

На правах рукописи



**Акбашев Вадим Ринатович**

**ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ  
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ  
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Уфа – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре «Сопротивление материалов».

**Научный руководитель – Жернаков Владимир Сергеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

**Официальные оппоненты:**

**Чернявский Александр Олегович**, доктор технических наук, профессор кафедры технической механики ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск.

**Хакимов Аким Гайфуллинович**, кандидат ф.-м. наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ Институт механики им. Р.Р. Мавлютова — обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН), г. Уфа.

**Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»**, г. Самара.

Защита состоится «08» апреля 2022 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.10 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К.Маркса, д. 12.ш

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте <https://www.ugatu.su/d-212-288-10>.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2022г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

д.т.н., профессор



А.В. Месропян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Согласно основным принципам проектирования и конструктивно-технологической отработки, изготовлению конструкции должно предшествовать изучение напряженно-деформированного состояния, возникающего в изделии при нагружении эксплуатационными нагрузками и определение закономерностей формирования остаточных напряжений с целью оценки их влияния на прочность.

Проблемы формирования, управления и контроля поверхностных остаточных напряжений в деталях и конструкциях являются одними из важнейших задач, успешное решение которых позволит в значительной степени повысить стабильность характеристик прочности при их изготовлении и способствовать обеспечению их надежности.

Наиболее значимыми и научно-методологическими проблемами определения остаточных напряжений в элементах конструкций являются отсутствие неразрушающего контроля для наиболее критических и сложных зон деталей; методов математического моделирования остаточных напряжений при операциях упрочнения различными методами; методов определения эпюр напряжений по глубине поверхностного слоя детали.

Таким образом, определение остаточных напряжений, возникших в процессе изготовления элементов конструкции, необходимо производить с учетом всей технологической цепочки производства, а также конструктивных факторов.

Подтверждением актуальности темы диссертации также является то, что ее базовую основу составляют исследования, выполненные автором в рамках договора по ПНИ ГБНУ АН РБ № 03012000578 19000033\_104987 за 2019 г. по теме: «Разработка методики определения остаточных напряжений в деталях газотурбинных двигателей при ионно-плазменном напылении». Также следует отметить, что на научно-техническом совещании АО «ОДК» на тему: «Наведение и контроль остаточных напряжений в деталях ГТД в соответствии с требованиями разработчика» (2018 г.) констатировали актуальность проблемы по обеспечению благоприятных уровней остаточных напряжений в элементах конструкций.

**Цели и задачи работы.** Целью работы является исследование остаточных напряжений и их влияние на прочность элементов конструкций с учетом конструктивно-технологических факторов.

Для достижения данной цели были сформулированы следующие основные задачи:

1. проанализировать причины и общие закономерности формирования остаточных напряжений в элементах конструкций с учетом конструктивных и технологических факторов.

2. разработать схему расчета остаточных напряжений в типовых элементах конструкций с концентраторами напряжений при упругом и упругопластическом деформировании с учетом конструктивно-технологических факторов;

3. исследовать влияние НДС и остаточных напряжений в элементах конструкций на их прочность с учетом технологической наследственности.

**Методы исследования.** Работа выполнена на основе классических методов теории упругости и механики деформируемого твердого тела. Численный расчет осуществлен на базе метода конечных элементов с применением программно-вычислительных комплексов *ANSYS, DEFORM-3D*.

**Научная новизна:**

- разработана схема расчета НДС и остаточных напряжений в элементах конструкций, отличающаяся учетом конструктивно-технологических факторов и истории нагружения.
- выявлены общие закономерности формирования остаточных напряжений с учетом технологической наследственности в деталях с концентраторами напряжений.
- установлено влияние конструктивных факторов и различных технологических операций при изготовлении деталей с учетом эксплуатационных характеристик (определены критические нагрузки в соединении кольца и пластины с натягом, распределение осевой нагрузки по виткам резьбы в резьбовом соединении со спиральными вставками, прочностные характеристики и частоты собственных колебаний в образцах с ионно-плазменным напылением).

**Практическая значимость работы:**

1. разработанные модели, учитывающие влияние остаточных напряжений, обеспечивают уточнение прочностных характеристик на стадии проектирования и разработки технологического процесса;
2. результаты исследования внедрены на предприятии АО «УАП «Гидравлика» для анализа и корректировки серийных технологических процессов ионно-плазменного напыления нитрида титана на детали гибких трубопроводов;
3. результаты научных исследований данной работы могут быть использованы при проектировании элементов конструкций с учетом технологической наследственности.

**Положения, выносимые на защиту:**

- схема расчета НДС в типовых элементах конструкций с концентраторами напряжений с учетом конструктивно-технологических факторов в заготовке и истории нагружения;
- результаты аналитического и численного исследования НДС в пластинах с запрессованными в ее отверстия кольцами из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V;
- результаты расчета напряженно-деформированного состояния резьбового соединения с резьбовой вставкой;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований изделий с ионно-плазменным покрытием на их эксплуатационные характеристики.

**Достоверность** основана на применении классических методов теории упругости и механики деформируемого твердого тела; использовано сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике другими исследователями; установлено качественное совпадение авторских

результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2013-2019 гг.), региональной зимней школе-семинаре аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы в науке и технике» (г. Уфа, 2014-2020 гг.), Международной научной конференции «Наука в центральной России» (г. Липецк, 2014 г.), Всероссийской научно-технической конференции молодых специалистов (г. Уфа, 2018, 2019 гг.), International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS) (Ufa, 2019).

**Публикации.** Основные результаты диссертации отражены в 21 печатных работах, включая 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьи в журналах, индексируемых Scopus, а также в 1 патенте на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы. Работа содержит 129 страниц машинописного текста, включающего 73 рисунка и библиографический список из 85 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследования, приведено краткое содержание работы.

**В первой главе** проведен обзор работ, посвященных влиянию конструктивно-технологических факторов на напряженно-деформированное состояние и остаточные напряжения в элементах конструкций на их несущую способность в условиях хрупкого или вязкого разрушения, длительного статического, циклического или ударного нагружения. Существенный вклад в исследования влияния остаточных напряжений в конструкциях представлено в работах Биргера И.А., Иосилевича Г.Б., Иванова С.И., Павлова В.Ф., Смыслова А.М., Мухина В.С., Wern Н. А. и др.

Установлено, что проблема определения остаточных напряжений является одной из важнейших для надежности и долговечности машин. В большом количестве случаев разрушение конструкций происходит из-за наличия неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений. Так, в работах указано, что максимальная разница напряженно-деформированного состояния в соединениях с натягом при приложении к ним комбинированных внешних нагрузок с учетом и без учета сил запрессовки при механической сборке может составлять 14%.

Проведен анализ литературных источников о применении защитных и упрочняющих покрытий для лопаток и деталей авиационных двигателей, обеспечивающих работоспособность этих деталей в условиях повышенных температур, коррозии, фреттинга и износа. Установлено, что определение технологических напряжений затруднено ввиду сложного характера напряженного состояния в системе «покрытие – основа». Также отмечено, что отсутствуют математические модели процесса формирования и перераспределения остаточных напряжений, учитывающих взаимосвязь между напряжениями и деформациями в

зоне контакта "покрытие - основа" при нагреве, а также изменение при этом прочностных свойств.

На основании данного обзора обоснована актуальность, а также сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** представлена схема расчета остаточных напряжений в деталях с учетом конструктивно-технологических факторов, которая включает алгоритмы расчета остаточных напряжений, формирующихся в процессах термоупругопластического деформирования.

Рассмотрены остаточные макронапряжения, