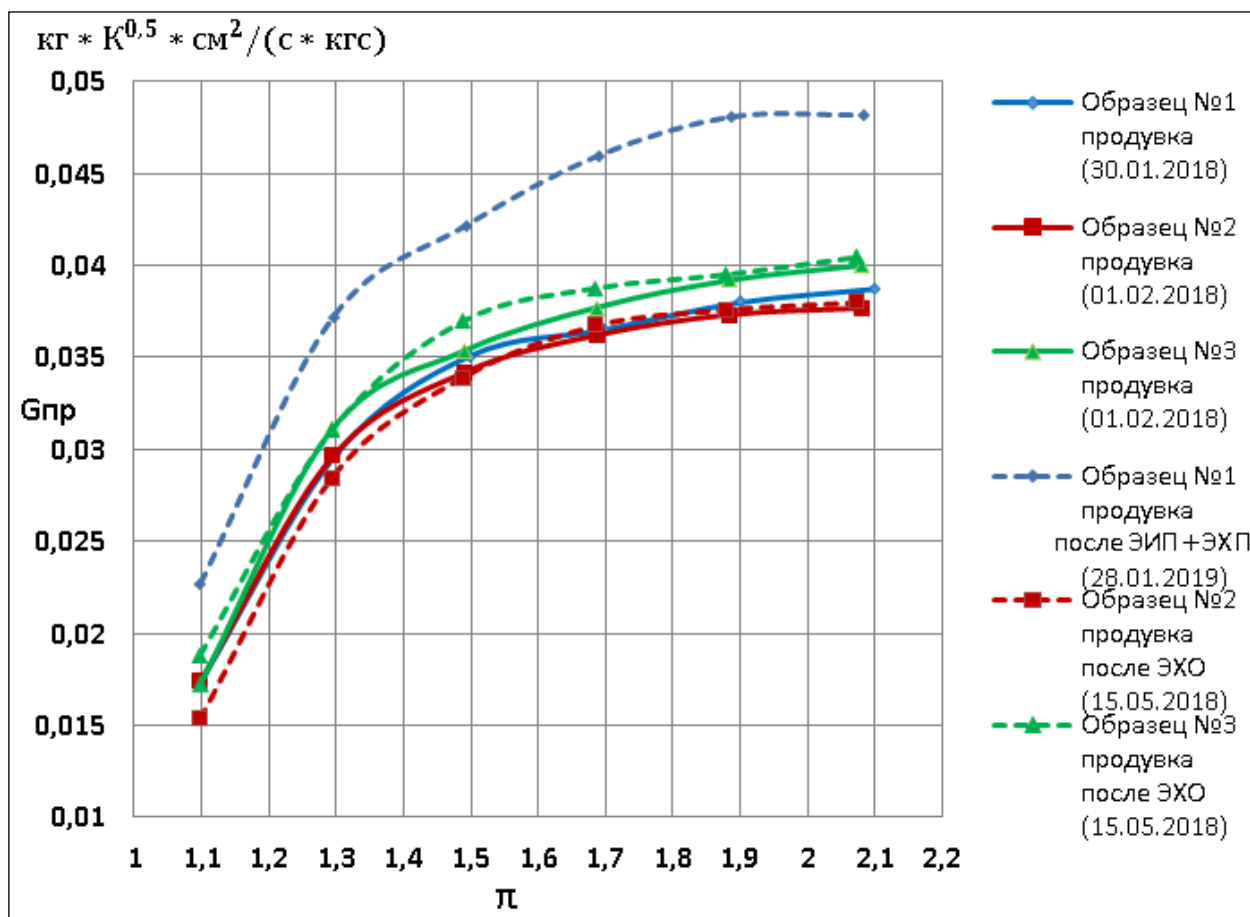


Рис. 5.5. Результаты продувок каналов, изготовленных методом СЛС (после ЭХО и ЭИП+ЭХП).

### 5.1.3 Учет анизотропии свойств изделий, получаемых методом СЛС.

Полученные в ходе экспериментов результаты, а также предыдущий опыт показывают, что для технологии СЛС характерна анизотропия свойств получаемых изделий. При изменении ориентации изделия в камере построения при аналогичных режимах работы установки и материале, меняется значительное количество свойств, что необходимо учитывать как при проектировании самого изделия, так и при создании камеры построения оператором.

Как было определено в главе 4, при изменении ориентации образцов в камере построения, меняются следующие свойства:

1. Механическая прочность;
2. Шероховатость;
3. Пористость;
4. Теплопроводность.

В ходе других экспериментов видимой разницы получено не было.

Для того, чтобы учитывать перечисленные свойства, была получена математическая модель, учитывающая все зависимости. Для этого по графикам, полученным в ходе экспериментов, в программе Microsoft Excel методом аппроксимации были получены функции зависимости изучаемых свойств от угла ориентации в камере построения (рис. 5.6-5.9).

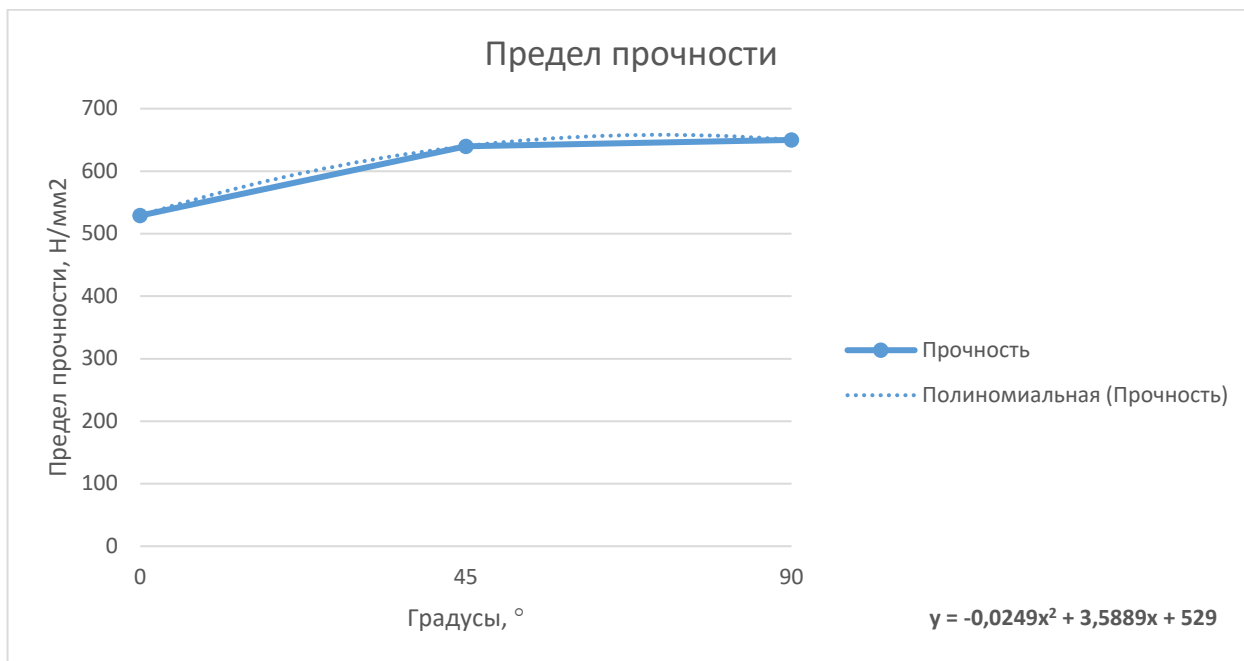


Рис. 5.6. График зависимости предела прочности от угла ориентации.

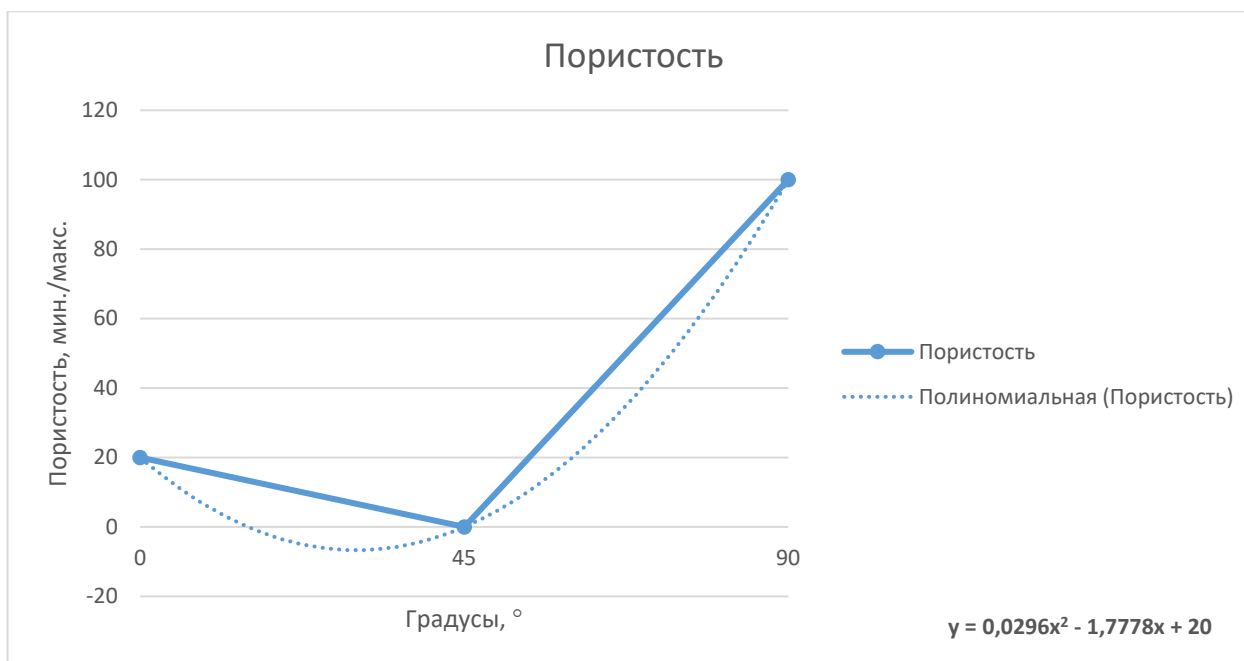


Рис. 5.7. График зависимости пористости от угла ориентации.



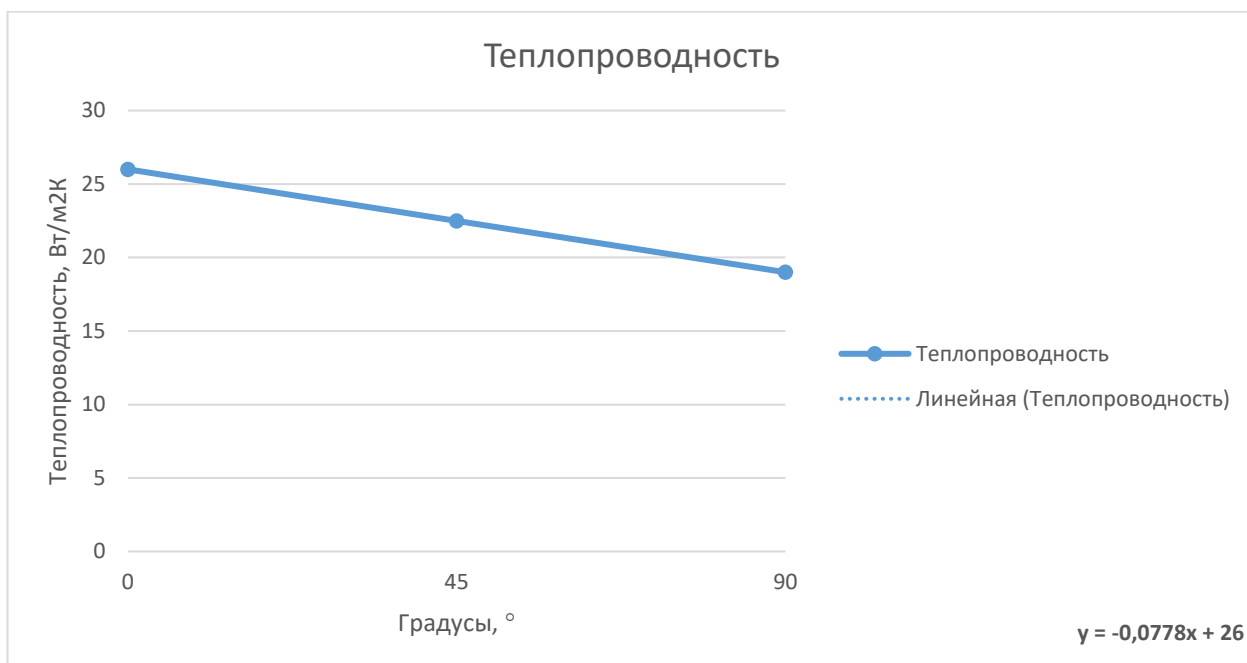


Рис. 5.8. График зависимости теплопроводности от угла ориентации.

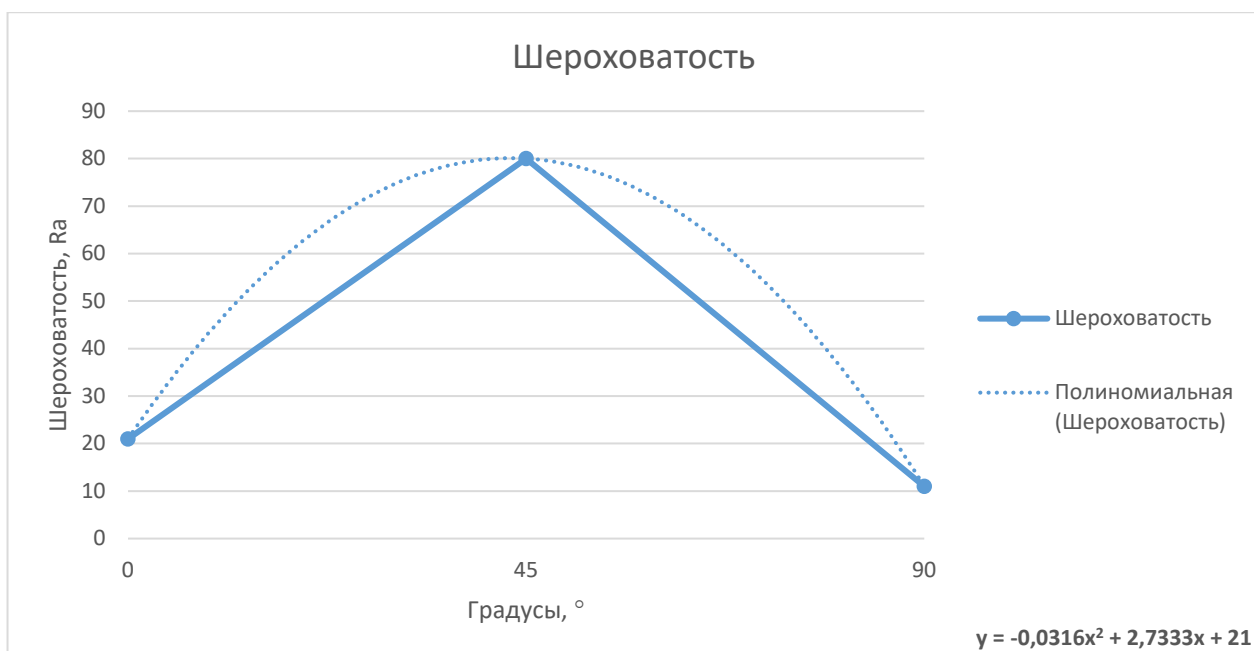


Рис. 5.9. График зависимости шероховатости от угла ориентации.

На всех графиках по оси абсцисс отложены значения углов ориентации образцов при печати (град.), а по оси ординат соответствующие полученные значения в ходе экспериментов. Для графиков на рис. 5.6, 5.8 и 5.9 это абсолютные величины со своей размерностью. Для графика на рис. 5.7 это относительная величина, характеризующая изменение величины: 0 – минимум пор в изделии, 100 – максимум пор в изделии.

Поскольку для определения теплопроводности были получены данные только для образцов, напечатанных только под углами 0 и 90 градусов, видно, что зависимость на рис. 5.8 определяется линейной функцией

$$c(x) = -0.0778x + 26, \quad (2)$$

где  $x$  – угол ориентации при печати (град.),  $c(x)$  – теплопроводность (Вт/м<sup>2</sup>К).

Для предела прочности и шероховатости было принято использовать полином второго порядка, поскольку такая функция в достаточной степени описывает характер изменения величин:

$$a(x) = -0.0249x^2 + 3.5889x + 529, \quad (3)$$

$$d(x) = -0.0316x^2 + 2.7333x + 21, \quad (4)$$

где  $a(x)$  – предел прочности (Н/мм<sup>2</sup>),  $d(x)$  – шероховатость (Ra).

Полином второй степени для графика на рис. 5.7 не является корректным, поскольку при значениях около 30 градусов выдает отрицательные значения пористости. В связи с этим выбран следующий метод описания функцией:

$$b(x) = \begin{cases} -0.4444x + 20, & 0 \leq x < 45 \\ 2.2222x - 100, & 45 \leq x \leq 90 \end{cases}, \quad (5)$$

Где  $b(x)$  – относительная пористость (мин./макс. пор).

Объединив полученные уравнения, мы получим регрессионную модель свойств изделий после СЛС в зависимости от угла ориентации в камере построения:

$$\begin{aligned} a(x) &= -0.0249x^2 + 3.5889x + 529 \\ b(x) &= \begin{cases} -0.4444x + 20, & 0 \leq x < 45 \\ 2.2222x - 100, & 45 \leq x \leq 90 \end{cases} \\ c(x) &= -0.0778x + 26 \\ d(x) &= -0.0316x^2 + 2.7333x + 21 \end{aligned} \quad (6)$$

#### **5.1.4 Методика проектирования и рекомендации по конструированию обогреваемых лопаток с ПОС, получаемых методом СЛС.**

Принципы организации работы по проектированию конструкций компрессорных лопаток с ПОС строятся на общих принципах проектирования, однако, в случае применения технологии СЛС как основной технологии формообразования имеет ряд особенностей. Схема процесса проектирования

компрессорных лопаток с ПОС, полученных методом СЛС приведена на рисунке 5.12. Ключевым моментом, на который необходимо обратить внимание, является включение этапа технологической подготовки производства лопатки в цикл проектирования конструкции (рис. 5.10-5.11). Такой подход обусловлен инерционностью процесса формирования рабочего пространства зоны построения установки, с учетом многократного перерасположения модели заготовки в пространстве построения и необходимостью перепроектирования поддерживающих структур и теплоотводов с обязательным моделированием НДС заготовки с учетом тепловых деформаций в процессе синтеза.

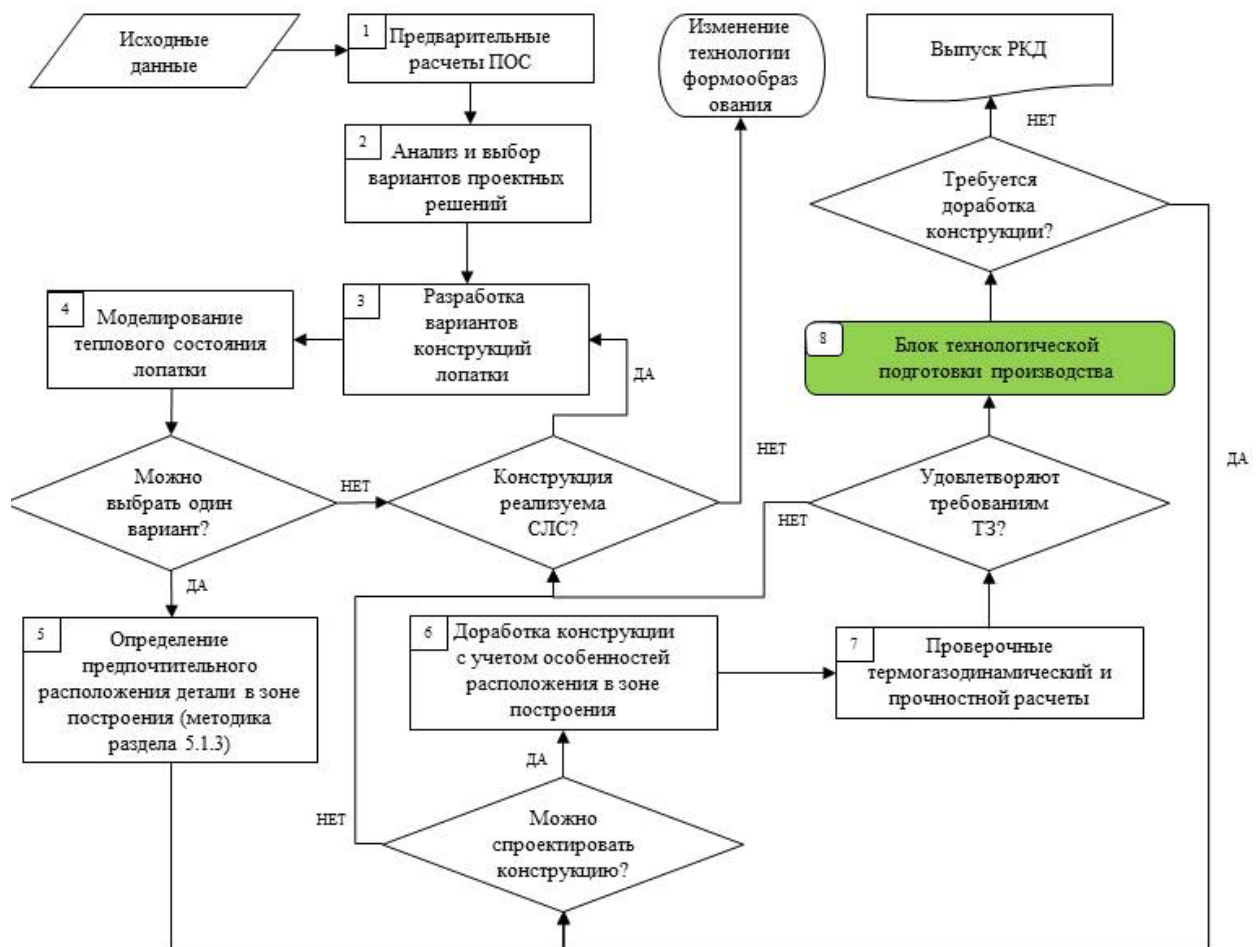


Рис. 5.10. Схема процесса проектирования компрессорных лопаток с противообледенительной системой полученных методом селективного лазерного плавления.

Далее подробнее рассмотрим этапы процесса проектирования компрессорных лопаток с ПОС, полученных методом СЛС.

Исходными данными для проектирования являются общий термогазодинамический расчет двигателя, давления, расходы, температуры в

системе ПОС и геометрия корпусов и мест установки лопаток ВНА. На этапах 1 и 2 проектирования осуществляется выбор возможных вариантов реализации конструкции лопатки и ПОС на основании опыта проектирования, научных исследований и опытно-конструкторских проработок. В данной методике не рассматривается этап профилирования аэродинамических поверхностей и их оптимизация, считается, что данные задачи уже решены, также как и конструкция мест закрепления лопаток, и определяются на более ранних этапах проектирования.

На этапе 3 проводится детальная проработка вариантов конструкций лопатки. На данном этапе возможна проработка нескольких вариантов конструкций если нет однозначной определенности в выборе того или иного варианта.

На 4 этапе необходимо провести моделирование теплового состояния лопатки для оценки эффективности системы подогрева лопатки. На данном этапе возможно использование не специализированных методик расчётов без учета механизмов обледенения на основе сравнения с известными эффективными конструктивными решениями и тепловым состоянием для параметров схожих с проектными параметрами исследуемой конструкции (см. раздел 5.2). В случае отсутствия возможности однозначного определения одного варианта конструкции необходимо принять решение о реализуемости конструкции с применением технологии СЛС или итерации по перепроектированию конструкции для выбора окончательного варианта ПОС.

После определения конструктивного облика лопатки и ПОС проводится выбор ориентации лопатки в пространстве построения установки СЛС на основании целевых показателей качества изделия таких как шероховатость, статическая прочность, теплопроводность, пористость согласно методике из раздела 5.1.3 (этап 5 методики). Шероховатость поверхности будет непосредственно влиять на усталостную прочность изделия, необходимо не допускать наличие поверхностей без механической или электрохимической обработки в критичных зонах. Так же шероховатость будет влиять на величину припуска для механической обработки. Статическая прочность оказывает непосредственное влияние на работоспособность конструкции, толщины стенок и

мест максимального нагружения, что в свою очередь влияет на эффективность прогрева лопатки и массу узла. Абсолютные значения теплопроводности определяют тепловое состояние конструкции и является ключевой для работоспособности системы противообледенения. Минимизация пористости обеспечивает приемлемую долговечность конструкции, способность ее сопротивления негативным факторам, которые возникают при развитии процессов эрозионного износа под влиянием загрязнений, содержащихся в атмосферном воздухе, и как следствие, влияет на скорость развития процессов коррозии. Таким образом выбор расположения лопатки в зоне построения играет ключевую роль при обеспечении работоспособности и долговечности лопатки с ПОС в условиях эксплуатации.

Так же при выборе ориентации конструктору необходимо прогнозировать для каких поверхностей потребуются поддерживающие структуры или теплоотводы на основании общих рекомендаций по проектированию [71, 76] с целью их минимизации, исключения тепловых деформаций и сокращения количества итераций по перепроектированию конструкции с учетом этапа ТПП (этап 8).

Если на этапе предварительного проектирования конструкции лопатки и ориентации ее для зоны построения установки СЛС понятно, что данную конструкцию реализовать невозможно с учетом целевых показателей качества необходимо перепроектировать конструкцию или принимать решение об изменении технологии формообразования (отказом от технологии аддитивного производства). В случае реализуемости конструкции необходимо уточнить ее с учетом выбранного размещения в зоне построения установки СЛС (этап 6). Необходимо скорректировать углы, скругления, наклоны поверхностей так, чтобы минимизировать в последствии поддерживающие структуры и обеспечить целостность конструкции в процессе синтеза.

На этапе 7 полученную геометрию необходимо верифицировать согласно принятым методикам расчетов конструкций с элементами ПОС [54] и провести необходимые расчеты на прочность. В случае получения отрицательных заключений после расчетов и моделирования необходимо доработать конструкцию или менять технологию формообразования.

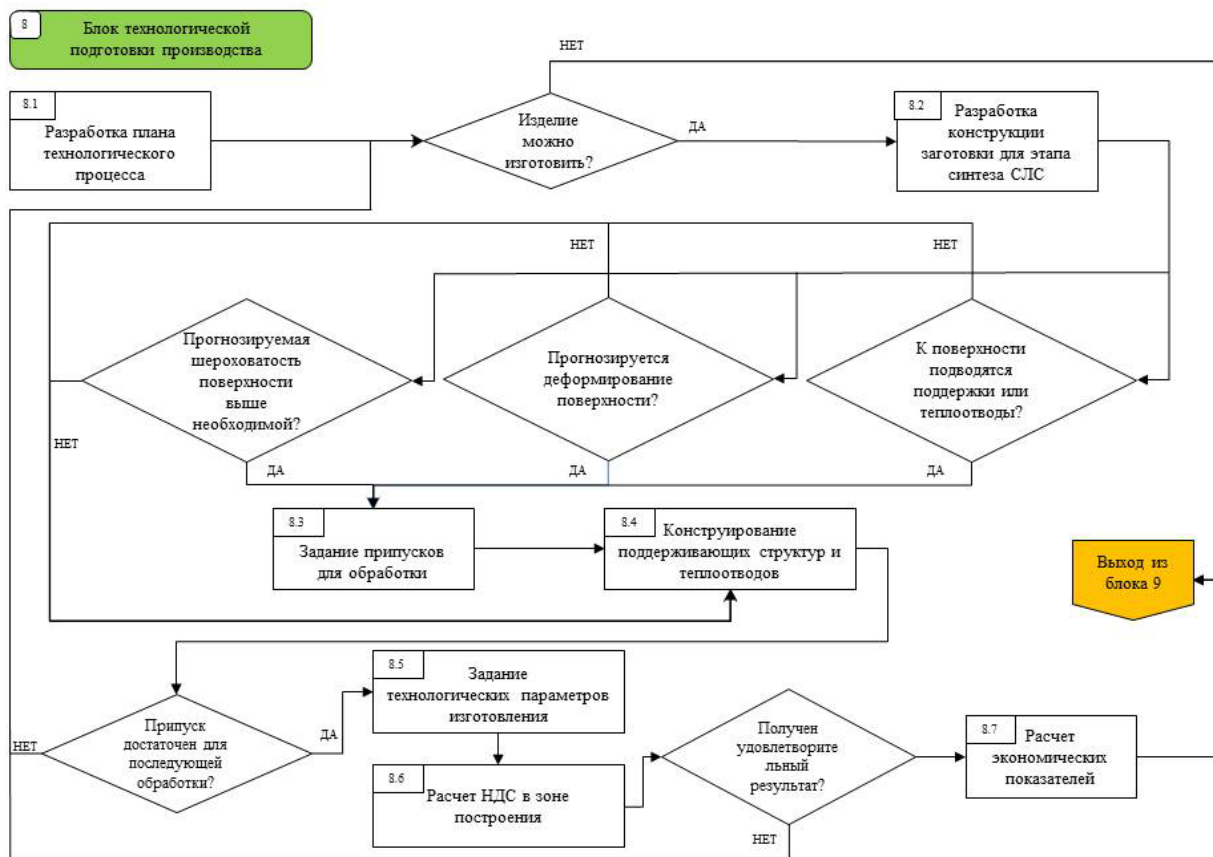


Рис. 5.11. Схема процесса технологической подготовки производства лопаток с противообледенительной системой полученных методом селективного лазерного плавления.

В связи с особенностями технологии СЛС этап 8 - ТПП непосредственно включается в процесс разработки конструкции, так как было показано выше, что технологические особенности непосредственно влияют на конструкцию изделия.

После разработки плана технологического процесса (этап 8.1) проводится разработка конструкции заготовки, задаются технологические элементы необходимые для базирования и закрепления на последующих технологических операциях, конструируются вспомогательные элементы, если они необходимы для реализации процесса СЛС при изготовлении лопатки (этап 8.2).

На этапе 8.3. проводится назначение припусков для компенсации возможной шероховатости, отклонений формы и расположения поверхностей, и в местах подвода поддерживающих структур и теплоотводов.

На этапе 8.4 проводится разработка геометрии поддерживающих структур и теплоотводов.

На этапе 8.5 назначаются технологические параметры для процесса синтеза, такие как:

- толщина единичного слоя изделия;
- мощность лазерного излучения;
- скорость сканирования (в т.ч. для отдельных участков единичного слоя изделия – сердцевины, корки, поддерживающих структур и т.д.);
- температура камеры построения;
- насыщение камеры построения инертным газом.

После определения конструкции зоны построения и задания технологических параметров проводится моделирование напряженно-деформированного состояний изделия (этап 8.6) в процессе синтеза [21, 79]. При необходимости, проводится доработка конструкции зоны построения или конструкции самой лопатки в случае получения не удовлетворительных результатов моделирования НДС зоны построения.

По результатам всех работ на этапе ТПП определяются экономические показатели технологического процесса (этап 8.7). Предпочтительным является размещение изделий в зоне построения таким образом, чтобы обеспечить минимальную высоту зоны построения и максимальную плотность расположения изделий, однако, как показано выше, это может быть не оптимально с точки зрения показателей качества изделия.

Таким образом выбор расположения изделий и их конструкция являются ключевыми для технико-экономического обоснования при применении технологии СЛС.

## **5.2 Оценка распределения тепловых потоков и расхода воздуха для обогреваемой лопатки ВНА с ПОС.**

Одним из путей повышения КПД двигательной установки является снижение расхода воздуха на различные узлы. Так, предлагается уменьшить расход воздуха, отбираемого от компрессора на обогрев лопаток ВНА при работе противообледенительной системы. Добиться этого возможно путем

усовершенствования внутренней геометрии лопатки ВНА, обеспечив более равномерное течение и прогрев при меньшем расходе.

В ходе работ был проведен сравнительный расчет в программном комплексе Ansys CFX четырех конструкций лопатки ВНА:

1. оригинальная конструкция;
2. конструкция с единой полостью;
3. конструкция со сплошными перегородками;
4. конструкция с не сплошными перегородками.

Во всех модифицированных конструкциях также было удалено технологическое отверстие, расположенное в нижней части лопатки.

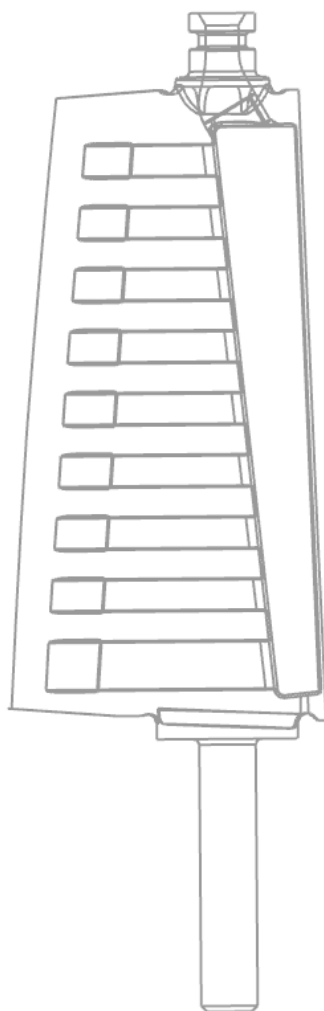


Рис. 5.12. Оригинальная конструкция лопатки ВНА.





Рис. 5.13. Конструкция лопатки ВНА с единой полостью.



Рис. 5.14. Конструкция лопатки ВНА со сплошными перегородками.



Рис. 5.15. Конструкция лопатки ВНА с не сплошными перегородками.

Граничные условия для расчета были взяты из руководства по эксплуатации двигателя ТВ3-117:

Таблица 5.5. Граничные условия для расчета.

inlet	$P^*=101325$ Па, $T=273$ К
inlet горячего воздуха	$P^*=163234.6$ Па, $T=373$ К
outlet	$G=0.3298$ кг/с (расход на одну лопатку)

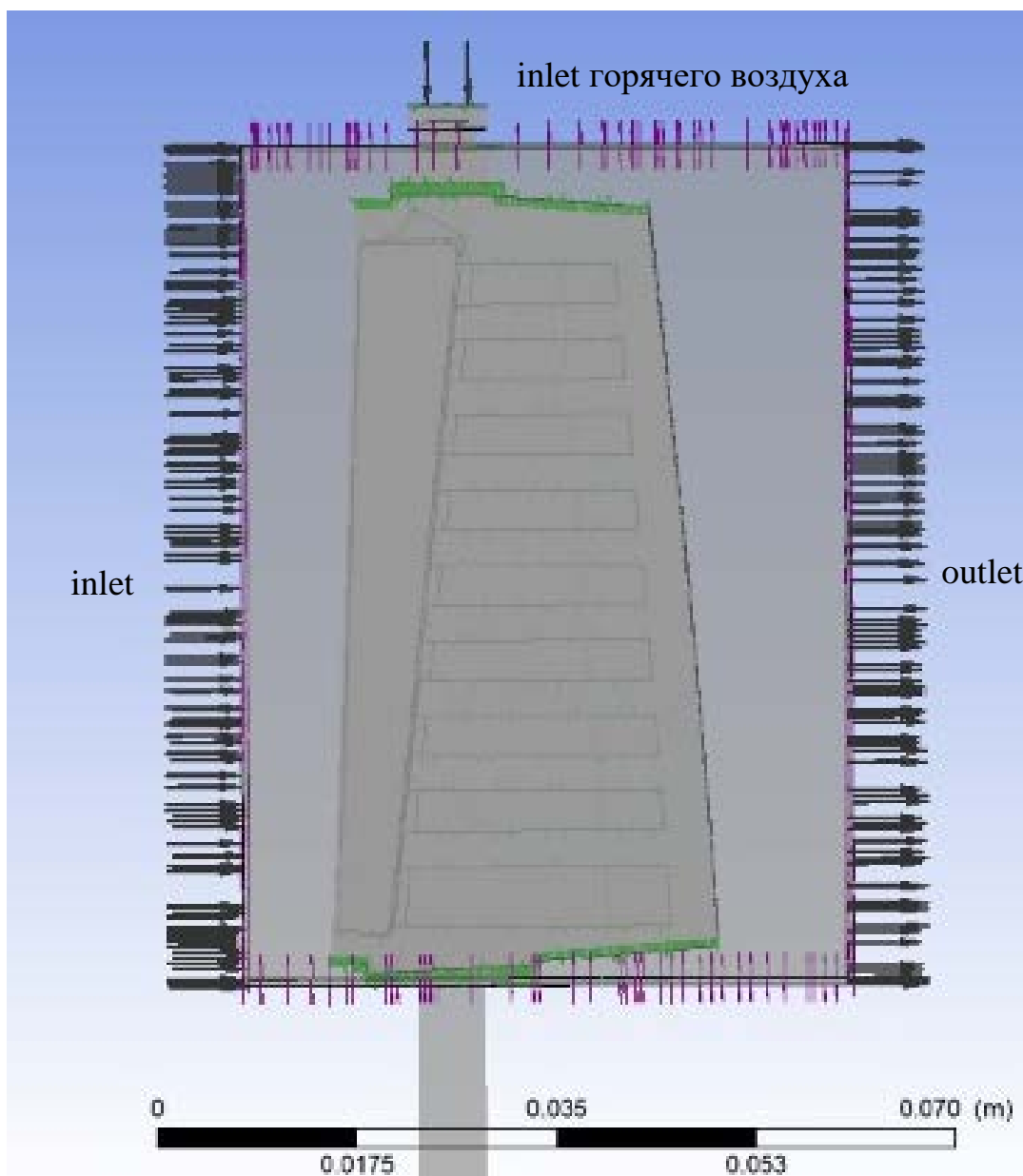


Рис. 5.16. Граничные условия для расчета конструкций лопатки ВНА.

Расчетная область состоит из 3 доменов, связанных между собой интерфейсами, с включенной функцией теплопередачи между телами. Для «жидкого объема» задан режим турбулентности Shear Stress Transport и режим теплопередачи Total Energy, рабочее тело – идеальный газ. На боковых поверхностях «жидкого объема» холодного воздуха поставлено условие Periodic.

Ниже представлены результаты расчетов (рис. 5.17-5.28).

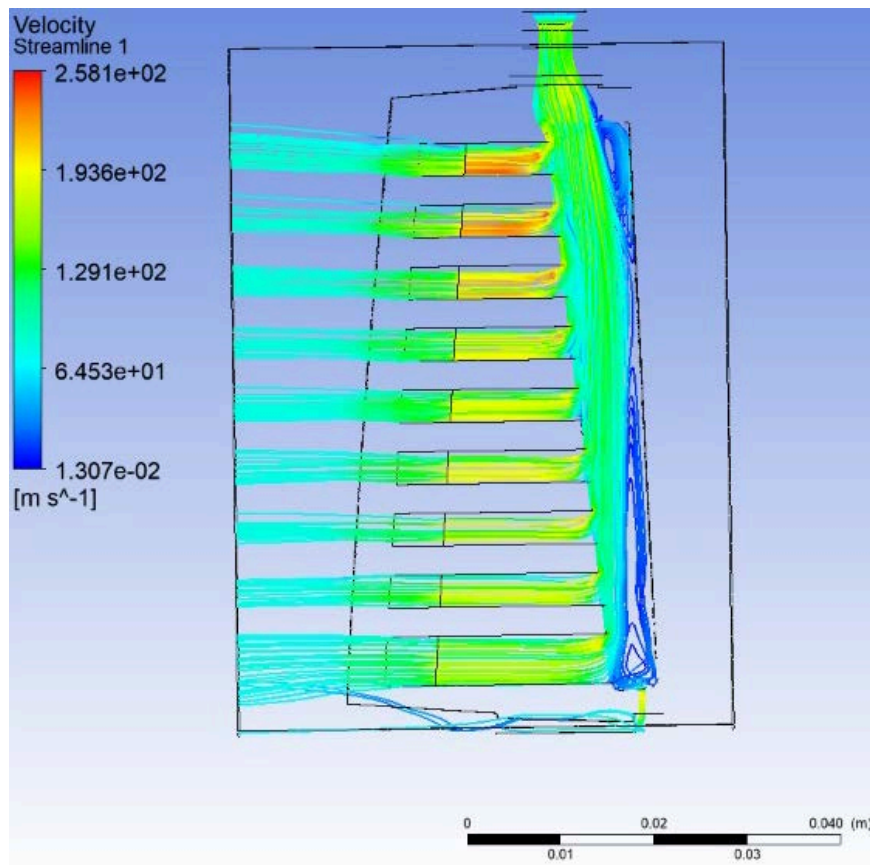


Рис. 5.17. Течение потока внутри каналов оригинальной конструкции.

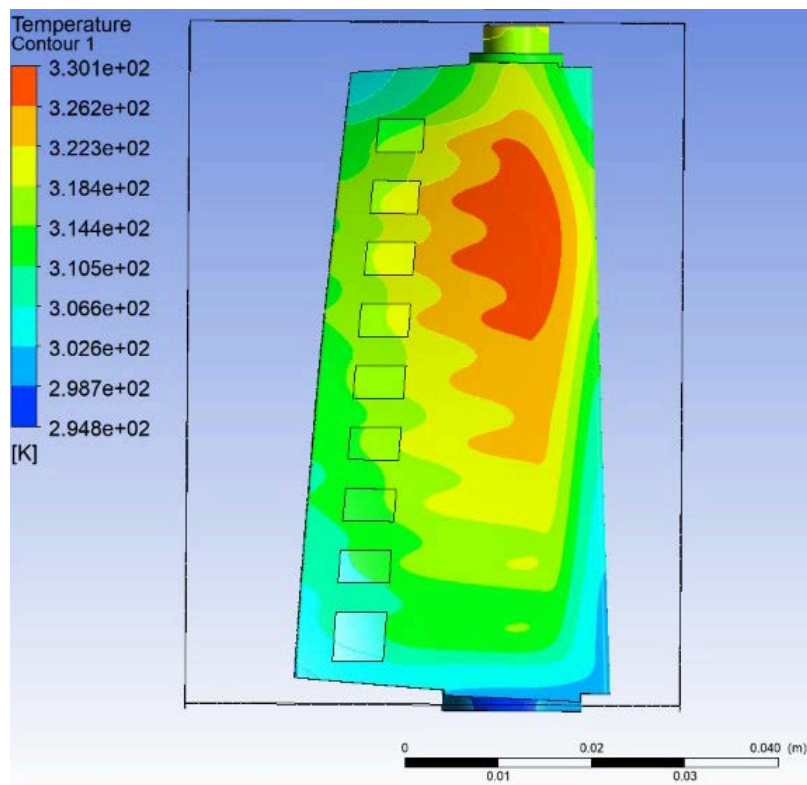


Рис. 5.18. Распределение температур по поверхности корытца оригинальной конструкции.

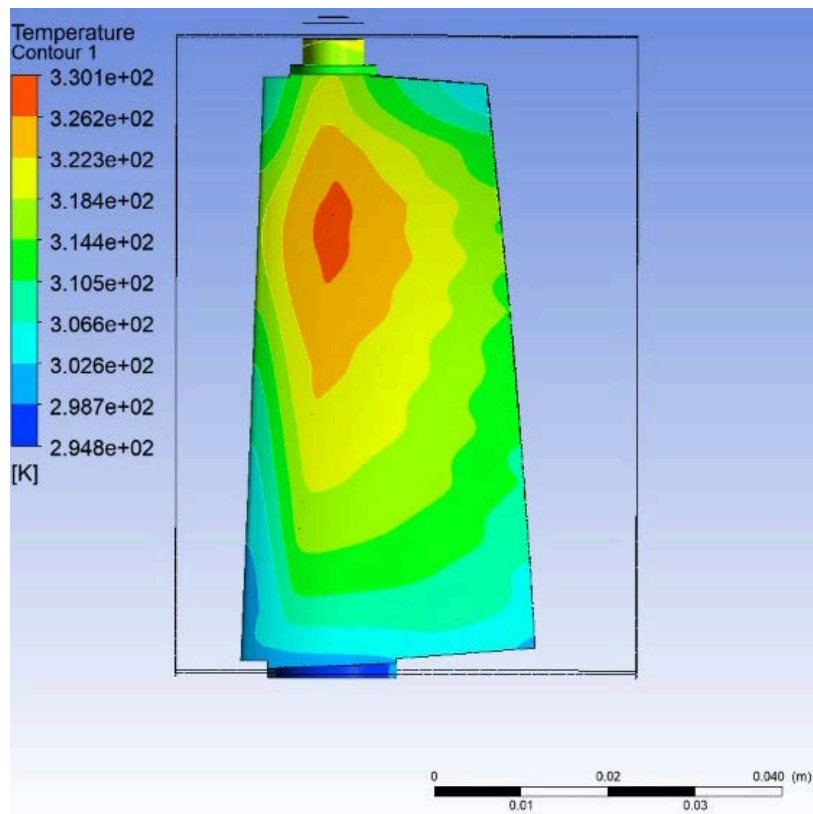


Рис. 5.19. Распределение температур по поверхности спинки оригинальной конструкции.

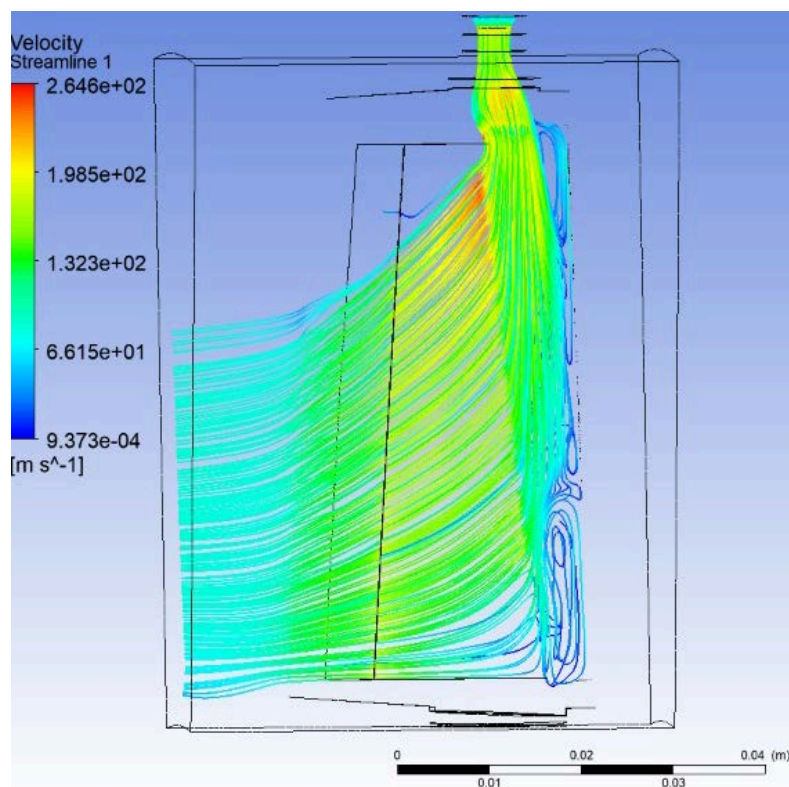


Рис. 5.20. Течение потока внутри канала конструкции с единой полостью.

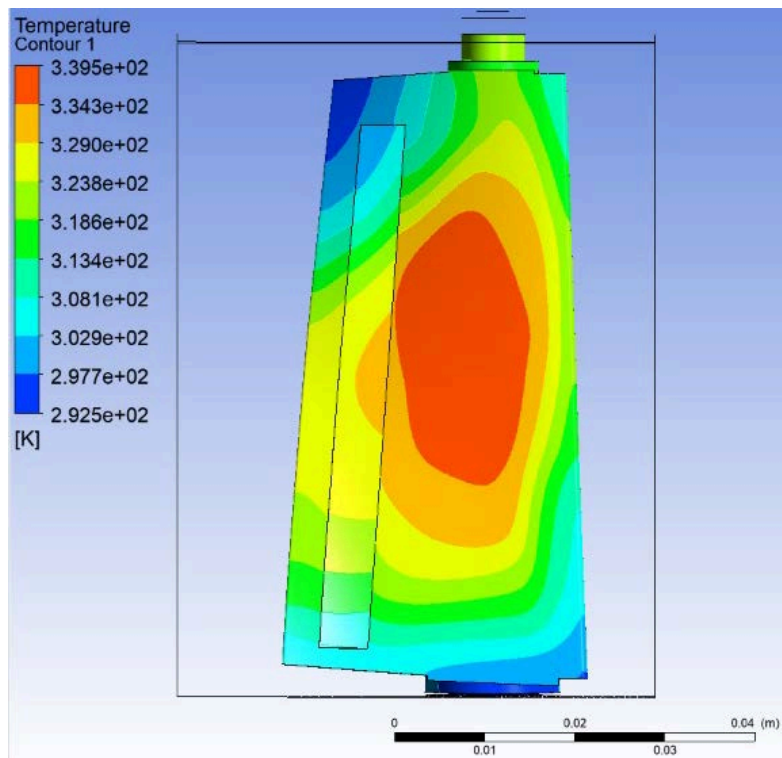


Рис. 5.21. Распределение температур по поверхности корытца конструкции с единой полостью.

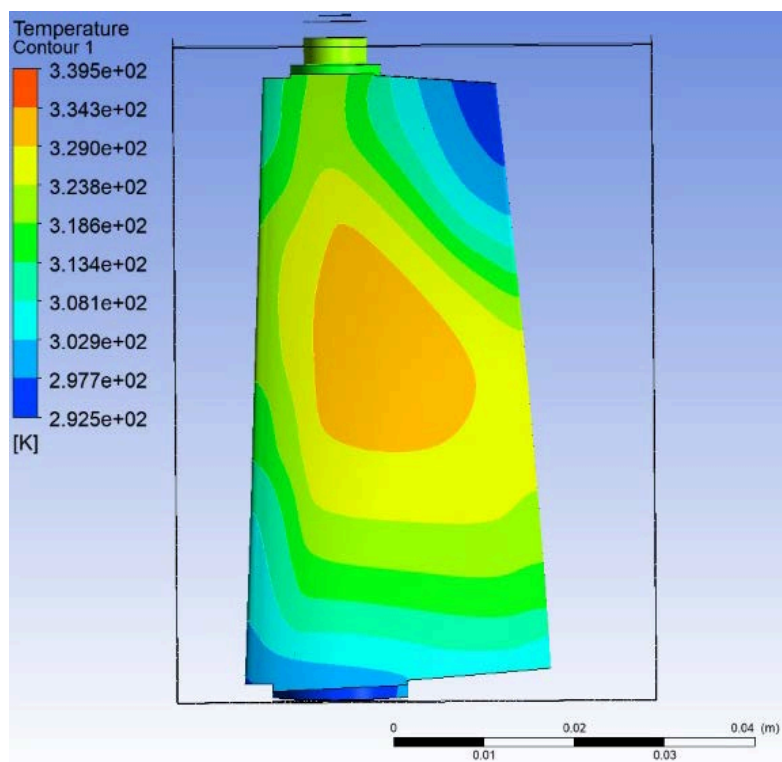


Рис. 5.22. Распределение температур по поверхности спинки конструкции с единой полостью.

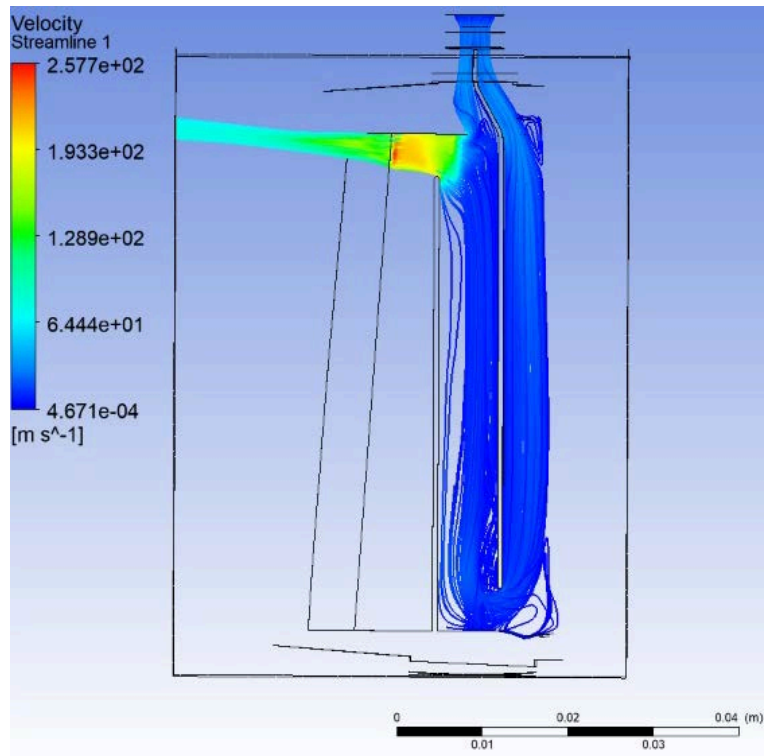


Рис. 5.23. Течение потока внутри канала конструкции со сплошными перегородками.

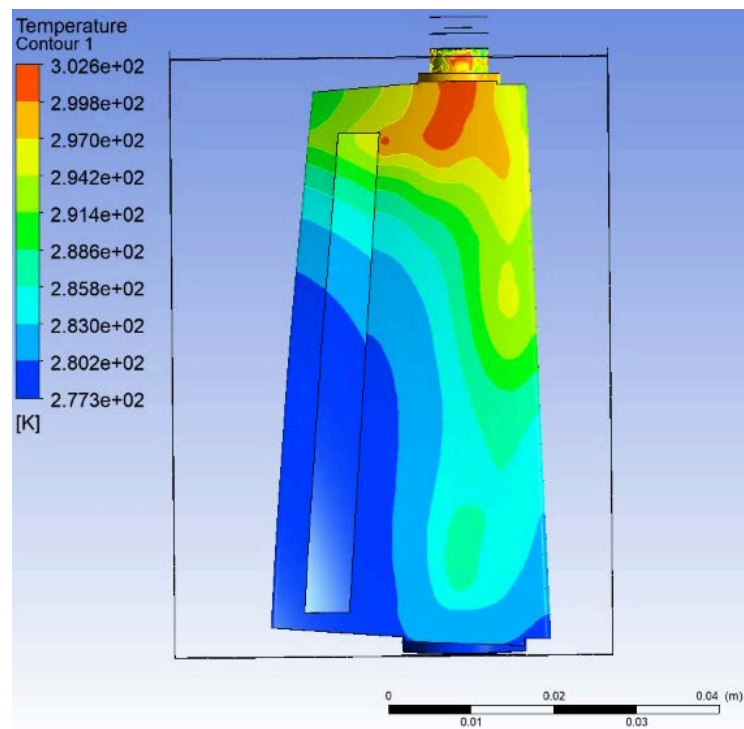


Рис. 5.24. Распределение температур по поверхности корытца конструкции со сплошными перегородками.



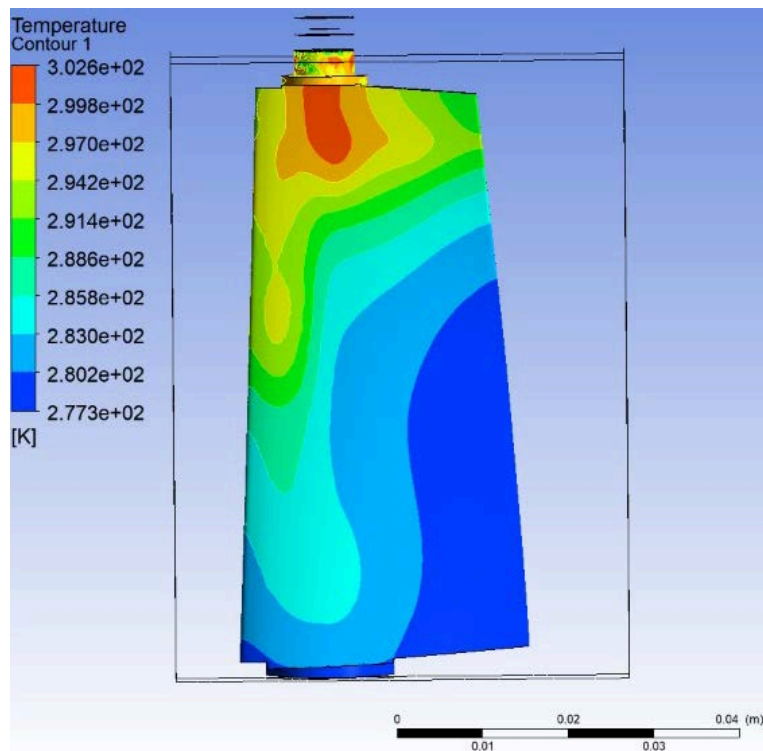


Рис. 5.25. Распределение температур по поверхности спинки конструкции со сплошными перегородками.

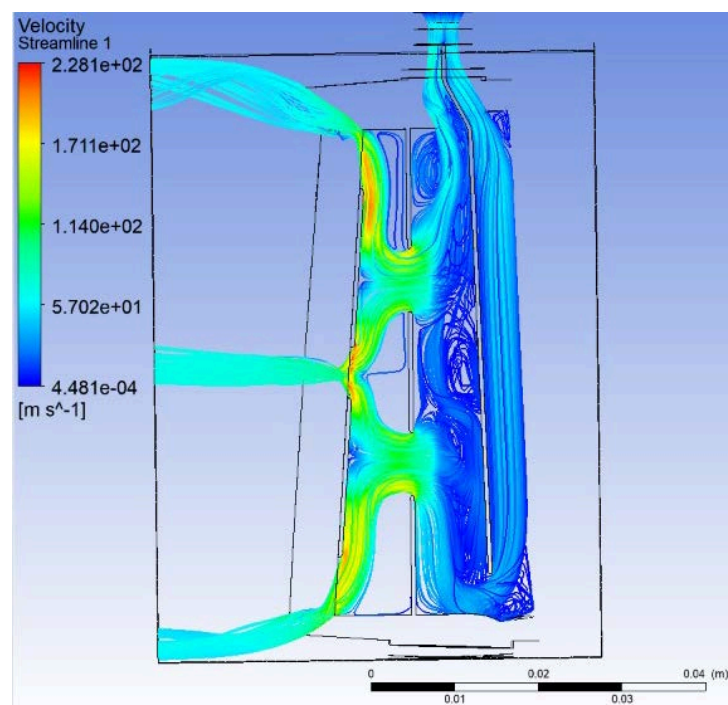


Рис. 5.26. Течение потока внутри канала конструкции с не сплошными перегородками.



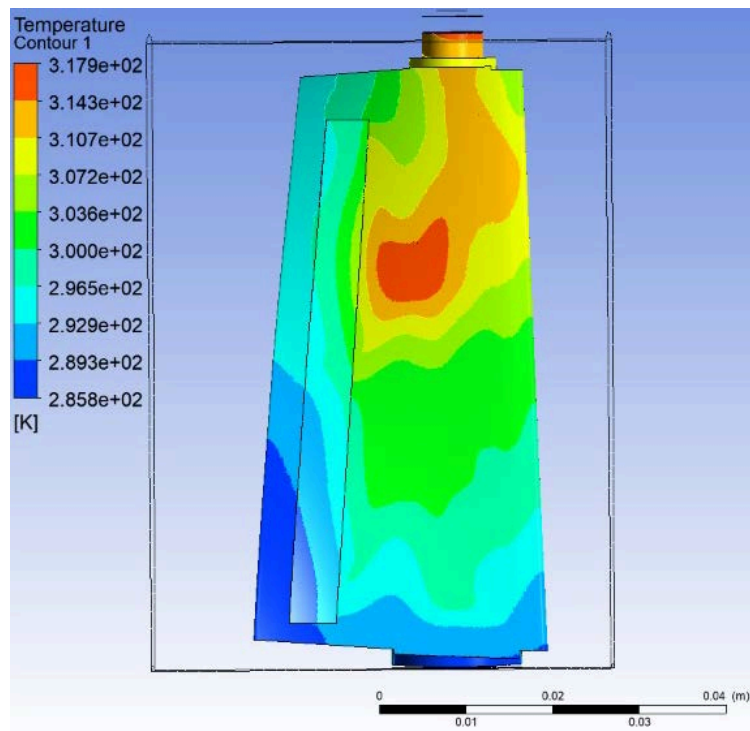


Рис. 5.27. Распределение температур по поверхности корытца конструкции с не сплошными перегородками.

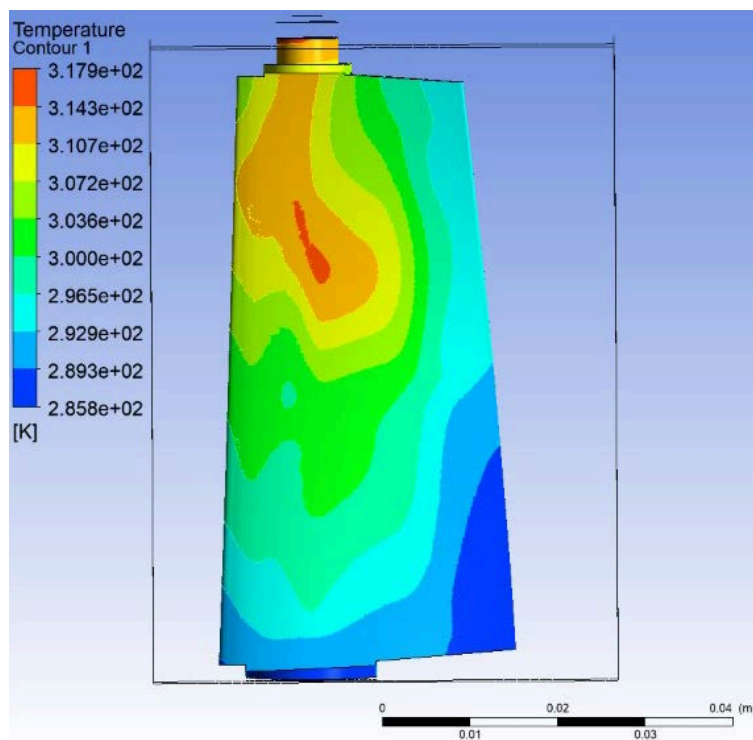


Рис. 5.28. Распределение температур по поверхности спинки конструкции с не сплошными перегородками.

В рамках рассматриваемой задачи было необходимо обеспечить уменьшение расхода воздуха, отбираемого для обогрева лопатки ВНА при сохранении степени подогрева. Для наглядности, данные по расчетам представлены в таблице ниже.

Таблица 5.6. Результаты термогазодинамических расчетов различных конструкций лопаток.

Конструкция лопатки	Минимальная температура на поверхности, К	Расход обогревающего воздуха, кг/с
Оригинальная конструкция	294,8	0,003805
Конструкция с единой полостью	292,5	0,003826
Конструкция со сплошными перегородками	277,3	0,000594
Конструкция с не сплошными перегородками	285,8	0,001243

Из рассмотренных конструкций наиболее удачной была принята конструкция с не сплошными перегородками. Несмотря на то, что в результате изменения полости лопатки минимальная температура на поверхности снизилась на 9 градусов, это можно считать допустимым, поскольку в самом холодном месте лопатка все равно имеет положительную температуру (12,8 °С). При этом в такой конструкции расход обогревающего воздуха снизился в 3 раза по сравнению с оригинальной конструкцией.

Сама конструкция полностью реализуема технологией СЛС: лопатка не содержит закрытых полостей, а размеры перегородок не требуют обязательных поддерживающих структур.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено решение значимой задачи в области авиационного двигателестроения, имеющей существенное значение для конструкторско-технологического совершенствования обогреваемых лопаток ВНА с ПОС за счет разработанной методики конструирования с учетом особенностей метода СЛС.

В процессе работы были получены следующие результаты:

1. Для синтезированного порошка CL 20ES получены зависимости влияния угла ориентации изделия в камере построения в процессе СЛС на основные эксплуатационные характеристики: шероховатость поверхности, фреттинг-износ, коррозионный износ, эрозионный износ, теплопроводность.

2. Экспериментальным путем установлено, что теплопроводность синтезированного порошка CL 20ES зависит от угла ориентации изделия в камере построения. Наибольшая теплопроводность достигается при угле в 0 градусов к платформе построения, а наименьшая при 90 градусах.

3. Разработана регрессионная модель, позволяющая прогнозировать основные эксплуатационные характеристики изделий, получаемых методом СЛС в зависимости от угла ориентации изделия в камере построения.

4. Разработана методика проектирования и рекомендации по конструированию обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС. Полученная методика может служить методической рекомендацией для конструкторов и технологов при изготовлении деталей методом СЛС, что позволит сократить число итераций при создании новых изделий, получаемых методом СЛС.

5. Методами математического моделирования получена модифицированная конструкция обогреваемой лопатки ВНА с ПОС, которая обеспечивает снижение расхода воздуха, отбираемого на обогрев лопатки и как следствие повышение характеристик двигательной установки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационный турбовальный двигатель ТВ2-117А и редуктор - ВР-8А. М.: Машиностроение. – 1987. – 256 с.
2. Агапов А.В., Богданов В.Н., Ионов А.В., Селиверстов С.Д., Ионов А.В. Направления совершенствования малоразмерных газотурбинных двигателей//Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание [Электронный ресурс]. - <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/5174/5174.pdf>
3. Агапов А.В., Ионов А.В., Селиверстов С.Д. Анализ влияния шероховатости, получаемой при селективном лазерном сплавлении на течение в каналах ГТД // Тезисы XVII международной конференции «Авиация и космонавтика». – 2018. – С. 108.
4. Агаповичев А.В. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления заготовок моноколес ГТД из титановых сплавов селективным лазерным сплавлением: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Смелов Виталий Геннадьевич; Самарский университет. – Самара, 2020. – 212 с.
5. Александрова Н.Д. Коррозия лопаток турбин ГТУ и обзор методов защиты // Молодежный научно-технический вестник, 2015, №2. – С. 6.
6. Багерман А.З, Арсеньев Ю.Н., Леонова И.П., Рахманов В.А. Результаты исследований высокотемпературного окисления и солевой коррозии материалов лопаток газовых турбин в крыловском государственном научном центре за 2009-2017 гг. // Труды Крыловского государственного научного центра, 2018, №3 (385). – С. 97-106.
7. Балякин А. В., Балякин Д. М., Гончаров Е. С. Погрешность формы на этапе моделирования, изготовления и постобработки изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления //Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2020. – №. 8. – С. 38-41.
8. Белов С.В., Волков С.А., Маггерарова Л.А, Ножницкий Ю.А., Харьковский С.В., Щербакова Е.В. Перспективы применения аддитивных технологий в производстве сложных деталей газотурбинных двигателей из металлических материалов // Аддитивные технологии в Российской промышленности. – 2015. – С. 21.

9. Богачев И. А. и др. Исследование микроструктуры и свойств коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni, полученной методом селективного лазерного сплавления //Труды ВИАМ. – 2019. – №. 3 (75). С. 3-13.
10. Богданов А. Д., Калинин Н. П., Кривко А. И. Турбовальный двигатель ТВЗ-117ВМ. Конструкция и техническая эксплуатация //М.: Воздушный транспорт. – 2000.
11. Боровиков Д. А. и др. Анализ результатов математического моделирования осевой малоразмерной турбины в программном комплексе Numesa FineTurbo //Насосы. Турбины. Системы. – 2018. – №. 3. – С. 76-81.
12. Быценко О.А., Стешенко И.Г., Стрижевская Н.О., Ериков К.М. Взаимосвязь пористости и параметров селективного лазерного сплавления в синтезированном материале деталей из нержавеющей стали CL20ES // Сборник статей научно-технической конференции «Климовские чтения – 2020: перспективные направления развития авиадвигателестроения», 2020. – С. 144-155.
13. Галоян А. Г., Мубояджян С. А., Егорова Л. П., Булавинцева Е. Е. Коррозионностойкое покрытие для защиты деталей гтд из высокопрочных конструкционных мартенситостареющих сталей на рабочие температуры до 450°C // Труды ВИАМ, 2014, №6. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-3-3.
14. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства //М.: Техносфера. – 2016.
15. Горлов Д.С., Заклякова О.В. Александров Д.А., Будиновский С.А. Повышение фреттингостойкости интерметаллидного сплава Ti<sub>2</sub>AlNb // Труды ВИАМ, 2021. №2. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-62-70.
16. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартиформ, 2008, 24 с.
17. ГОСТ 9.912-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии. М.: Издательство стандартов, 1993, 19 с.
18. ГОСТ РВ 2840-001-2008. Надежность и безотказность авиационных двигателей. Лопатки газотурбинных двигателей. Методы испытаний на усталость. М.: Стандартиформ, 2009. - III, 23 с.

19. Данилкин С. Ю., Телешев В. А. К вопросу об исследовании вибрационного состояния газотурбинного двигателя в условиях обледенения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королёва (национального исследовательского университета). – 2014. – №. 5-3 (47). – С. 55-59.
20. Ермаков С. Б. Регулирование формы и размеров частиц порошков при плазменном распылении // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2021. – №. 1. – С. 7-15.
21. Жаворонок С. И. и др. Современные проблемы моделирования теплопереноса в технологических процессах селективного лазерного спекания и сплавления // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57. – №. 6. – С. 919-952.
22. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
23. Иванова А. Р. Обледенение двигателей самолетов в ледяных кристаллах: пути решения проблемы // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2018. – №. 2. – С. 95-109.
24. Инновации для двигателестроения [Электронный ресурс]. – <http://viam.ru/news/2073>.
25. Ионов А.В., Раихин К.В., Селиверстов С.Д., Талахов К.Д. Применение цифровых и аддитивных технологий в исследованиях двигателей ЛА // Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности». – 2017. – С. 27.
26. Казанцева Н. В. и др. Анализ структуры и механических свойств сплава Co–Cr–Mo, полученного методом 3D-печати // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120. – №. 12. – С. 1271-1278.
27. Киселев, В.П. Анизотропия теплопроводности аддитивных металлов, полученных методом селективного лазерного сплавления на примере нержавеющей стали CL 20ES / В.П. Киселев, А.Д. Ежов, С.Д. Селиверстов, Л.В. Быков, Е.В. Сотник // Тепловые процессы в технике. – 2021. – Т. 13, №7. – С. 329-335.

28. Крымов В. В., Елисеев Ю. С., Зудин К. И. Производство лопаток газотурбинных двигателей // М.: Машиностроение: Машиностроение-Полет, 2002. – 376 с. – 2002.
29. Кузнецов П.А., Зисман А.А., Петров С.Н., Гончаров И.С. Структура и механические свойства стандартных образцов, изготовленных из порошка аустенитной стали 316L методом селективного лазерного сплавления // Деформация и разрушение. – 2016. – № 4. – С. 9–13.
30. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. Учебник для вкзов, 3-е изд. М., «Металлургия», 1983, 360 с.
31. Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А. Разработка и применение установки для определения фреттинг-износа образцов с твердыми покрытиями // Тезисы докладов XXII Международной Инновационно-ориентированной Конференции Молодых Ученых и Студентов «Актуальные проблемы машиноведения» МИКМУС-2012, М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2012. - С.32.
32. Магеррамова Л. А. и др. Перспективы применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей и прямоточных воздушно-реактивных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18. – №. 3.
33. Мазалов И. С., Евгенов А. Г., Прагер С. М. Перспективы применения жаропрочного структурно стабильного сплава ВЖ159 для аддитивного производства высокотемпературных деталей ГТД // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – №. S1 (43). – С. 3-7.
34. Мазалов, П.Б. Перспективы внедрения аддитивных технологий в производство малоразмерных газотурбинных двигателей и энергетических установок [Электронный ресурс] / П.Б. Мазалов. – <http://itp-forum.ru/upload/iblock/000a1/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%92%D0%98%D0%90%D0%9C.pdf>
35. Марчуков, Е.Ю. Расходные характеристики каналов лопаток газотурбинных двигателей, полученных методом селективного лазерного

сплавления / Е.Ю. Марчуков, С.Д. Селиверстов, А.В. Стародумов, Д.Д. Чирков // Насосы. Турбины. Системы. – 2021. - №1 (38). – С. 27-37.

36. Маслов А.Р. Современные марки твердых сплавов для резания труднообрабатываемых материалов // Вестник МГТУ Станкин. – 2014. – №4 (31). – С. 27-30.

37. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под ред. Б.Н. Арзамасова – 8-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.

38. Мубояджян С.А., Егорова Л.П., Горлов Д.С., Булавинцева Е.Е. Исследование коррозионно-стойкого покрытия для деталей компрессора ГТД из сталей с низкой температурой отпуска // Металлы, 2017, №1. – С. 3-12.

39. Назаров Р. Р. и др. Улучшение порошковых материалов для аддитивного производства в машиностроении // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли. – 2018. – С. 493-497.

40. Низовцев В. Е. и др. Преимущества аддитивных технологий в качестве альтернативы традиционным технологиям // Аддитивные технологии: настоящее и будущее. – 2018. – С. 203-208.

41. Николаев И.А., Селиверстов С.Д., Лесневский Л.Н., Кожевников Г.Д. Исследование влияния направления выращивания образцов из стали 12Х18Н10Т, полученных методом селективного лазерного сплавления (SLM), на фреттинг-износ в условиях полного и частичного проскальзывания // Тезисы XIX Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2020». – 2020. – С. 177-178.

42. Петров В.М., Александров А.С., Алексеева Т.С. Исследование обрабатываемости жаропрочной стали методом контурного фрезерования на станке с ЧПУ портального типа // Металлообработка. – 2021. – №2 (122). – С. 19-25.

43. Петухов А.Н. Механизм фреттинга и фреттинг-усталость высоконагруженных малоподвижных соединений ГТД.-М.: ЦИАМ, 2008. -204 с.

44. Полетаев, В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Полетаев. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.



45. Приходько А. А., Алексеенко С. В. Обледенение аэродинамических поверхностей: условия возникновения и методики расчета //Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №. 6. – С. 37–47.
46. Проведены летные испытания первого российского малоразмерного газотурбинного двигателя мГТД-20 [Электронный ресурс]. – <https://viam.ru/news/7174>
47. Производство лопаток газотурбинных двигателей / Под ред. В.В. Крымова. М.: Машинстроение / Машиностроение-Полет, 2002, 367 с.
48. Селиверстов С.Д., Гевара Гарсия А., Талахов К.Д. Применение технологии аддитивного производства для изготовления лопаток ГТД с внутренними полостями // Тезисы XLV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». – 2018. – Т. 1. – С. 138-139.
49. Селиверстов С.Д., Ионов А.В., Боровик И.А., Мацаев А.А. Лазерная наплавка тепловых аккумуляторов для ёмкостного охлаждения малоразмерных ЖРД // Тезисы XVIII Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2019». – 2019. – С. 68.
50. Селиверстов С.Д., Николаев И.А., Королева А.Г. Трибологические исследования деталей двигателей летательных аппаратов, полученных методом селективного лазерного спекания // Тезисы XLVI Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». – 2020. – С. 179-180.
51. Селиверстов, С.Д. Трибологические исследования деталей авиационных двигателей, полученных методом селективного лазерного сплавления / С.Д. Селиверстов, И.А. Николаев, О.А. Быценко // Вестник УГАТУ. – 2021. – №3 (93). – С. 64-71.
52. Селянская Е.Л., Касьянов С.В., Мелузова О.А. Возможность применения аддитивных технологий в центробежных компрессорах // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2015. – Т. 1. – С. 359-363.
53. Скуратов Д. Л., Балякин А. В., Жученко Е. И. Химическое полирование термообработанных деталей из титанового сплава ВТ6, изготовленных методом селективного лазерного сплавления //Вестник Рыбинской государственной

авиационной технологической академии им. ПА Соловьева. – 2019. – №. 2. – С. 31-39.

54. Словигов С. В. Совершенствование противообледенительной системы воздухозаборного очистительного устройства газотурбинной установки типа ПС-90, эксплуатируемой в наземных условиях : Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Сальников Алексей Федорович; Пермский государственный технический университет. – Пермь. – 2008. – 192 с.

55. Смыслов А.М., Селиванов К.С. Разработка и исследование технологических методов повышения фреттинг-стойкости рабочих лопаток из титановых сплавов // Вестник УГАТУ, 2007, Т. 9, №1 (19). – С. 77—83.

56. Солодская А. А. Потенциал аддитивных технологий в контексте современного производства //Современные научные исследования и разработки. – 2018. – №. 3. – С. 512-513.

57. Сулима, А.М. Основы технологии производства газотурбинных двигателей: учебник для студентов авиац. спец. вузов / А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1996. – 480 с.

58. Сурков О. С., Кондратьев А.И., Алексеев В.П., Хаймович А.И. Исследование обрабатываемости жаропрочной стали 10X11H23T3MP-BД для деталей газотурбинных двигателей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королёва (национального исследовательского университета). – 2014. – №. 5-3 (47). – С. 106-112.

59. Сухов Д. И. и др. Особенности формирования структуры жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ21 в процессе селективного лазерного сплавления, вакуумной термической обработки и горячего изостатического прессования //Металлург. – 2019. – №. 4. – С. 83-93.

60. Федоров М. М., Федосеев Д. В., Карелин Д. В. Особенности применения аддитивных технологий в авиадвигателестроении //Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. ПА Соловьева. – 2016. – №. 4. – С. 42-44.

61. Физическое металловедение. Под редакцией Р. Кана, выпуск 2. - М.: Мир, 1968 - 490 с.

62. ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Withdrawn 2015). ASTM International. 2012 [Электронный ресурс]. – [www.astm.org](http://www.astm.org)
63. ASTM G76-13 Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. ASTM International. 2018 [Электронный ресурс]. – [www.astm.org](http://www.astm.org)
64. Azakli, Z., & Gümrük, R. (2021). Particle erosion performance of additive manufactured 316L stainless steel materials. *Tribology Letters*, 69(4) doi:10.1007/s11249-021-01503-0
65. Beyhaghi, M., Rouhani, M., Hobley, J., & Jeng, Y. -. (2021). In-situ and ex-situ comparison of oxidation of inconel 718 manufactured by selective laser melting and conventional methods up to 650 °C. *Applied Surface Science*, 569 doi:10.1016/j.apsusc.2021.151037
66. Burns M. *Automated Fabrication: improving productivity in manufacturing* / M. Burns. – New Jersey: PTR Prentice-Hall, 1993. – 369 p.
67. Carlton H.D., Haboub A., Gallegos G.F., Parkinson D.Y., MacDowell A.A. Damage evolution and failure mechanisms in additively manufactured stainless steel // *Mater. Sci. Eng. A*. 2016. V. 651. P. 406–414.
68. Chen L. et al. The research status and development trend of additive manufacturing technology // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – T. 89. – №. 9-12. – С. 3651-3660.
69. Chen, J. W., Zhang, C. H., Zhou, F. Q., Zhang, S., Chen, H. T., & Wang, Q. (2021). Microstructural, electrochemical and wear-corrosion characterization of TC4-5Cu alloy fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 874 doi:10.1016/j.jallcom.2021.159953
70. Deev A.A., Kuznetcov P.A., Petrov S.N. Anisotropy of mechanical properties and its correlation with the structure of the stainless steel 316L produced by the SLM method // *Physics Procedia*. 2016. V. 83. P. 789–796.
71. Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process: Research report / VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. - <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03160-16.pdf>

72. Ding, H., Tang, Q., Zhu, Y., Zhang, C., & Yang, H. (2021). Cavitation erosion resistance of 316L stainless steel fabricated using selective laser melting. *Friction*, 9(6), 1580-1598. doi:10.1007/s40544-020-0443-7
73. Feng, J., Zhang, P., Jia, Z., Yu, Z., Fang, C., Yan, H., . . . Tian, Y. (2021). Microstructures and mechanical properties of reduced activation ferritic/martensitic steel fabricated by laser melting deposition. *Fusion Engineering and Design*, 173 doi:10.1016/j.fusengdes.2021.112865
74. Gradl, P. Additive Manufacturing of Liquid Rocket Engine Combustion Devices: A Summary of Process Developments and Hot-Fire Testing Results / P. Gradl, S. E. Greene, C. Protz, B. Bullard, J. Buzzell, C. Garcia, J. Wood, K. Cooper, J. Hulka, R. Osborne // 54th AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference 2018 – 2018. DOI: 10.2514/6.2018-4625.
75. Hetnarski R. B. et al. (ed.). *Encyclopedia of thermal stresses.* – Dordrecht : Springer Netherlands, 2014. DOI <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7>
76. How to Support. A short guide to DMLS support generation [Электронный ресурс] : презентация / EOS. – 2012. – 20 слайдов.
77. How to support. A short guide to DMLS support generation.
78. Huang, S., Sun, B., & Guo, S. (2021). Microstructure and property evaluation of TA15 titanium alloy fabricated by selective laser melting after heat treatment. *Optics and Laser Technology*, 144 doi:10.1016/j.optlastec.2021.107422
79. Ibraheem A. K., Derby B., Withers P. J. Thermal and residual stress modelling of the selective laser sintering process //MRS Online Proceedings Library (OPL). – 2002. – T. 758.
80. Jin, P., Tang, Q., Song, J., Feng, Q., Guo, F., Fan, X., . . . Wang, F. (2021). Numerical investigation of the mechanism of interfacial dynamics of the melt pool and defects during laser powder bed fusion. *Optics and Laser Technology*, 143 doi:10.1016/j.optlastec.2021.107289
81. Karthik, G. M., Kim, E. S., Sathiyamoorthi, P., Zargaran, A., Jeong, S. G., Xiong, R., . . . Kim, H. S. (2021). Delayed deformation-induced martensite transformation and enhanced cryogenic tensile properties in laser additive manufactured 316L austenitic stainless steel. *Additive Manufacturing*, 47 doi:10.1016/j.addma.2021.102314

82. Kilina, P. N., Sirotenko, L. D., Muratov, K. R., & Ablyaz, T. R. (2021). Influence of selective laser melting on the microporosity of cellular materials based on Ti6Al4V titanium alloy. *Russian Engineering Research*, 41(9), 871-873. doi:10.3103/S1068798X21090148
83. Kumar J. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry / J. Kumar, C.G. K. Nair // *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, pp. 39-54, 2017. DOI: 10.1007/978-981-10-0812-2\_4.
84. Li, Y., Liu, S., Xue, T., Wei, Y., Yang, X., & Wang, Y. (2021). Comparison of wear behavior of GCr15 bearing steel prepared by selective laser melting (SLM) and electron beam melting (EBM). *Materials Letters*, 305 doi:10.1016/j.matlet.2021.130726
85. Luo, H., Li, X. -, Pan, C. -, He, P. -, & Zeng, K. -. (2021). Microstructural evolution and mechanical properties of alloy 718 fabricated by selective laser melting following different post-treatments. *Rare Metals*, 40(11), 3222-3234. doi:10.1007/s12598-020-01688-8
86. Ma, W., Ning, J., Zhang, L. -, & Na, S. -. (2021). Regulation of microstructures and properties of molybdenum silicon boron alloy subjected to selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 69, 593-601. doi:10.1016/j.jmapro.2021.08.002
87. Phua, A., Doblin, C., Owen, P., Davies, C. H. J., & Delaney, G. W. (2021). The effect of recoater geometry and speed on granular convection and size segregation in powder bed fusion. *Powder Technology*, 394, 632-644. doi:10.1016/j.powtec.2021.08.058
88. Qian M. Additive Manufacturing—The 2nd Asia–Pacific International Conference on Additive Manufacturing (APICAM 2019) // *JOM*. – 2020. – Т. 72. – №. 3. – С. 997-998.
89. Ravichander, B. B., Rahimzadeh, A., Farhang, B., Moghaddam, N. S., Amerinatanzi, A., & Mehrpouya, M. (2021). A prediction model for additive manufacturing of inconel 718 superalloy. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(17) doi:10.3390/app11178010
90. Rolls-Royce breaks additive record with printed Trent-XWB bearing [Электронный ресурс]. – <https://www.theengineer.co.uk/rolls-royce-breaks-additive-record-with-printed-trent-xwb-bearing/>

91. Sharma R. S., Kumar A. Numerical Analysis of Thermal Stresses in Selective Laser Melting //Advances in Additive Manufacturing and Joining. – Springer, Singapore, 2020. – C. 243-251.
92. Starikov, P. Mathematical modeling of heat transfer processes in a wall with a regular pseudo-pore structure / P. Starikov, A. Ionov, S. Seliverstov, I. Borovik, A Matushkin // Lecture Notes in Electrical Engineering, V. 549, pp. 155-168. 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-6061-9\_10.
93. Sun, Z., Xu, Y., Chen, F., Shen, L., Tang, X., Sun, L., . . . Huang, P. (2021). Effects of ion irradiation on microstructure of 316L stainless steel strengthened by disperse nano TiC through selective laser melting. Materials Characterization, 180 doi:10.1016/j.matchar.2021.111420
94. UAV ACTUAL: Additive Manufacturing Trends In Aerospace [Электронный ресурс]. – <http://uavactual.blogspot.com/2017/11/additive-manufacturing-trends-in.html?m=1>
95. Walczak, M., & Szala, M. (2021). Effect of shot peening on the surface properties, corrosion and wear performance of 17-4PH steel produced by DMLS additive manufacturing. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 21(4) doi:10.1007/s43452-021-00306-3
96. Wohlers Report 2019: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry / Wohlers associates. 2019. P. 369.
97. Yadroitsev, I. Single Track Formation in Selective Laser Melting of Metal Powders/ I. Yadroitsev, A. Gusarov, I. Yadroitsava, I. Smurov // Journal of Materials Processing Technology, 2010, Vol. 210(12). – P. 1624-1631.
98. Yang, D., Yin, Y., Kan, X., Zhao, Y., Zhao, Z., & Sun, J. (2021). The mechanism of substructure formation and grain growth 316L stainless steel by selective laser melting. Materials Research Express, 8(9) doi:10.1088/2053-1591/ac21ea
99. Yang, H., Zhang, Y., Wang, J., Liu, Z., Liu, C., & Ji, S. (2021). Additive manufacturing of a high strength al-5Mg2Si-2Mg alloy: Microstructure and mechanical properties. Journal of Materials Science and Technology, 91, 215-223. doi:10.1016/j.jmst.2021.02.048

100. Yang, X., Zhang, B., Bai, Q., & Xie, G. (2021). Correlation of microstructure and mechanical properties of Ti<sub>2</sub>AlNb manufactured by SLM and heat treatment. *Intermetallics*, 139 doi:10.1016/j.intermet.2021.107367
101. Yeganeh, M., Shoushtari, M. T., & Jalali, P. (2021). Evaluation of the corrosion performance of selective laser melted 17-4 precipitation hardening stainless steel in Ringer's solution. *Journal of Laser Applications*, 33(4) doi:10.2351/7.0000445
102. Zhong Y., Liu L., Wikman S., Cui D., Shen Z. Intragranular cellular segregation network structure strengthening 316L stainless steel prepared by selective laser melting // *J. Nucl. Mater.* 2016. V. 470. P. 170–178.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Протокол механических испытаний образцов, изготовленных из порошка

CL 20ES методом СЛС

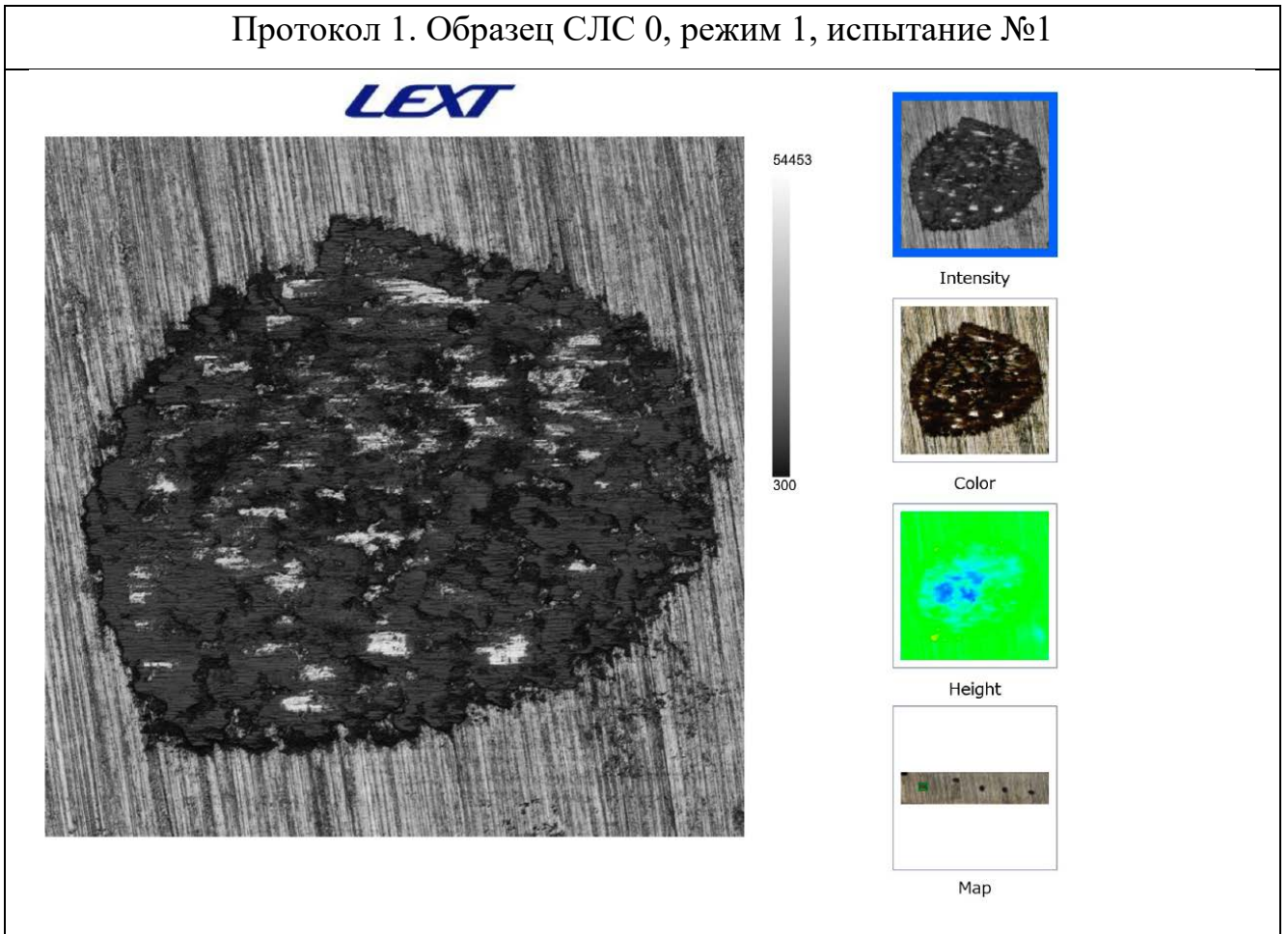
Наименование детали	Материал	Т-ре испытаний, °С	Предел прочности,	Предел текучести, кг/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кгс/см <sup>2</sup>
Образец X	CL 20ES DIN 1.4404	20	65,1	53,7	38,2	70,7	18,8
Образец Y	CL 20ES DIN 1.4404	20	62,7	51,7	35,8	66,6	18,8



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

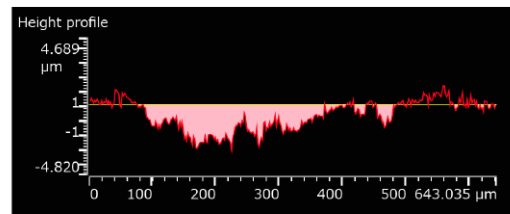
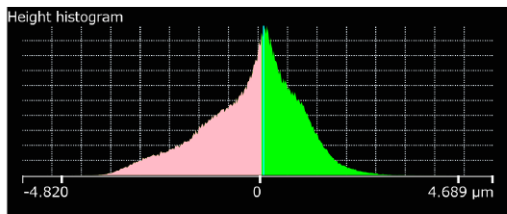
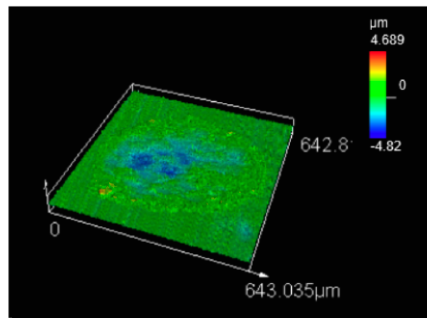
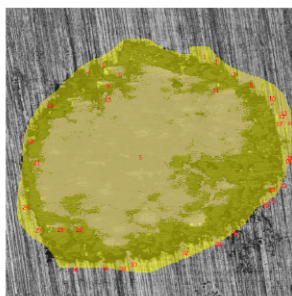
### Результаты измерений объемного износа после трибологических испытаний образцов

Протокол 1. Образец СЛС 0, режим 1, испытание №1



Report Title

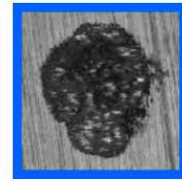
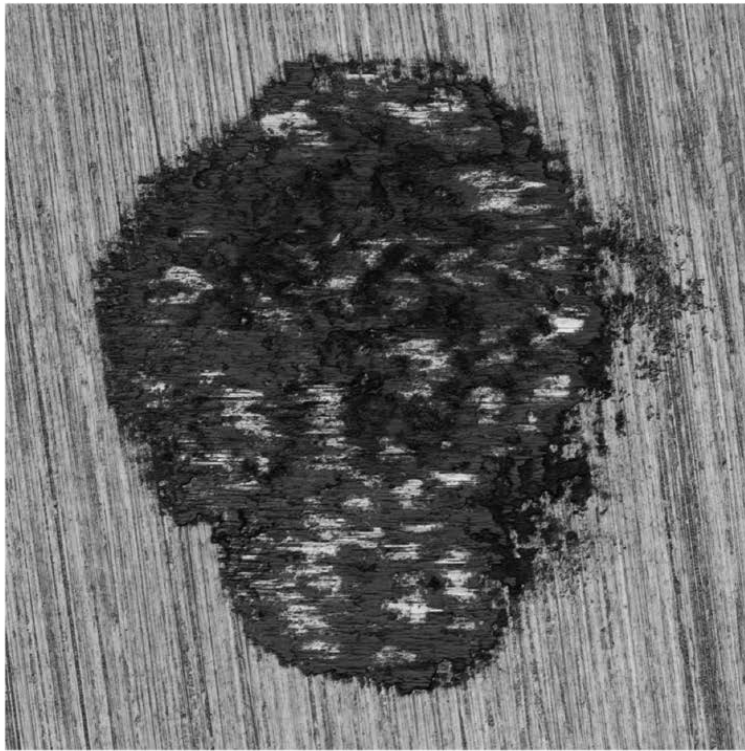
**LEXT**



[Analysis result]			
Volume	118718.287	[ $\mu\text{m}^3$ ]	
Surface Area	121649.828	[ $\mu\text{m}^2$ ]	
Surface area including threshold surface	242355.722	[ $\mu\text{m}^2$ ]	
Area	120705.893	[ $\mu\text{m}^2$ ]	

Протокол 2. Образец СЛС 0, режим 1, испытание №2

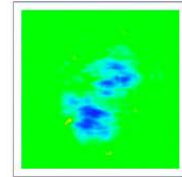
LEXT



Intensity



Color



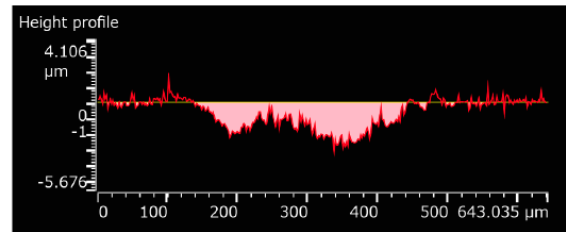
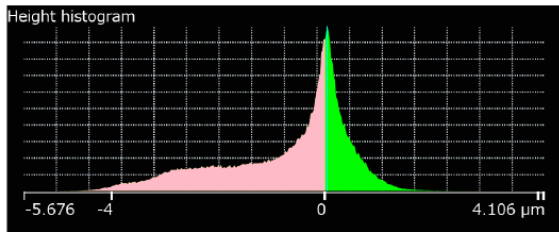
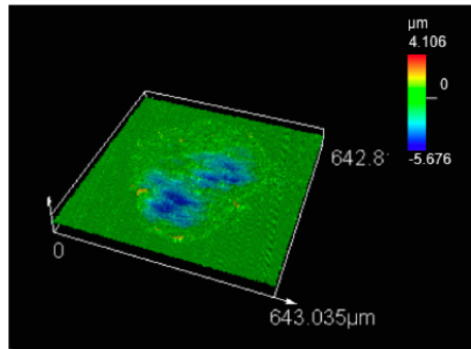
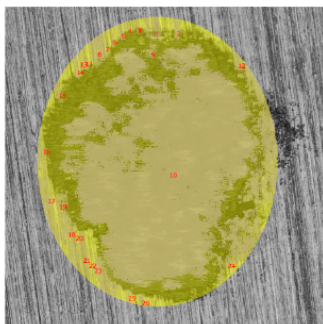
Height



Map

Report Title

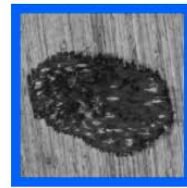
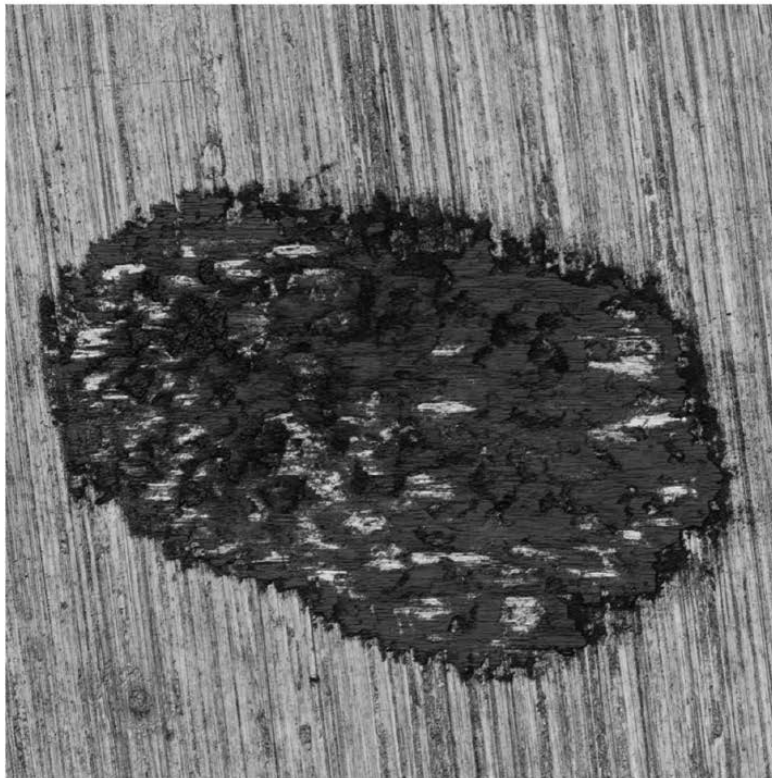
LEXT



[Analysis result]			
Volume	187686.451	[μm <sup>3</sup> ]	
Surface Area	140535.111	[μm <sup>2</sup> ]	
Surface area including threshold surface	281521.130	[μm <sup>2</sup> ]	
Area	140986.019	[μm <sup>2</sup> ]	

Протокол 3. Образец СЛС 0, режим 1, испытание №3

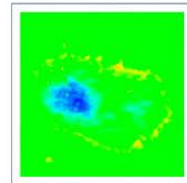
LEXT



Intensity



Color



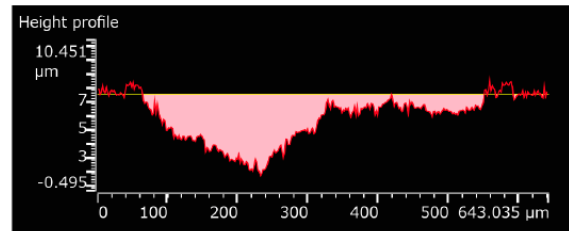
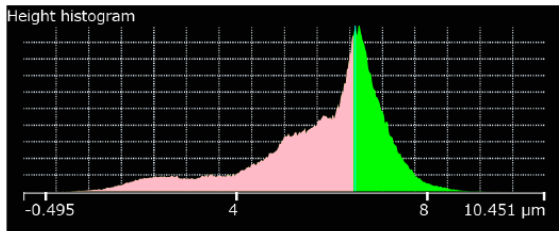
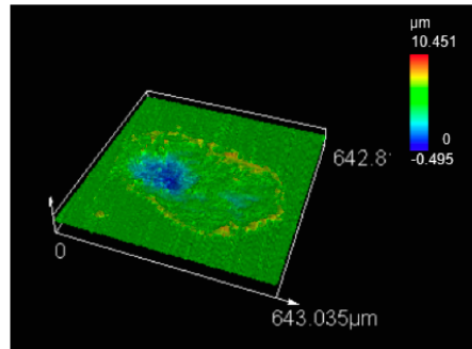
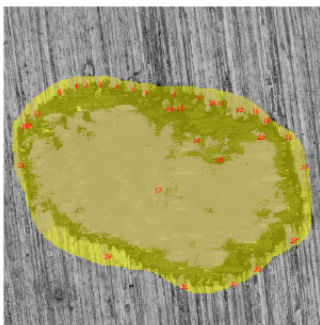
Height



Map

Report Title

LEXT

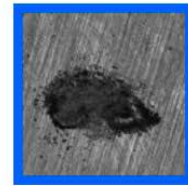


[Analysis result]			
Volume	180093.169		[ $\mu\text{m}^3$ ]
Surface Area	120781.165		[ $\mu\text{m}^2$ ]
Surface area including threshold surface	237452.399		[ $\mu\text{m}^2$ ]
Area	116671.234		[ $\mu\text{m}^2$ ]



Протокол 4. Образец СЛС 0, режим 2, испытание №1

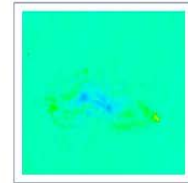
LEXT



Intensity



Color



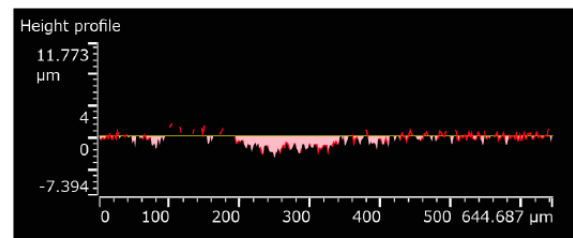
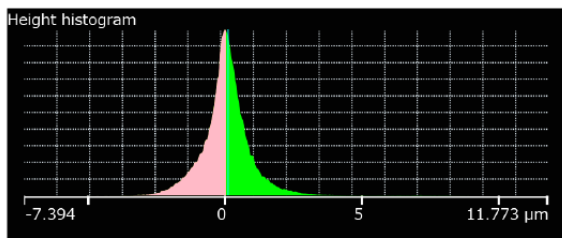
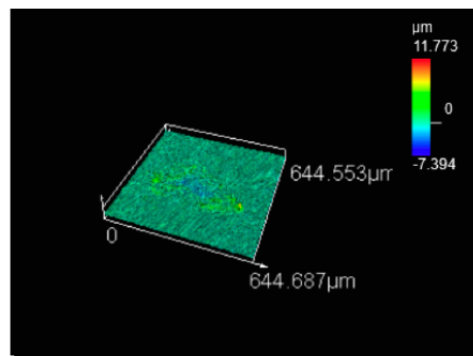
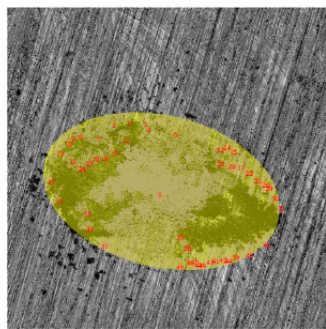
Height



Map

Report Title

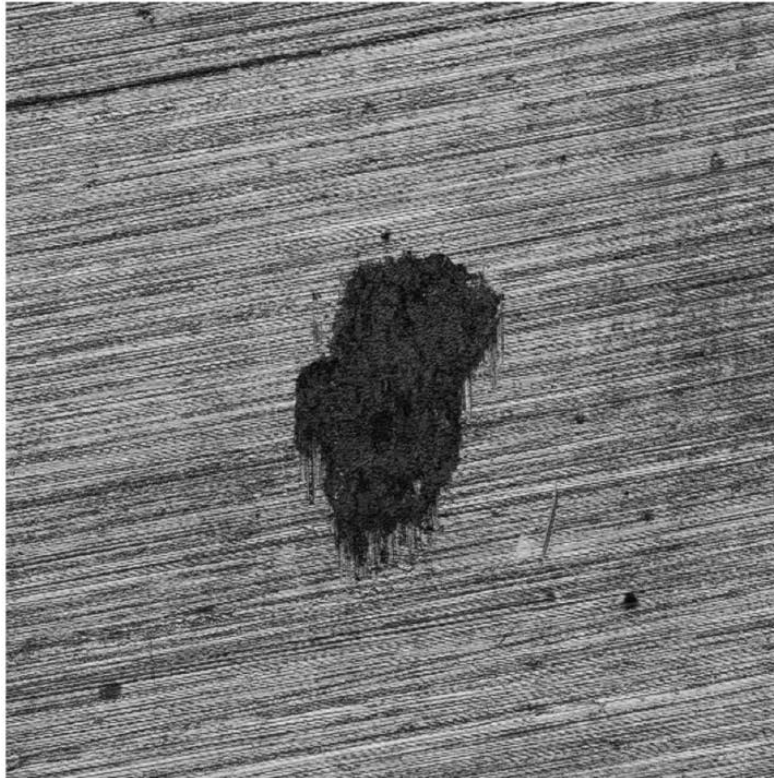
LEXT



[Analysis result]			
Volume	27696.870	[μm <sup>3</sup> ]	
Surface Area	33380.837	[μm <sup>2</sup> ]	
Surface area including threshold surface	74210.493	[μm <sup>2</sup> ]	
Area	40829.656	[μm <sup>2</sup> ]	

Протокол 5. Образец СЛС 0, режим 2, испытание №2

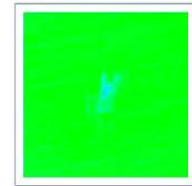
**LEXT**



Intensity



Color



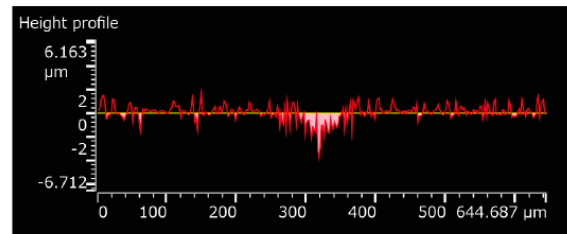
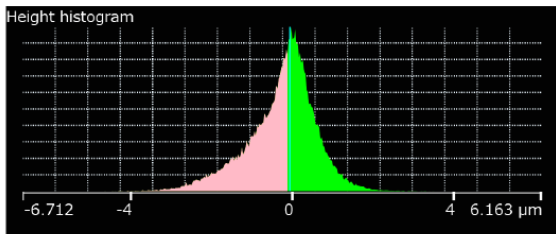
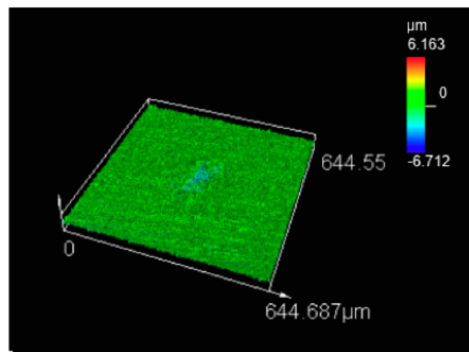
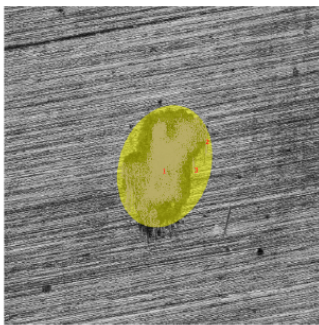
Height



Map

Report Title

**LEXT**

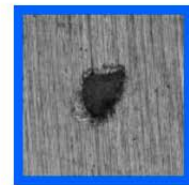


[Analysis result]			
Volume	13938.083	[μm <sup>3</sup> ]	
Surface Area	16554.568	[μm <sup>2</sup> ]	
Surface area including threshold surface	31436.265	[μm <sup>2</sup> ]	
Area	14881.696	[μm <sup>2</sup> ]	



Протокол 6. Образец СЛС 0, режим 2, испытание №3

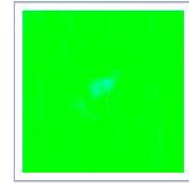
LEXT



Intensity



Color



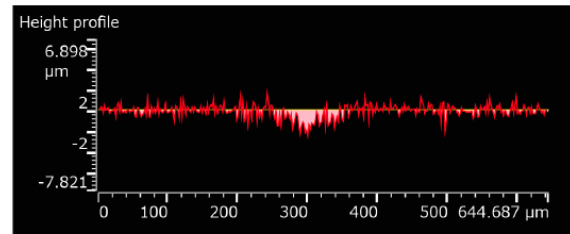
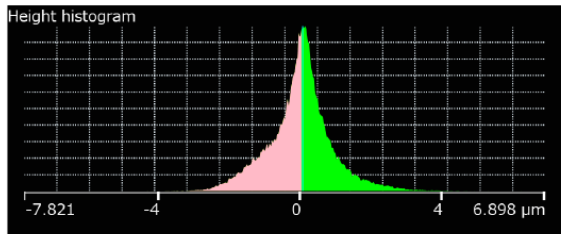
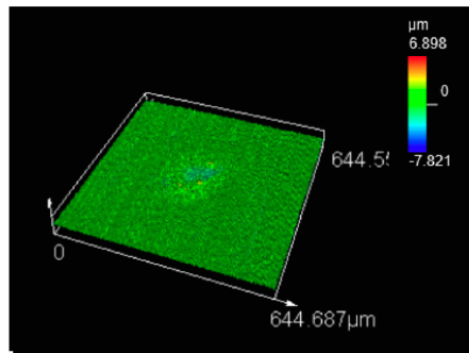
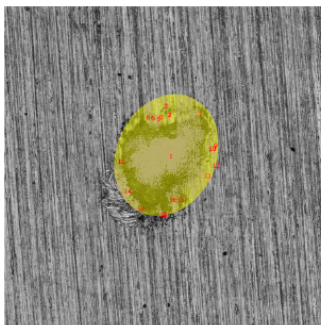
Height



Map

Report Title

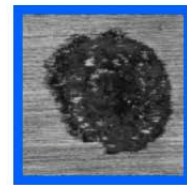
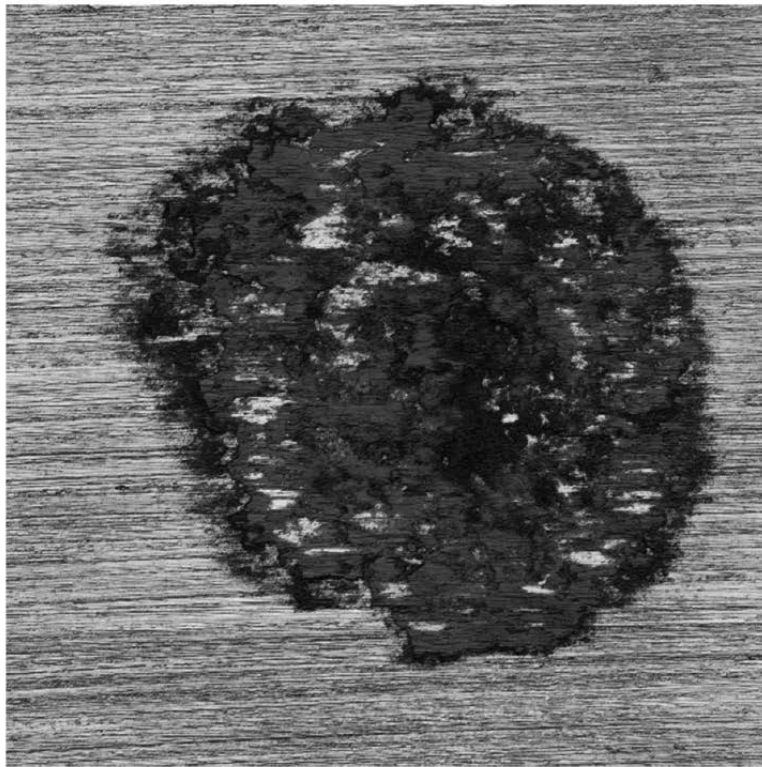
LEXT



[Analysis result]			
Volume	13001.266	[µm <sup>3</sup> ]	
Surface Area	16802.328	[µm <sup>2</sup> ]	
Surface area including threshold surface	33126.502	[µm <sup>2</sup> ]	
Area	16324.174	[µm <sup>2</sup> ]	

Протокол 7. Образец СЛС 90, режим 1, испытание №1

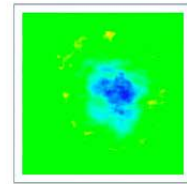
**LEXT**



Intensity



Color



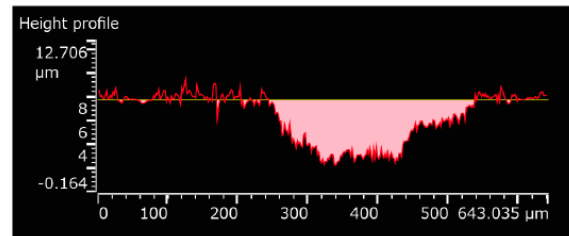
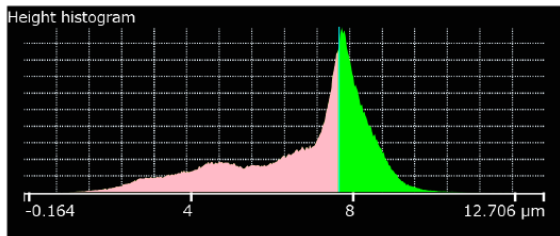
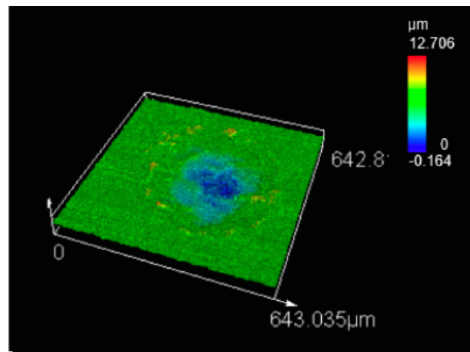
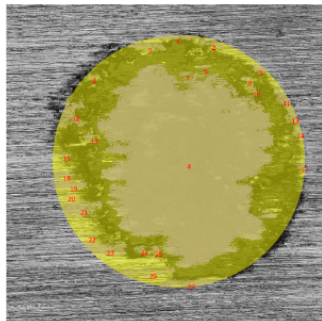
Height



Map

Report Title

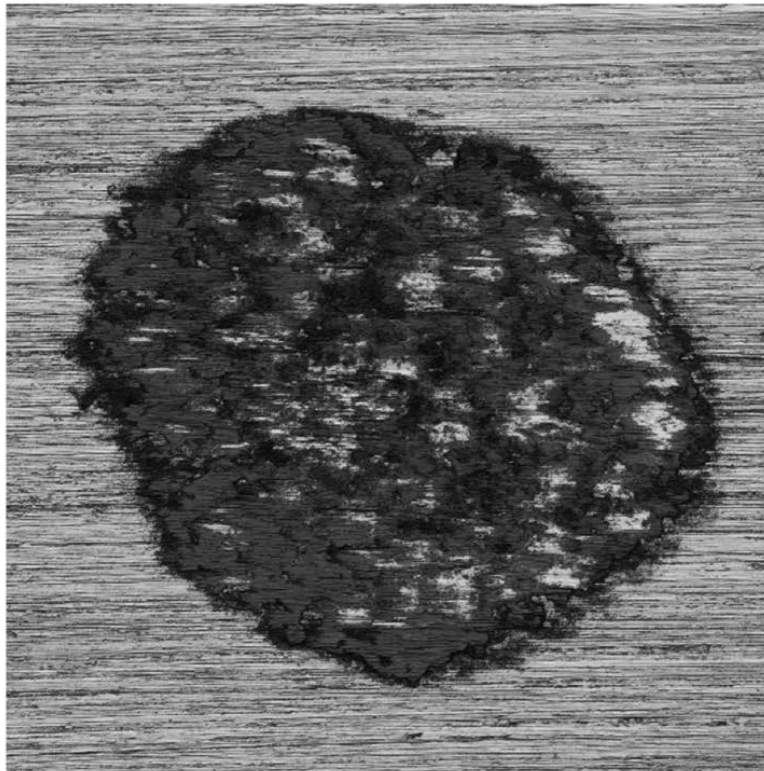
**LEXT**



[Analysis result]			
Volume	224211.310	[μm <sup>3</sup> ]	
Surface Area	114683.780	[μm <sup>2</sup> ]	
Surface area including threshold surface	224618.099	[μm <sup>2</sup> ]	
Area	109934.319	[μm <sup>2</sup> ]	

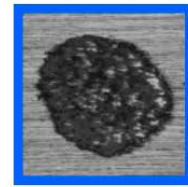
Протокол 8. Образец СЛС 90, режим 1, испытание №2

LEXT

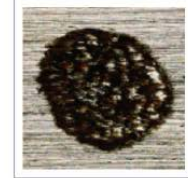


54216

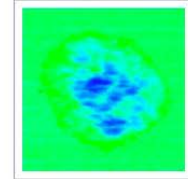
337



Intensity



Color



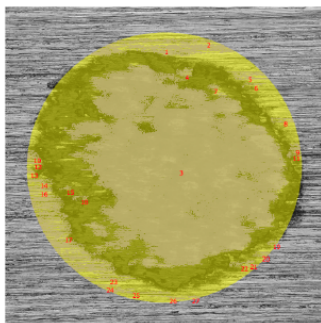
Height



Map

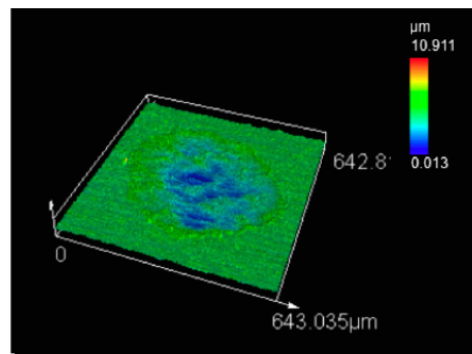
Report Title

LEXT



54216

337



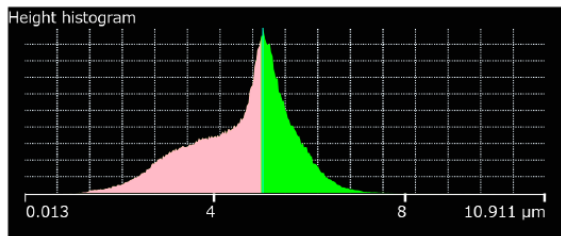
$\mu\text{m}$

10.911

642.8

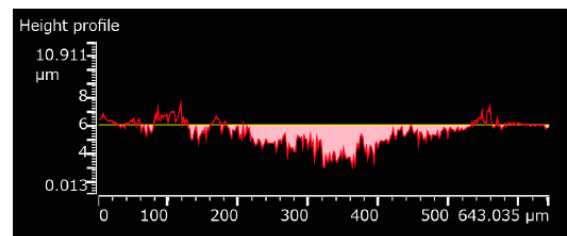
0.013

643.035 $\mu\text{m}$



Height histogram

0.013 4 8 10.911  $\mu\text{m}$



Height profile

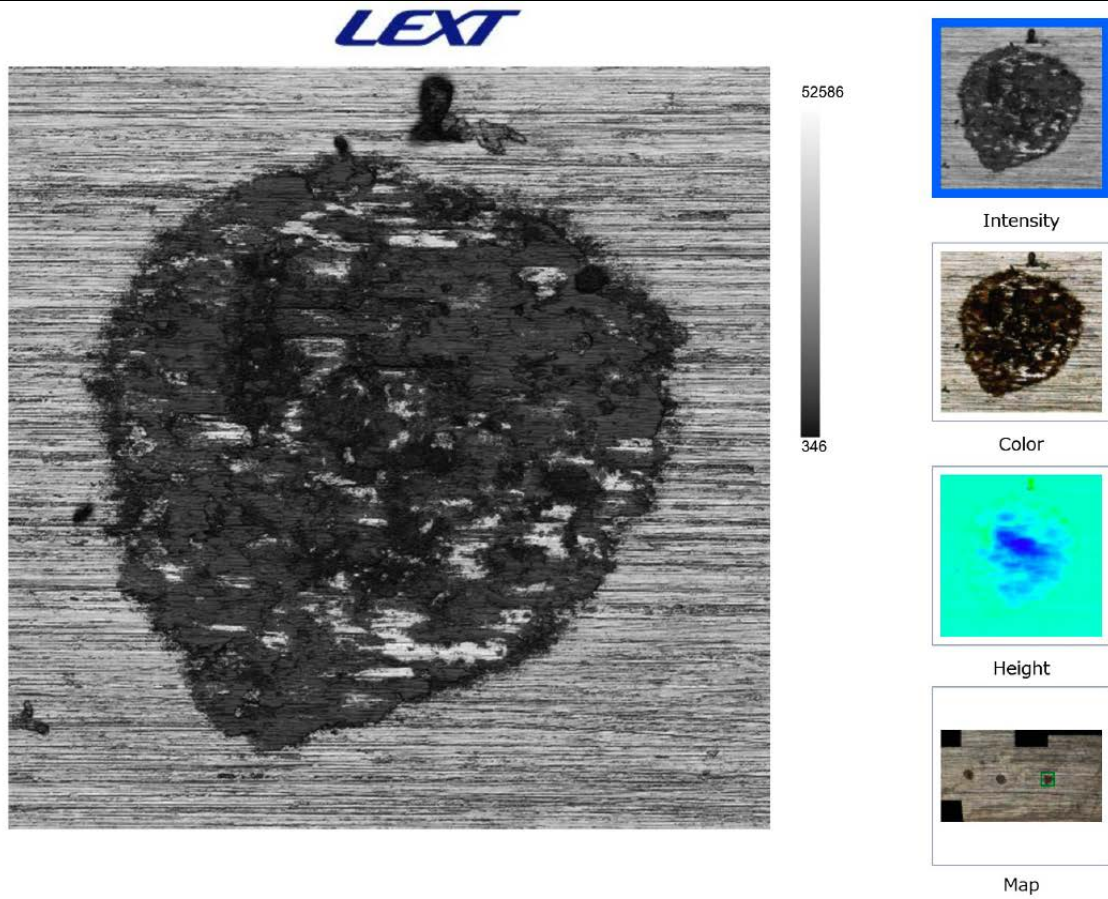
10.911  $\mu\text{m}$   
8  
6  
4  
0.013  
0 100 200 300 400 500 643.035  $\mu\text{m}$

[Analysis result]

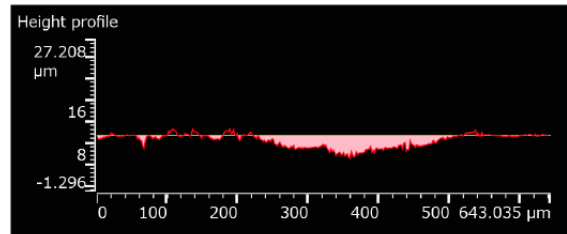
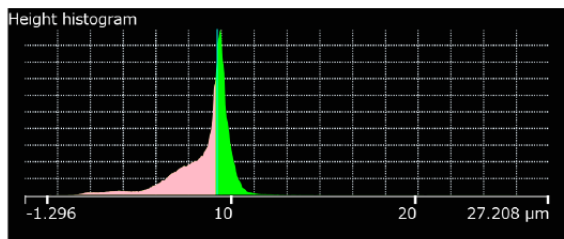
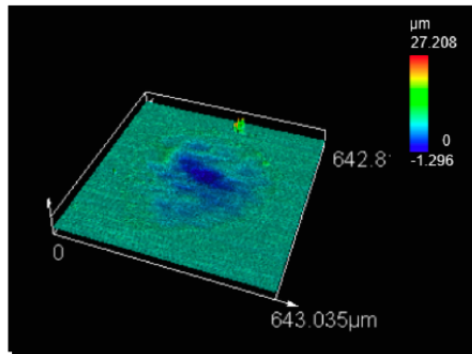
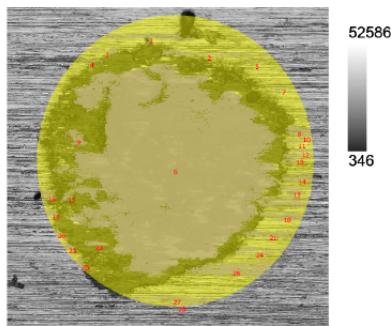
Volume	148828.607	$[\mu\text{m}^3]$	
Surface Area	133447.026	$[\mu\text{m}^2]$	
Surface area including threshold surface			264751.834 $[\mu\text{m}^2]$
Area	131304.808	$[\mu\text{m}^2]$	



Протокол 9. Образец СЛС 90, режим 1, испытание №3



Report Title



[Analysis result]			
Volume	224634.702	$\mu\text{m}^3$	
Surface Area	134621.539	$\mu\text{m}^2$	
Surface area including threshold surface	264889.201	$\mu\text{m}^2$	
Area	130267.662	$\mu\text{m}^2$	

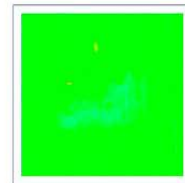
**LEXT**



Intensity



Color



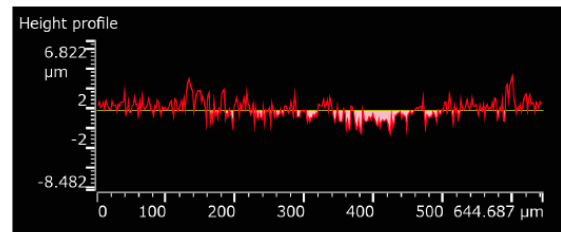
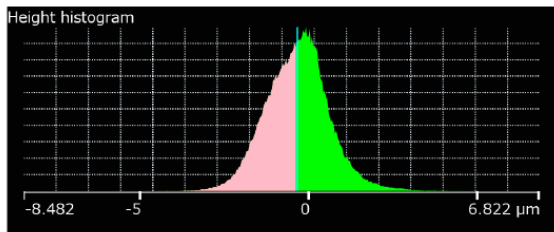
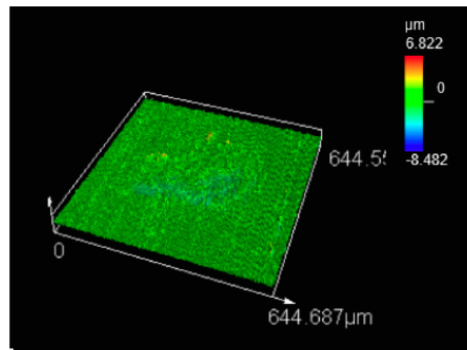
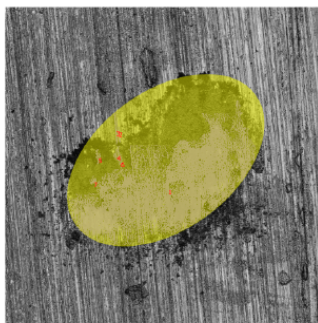
Height



Map

Report Title

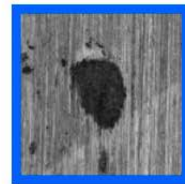
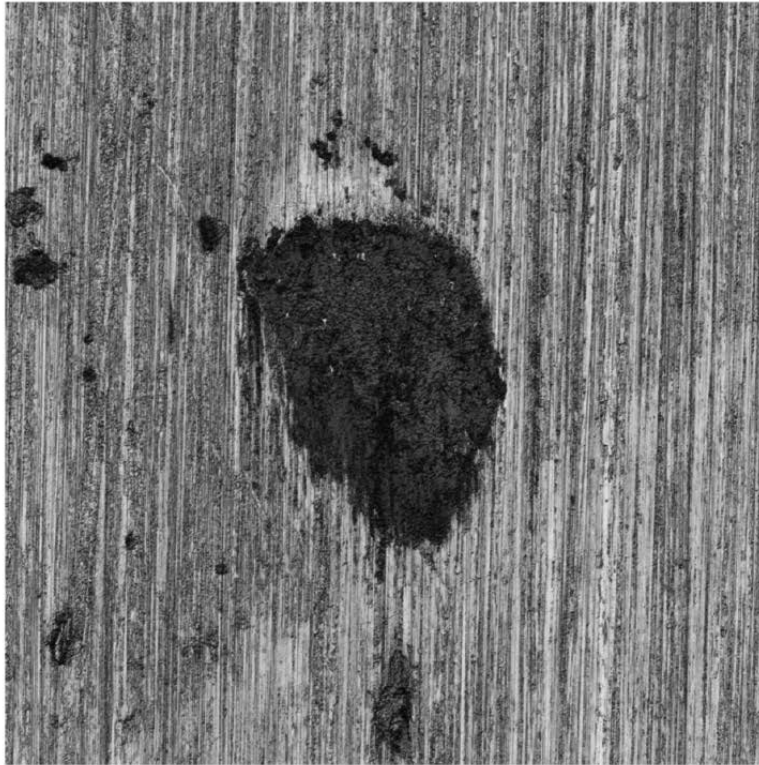
**LEXT**



[Analysis result]			
Volume	32494.923	[μm <sup>3</sup> ]	
Surface Area	44397.771	[μm <sup>2</sup> ]	
Surface area including threshold surface	84329.444	[μm <sup>2</sup> ]	
Area	39931.674	[μm <sup>2</sup> ]	



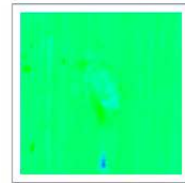
**LEXT**



Intensity



Color



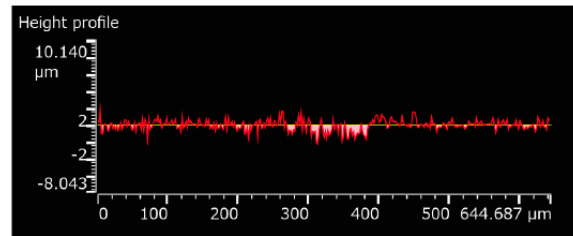
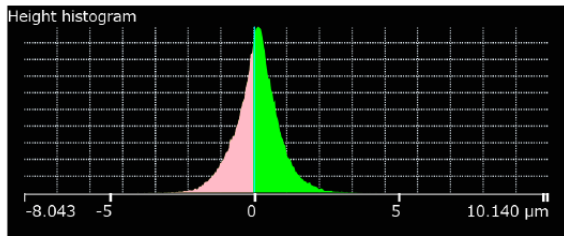
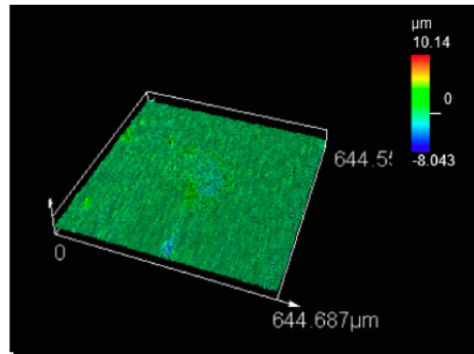
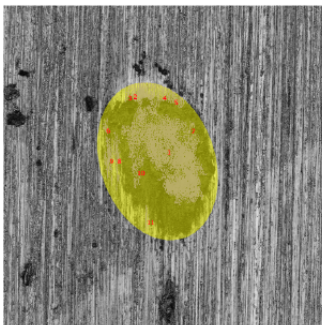
Height



Map

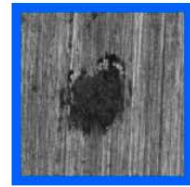
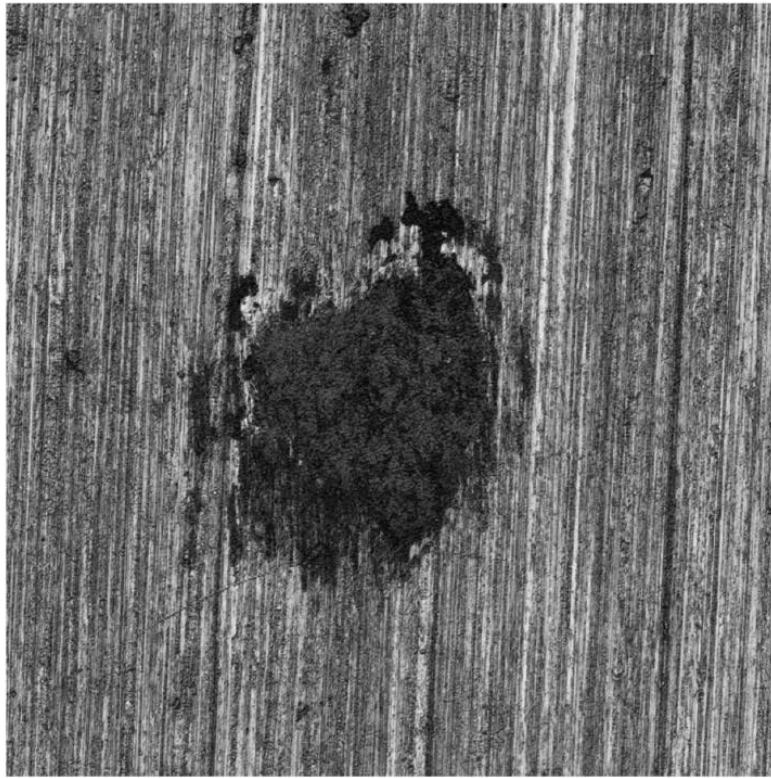
Report Title

**LEXT**



[Analysis result]			
Volume	12142.710	[μm <sup>3</sup> ]	
Surface Area	18039.822	[μm <sup>2</sup> ]	
Surface area including threshold surface	35989.162	[μm <sup>2</sup> ]	
Area	17949.340	[μm <sup>2</sup> ]	

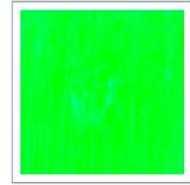
**LEXT**



Intensity



Color



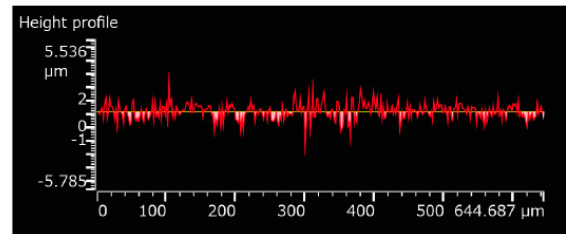
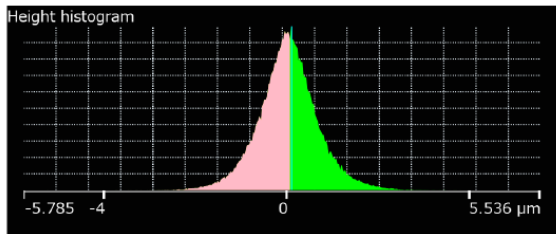
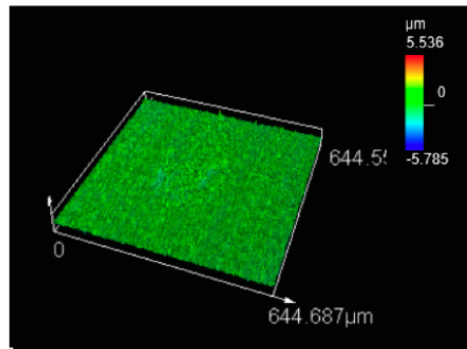
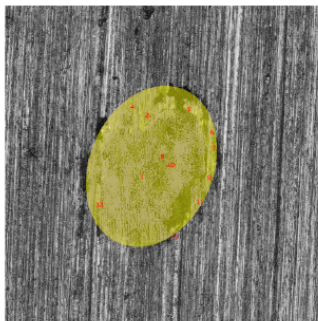
Height



Map

Report Title

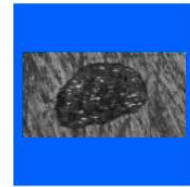
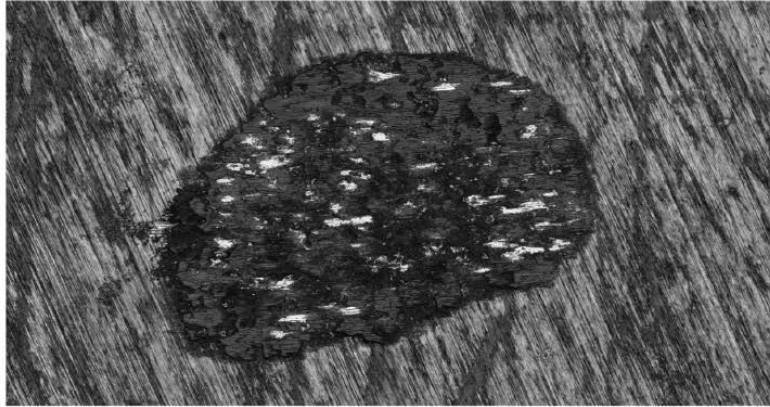
**LEXT**



[Analysis result]			
Volume	17368.766	[ $\mu\text{m}^3$ ]	
Surface Area	28983.173	[ $\mu\text{m}^2$ ]	
Surface area including threshold surface Area	60572.251	[ $\mu\text{m}^2$ ]	
Area	31589.079	[ $\mu\text{m}^2$ ]	

Протокол 13. Образец сравнения, режим 1, испытание №1

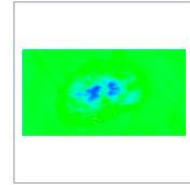
**LEXT**



Intensity



Color



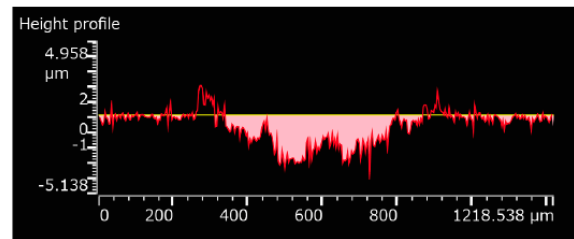
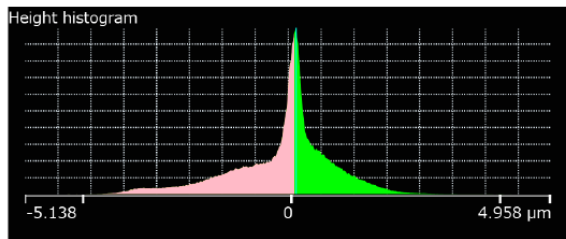
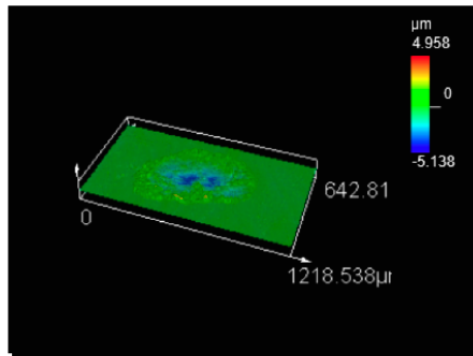
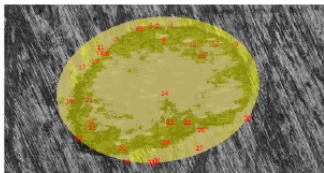
Height



Map

Report Title

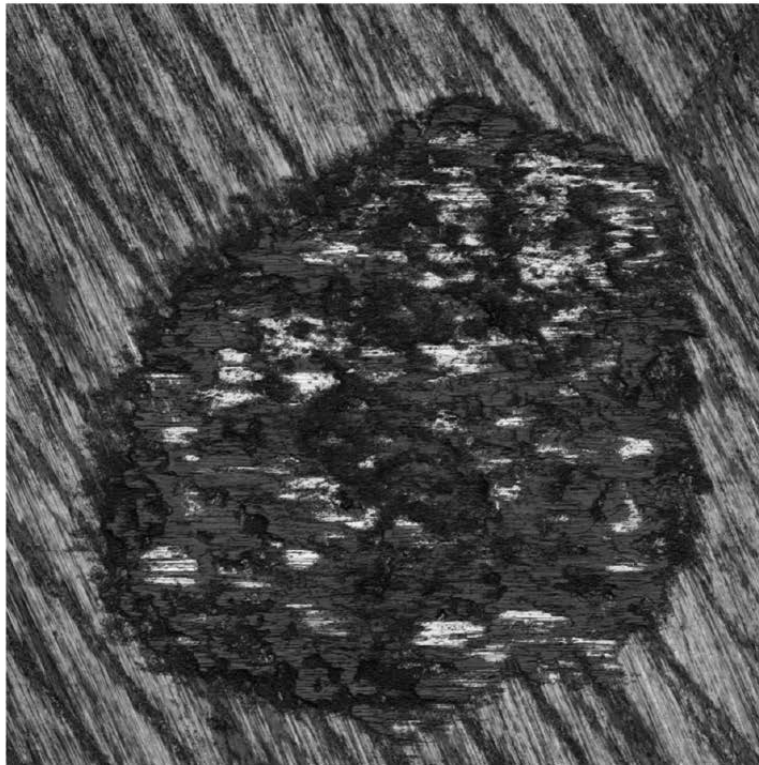
**LEXT**



[Analysis result]			
Volume	154386.627	[μm <sup>3</sup> ]	
Surface Area	173215.736	[μm <sup>2</sup> ]	
Surface area including threshold surface Area	351067.951	[μm <sup>2</sup> ]	
Area	177852.215	[μm <sup>2</sup> ]	



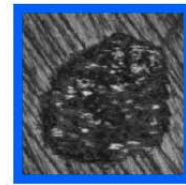
**LEXT**



65535



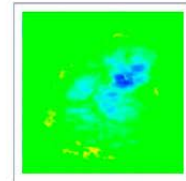
457



Intensity



Color



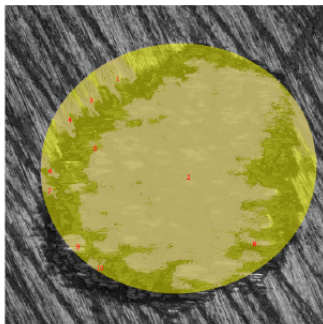
Height



Map

Report Title

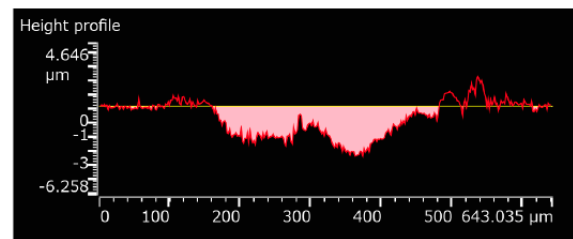
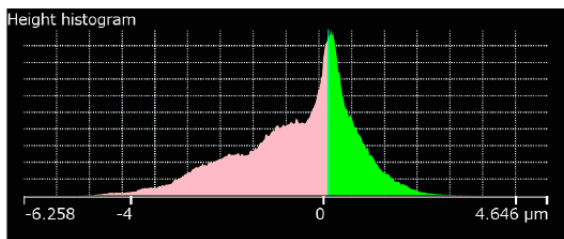
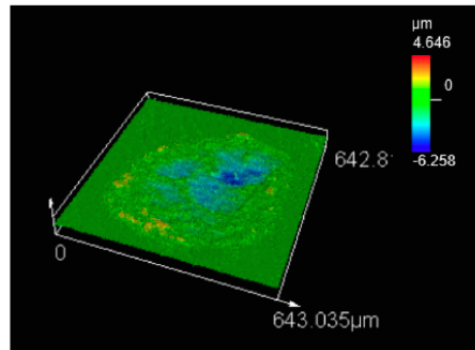
**LEXT**



65535

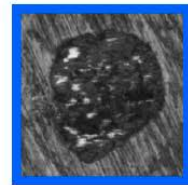
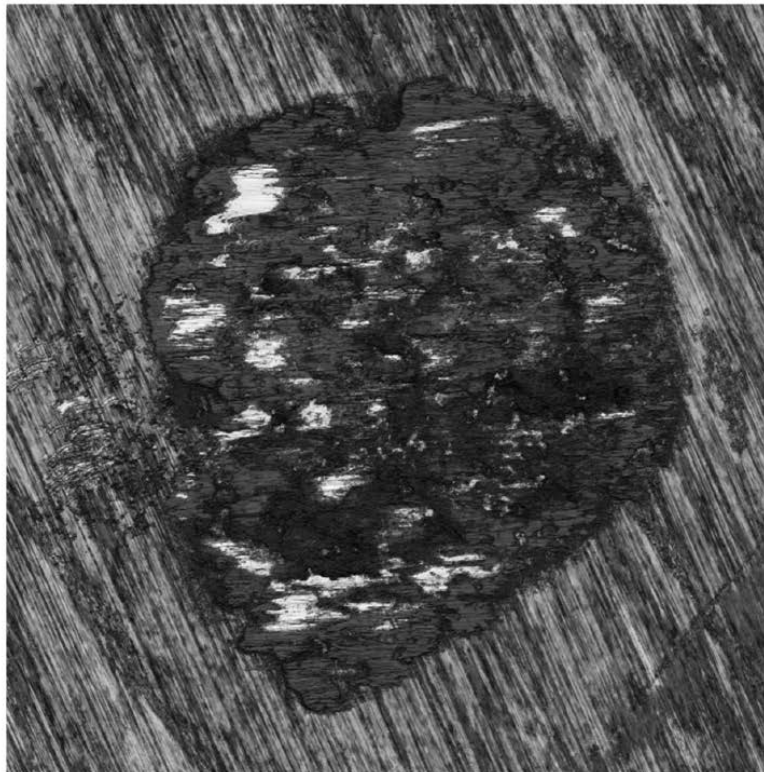


457



[Analysis result]			
Volume	177849.429	$\mu\text{m}^3$	
Surface Area	138426.925	$\mu\text{m}^2$	
Surface area including threshold surface	272426.893	$\mu\text{m}^2$	
Area	133999.968	$\mu\text{m}^2$	

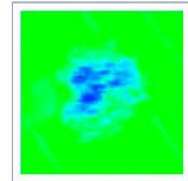
**LEXT**



Intensity



Color



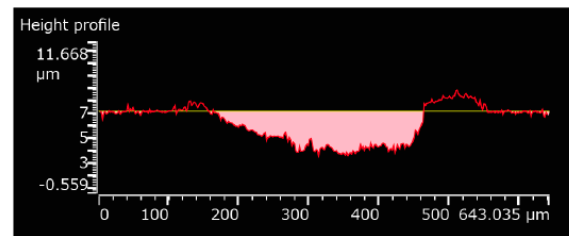
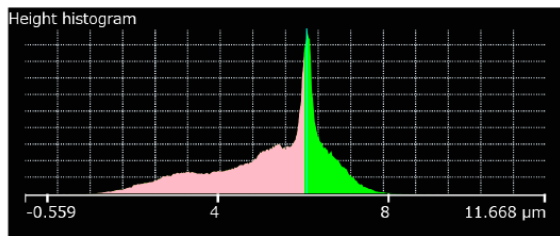
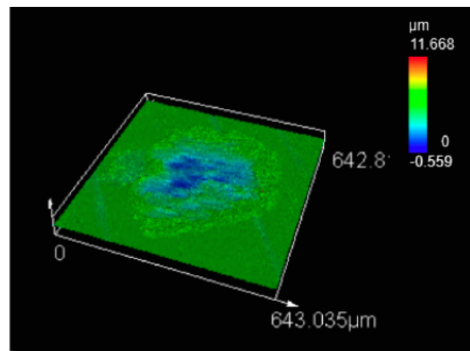
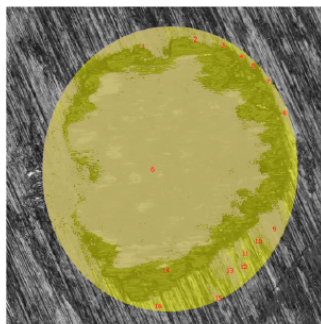
Height



Map

Report Title

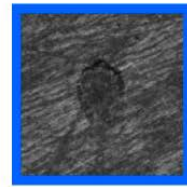
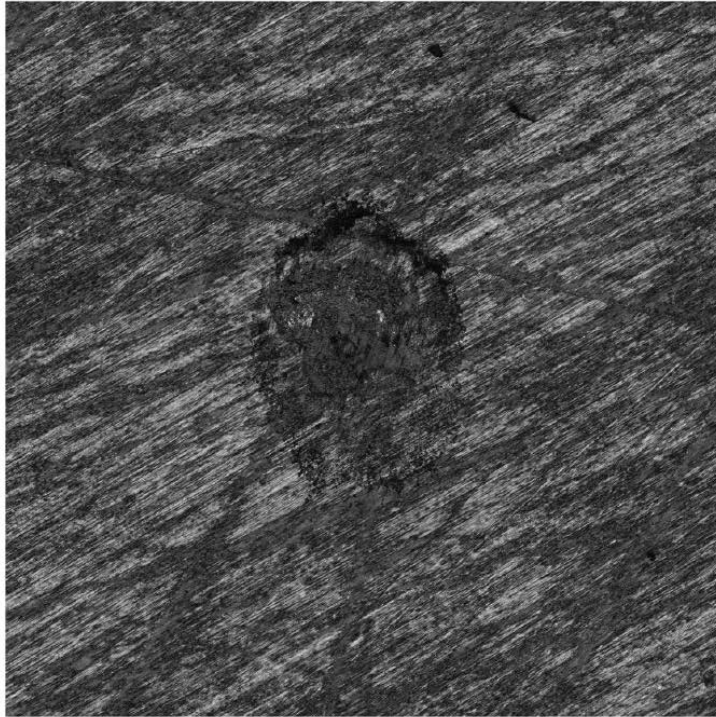
**LEXT**



[Analysis result]			
Volume	219628.262	[μm <sup>3</sup> ]	
Surface Area	150852.519	[μm <sup>2</sup> ]	
Surface area including threshold surface	297506.377	[μm <sup>2</sup> ]	
Area	146653.858	[μm <sup>2</sup> ]	



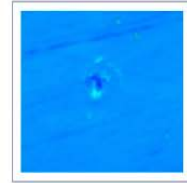
**LEXT**



Intensity



Color



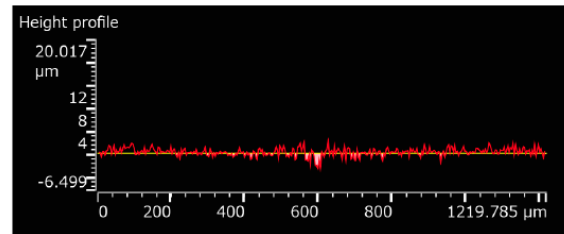
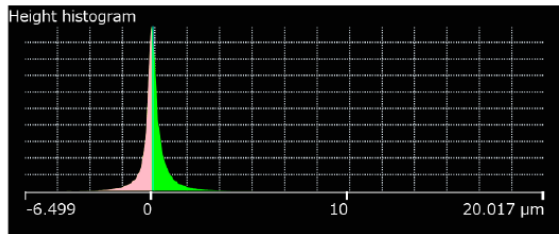
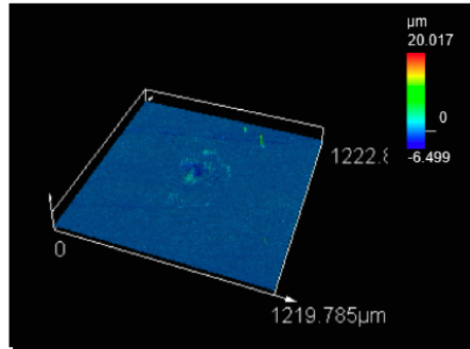
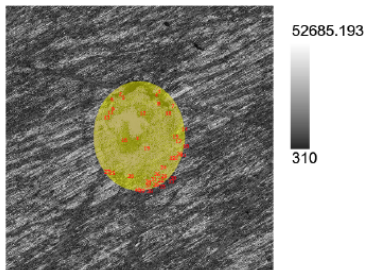
Height



Map

Report Title

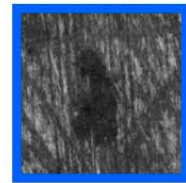
**LEXT**



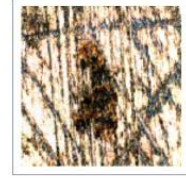
[Analysis result]			
Volume	27180.777		[ $\mu\text{m}^3$ ]
Surface Area	53319.198		[ $\mu\text{m}^2$ ]
Surface area including threshold surface	120098.978		[ $\mu\text{m}^2$ ]
Area	66779.779		[ $\mu\text{m}^2$ ]



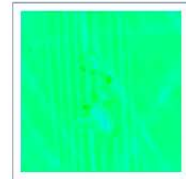
**LEXT**



Intensity



Color



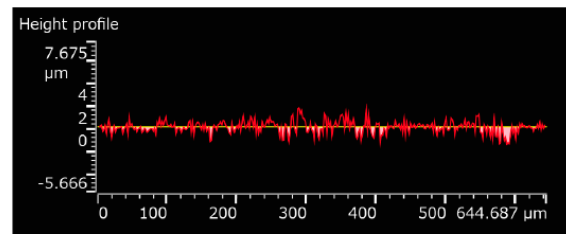
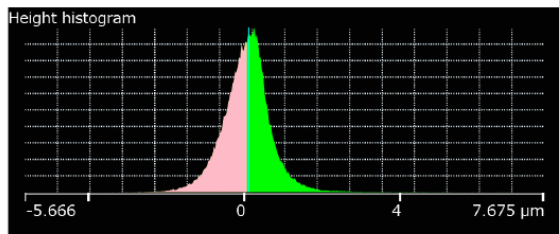
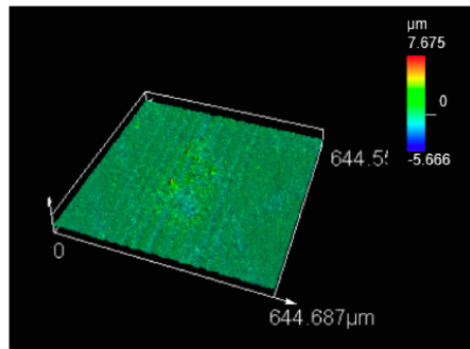
Height



Map

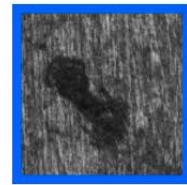
Report Title

**LEXT**



[Analysis result]			
Volume	17302.560		[μm <sup>3</sup> ]
Surface Area	30916.047		[μm <sup>2</sup> ]
Surface area including threshold surface	63812.866		[μm <sup>2</sup> ]
Area	32896.820		[μm <sup>2</sup> ]

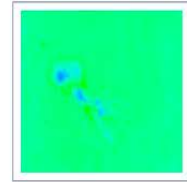
**LEXT**



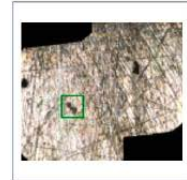
Intensity



Color



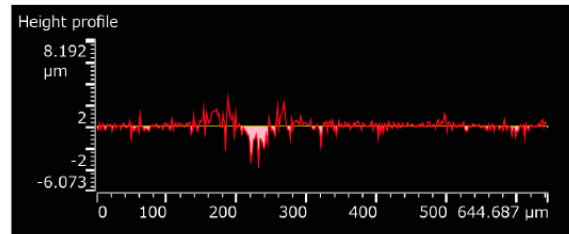
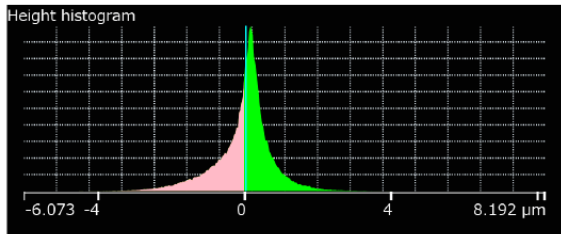
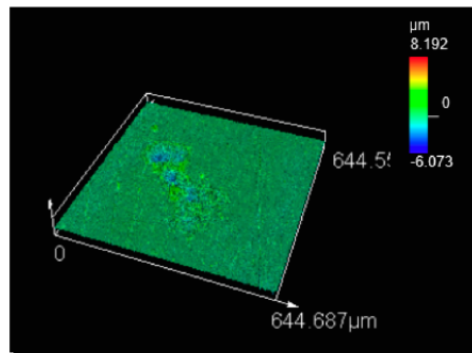
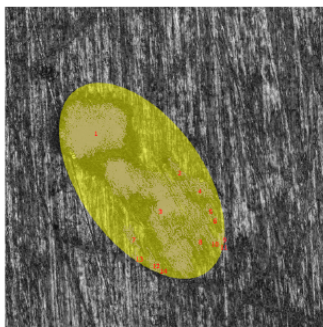
Height



Map

Report Title

**LEXT**









[Analysis result]			
Volume	22237.678	[μm <sup>3</sup> ]	
Surface Area	27642.527	[μm <sup>2</sup> ]	
Surface area including threshold surface	53054.313	[μm <sup>2</sup> ]	
Area	25411.786	[μm <sup>2</sup> ]	

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3









## Изменение топографии поверхности образцов во время эрозионных испытаний







### Протокол 1

№ п/п	№ образца	Время испытания, мин / Общее время испытаний, мин	Масса образца, г		Потеря массы при испытании, г / Общая потеря массы при испытаниях, г	Состояние образца после испытаний
			До испытаний	После испытаний		
<b>Образцы из порошка CL 20ES без обработанной поверхности</b>						
1.1	<b>СЛС 0</b>	0/0	32,41582	32,41582	0 / 0	
1.2		5/5	32,41582	32,41372	0,0021 / 0,0021	
1.3		10/15	32,41372	32,41213	0,001587 / 0,003687	
1.4		10/25	32,41213	32,41042	0,001717 / 0,005403	
1.5	<b>СЛС 0</b>	10/35	32,41042	32,40910	0,001317 / 0,00672	
1.6		10/45	32,40910	32,40723	0,001867 / 0,008587	















1.7		10/55	32,40723	32,40625	0,000983 / 0,009570	
2.1	<b>СЛС 45</b>	0/0	34,83888	34,83888	0 / 0	
2.2		5/5	34,83888	34,83032	0,008563 / 0,008563	
2.3	<b>СЛС 45</b>	10/15	34,83032	34,82707	0,003250 / 0,011813	
2.4		10/25	34,82707	34,82485	0,002217 / 0,014030	
2.5		10/35	34,82485	34,82288	0,001967 / 0,015997	
2.6		10/45	34,82288	34,82108	0,001800 / 0,017797	
2.7		10/55	34,82108	34,8195	0,001583 / 0,01938	












3.1	<b>СЛС 90</b>	0/0	32,36467	32,36467	0 / 0	
3.2		5/5	32,36467	32,36193	0,002733 / 0,002733	
3.3		10/15	32,36193	32,35970	0,002233 / 0,004967	
3.4		10/25	32,35970	32,35840	0,001300 / 0,006267	
3.5		10/35	32,35840	32,35668	0,001717 / 0,007983	
3.6	<b>СЛС 90</b>	10/45	32,35668	32,35543	0,001258 / 0,009242	
3.7		10/55	32,35543	32,35351	0,001914 / 0,011156	
<b>Образец стали 316 L, изготовленный из горячекатанного прутка</b>						
4.1	<b>316L Пруток</b>	0/0	15,4969	15,4969	0 / 0	

4.2	<b>316L Пруток</b>	5/5	15,4969	15,49576	0,00114 / 0,00114	
4.3		10/15	15,49576	15,49396	0,0018 / 0,00294	
4.4		10/25	15,49396	15,49248	0,00148 / 0,00442	
4.5		10/35	15,49248	15,49052	0,00196 / 0,00638	
4.6		10/45	15,49052	15,48862	0,0019 / 0,00828	
4.7		10/55	15,48862	15,48682	0,0018 / 0,01008	





## Протокол 2

№ п/п	№ образца	Время испытания, мин / Общее время испытаний, мин	Масса образца, г		Потеря массы при испытании, г / Общая потеря массы при испытаниях, г	Состояние образца после испытаний
			До испытаний	После испытаний		
<b>Образцы из порошка CL 20ES с обработанной поверхностью</b>						
1.1	<b>СЛС 0</b>	0/0	32,25266	32,25266	0 / 0	

1.2		5/5	32,25266	32,2523	0,00036 / 0,00036	
1.3		10/15	32,2523	32,25012	0,00218 / 0,00254	
1.4		10/25	32,25012	32,2478	0,00232 / 0,00486	
1.5	<b>СЛС 0</b>	10/35	32,2478	32,24534	0,00246 / 0,00732	
1.6		10/45	32,24534	32,24266	0,00268 / 0,01	
1.7		10/55	32,24266	32,24046	0,0023 / 0,0123	
2.1	<b>СЛС 45</b>	0/0	34,68882	34,68882	0 / 0	
2.2		5/5	34,68882	34,68794	0,00088 / 0,00088	
2.3		10/15	34,68794	34,68566	0,00228 / 0,00316	
2.4	<b>СЛС 45</b>	10/25	34,68566	34,68344	0,00222 / 0,00538	
2.5		10/35	34,68344	34,6814	0,00204 / 0,00742	

2.6		10/45	34,6814	34,67912	0,00228 / 0,0097	
2.7		10/55	34,67912	34,67714	0,00198 / 0,01168	
3.1	<b>СЛС 90</b>	0/0	32,3018	32,3018	0 / 0	
3.2		5/5	32,3018	32,301	0,0008 / 0,0008	
3.3		10/15	32,301	32,29852	0,00248 / 0,00328	
3.4	<b>СЛС 90</b>	10/25	32,29852	32,2962	0,00232 / 0,0056	
3.5		10/35	32,2962	32,29384	0,00236 / 0,00796	
3.6		10/45	32,29384	32,29134	0,0025 / 0,01046	
3.7		10/55	32,28872	32,28872	0,0019 / 0,01308	
<b>Образец стали 316 L, изготовленный из горячекатанного прутка</b>						
4.1	<b>316L Пруток</b>	0/0	33,60452	33,60452	0 / 0	
4.2		5/5	33,60452	33,60426	0,00026 / 0,00026	



4.3	<b>316L Пруток</b>	10/15	33,60426	33,60206	0,0022 / 0,00246	
4.4		10/25	33,60206	33,60006	0,002 / 0,00446	
4.5		10/35	33,60006	33,59798	0,00208 / 0,00654	
4.6		10/45	33,59798	33,59578	0,0022 / 0,00874	
4.7		10/55	33,59578	33,59388	0,0019 / 0,01064	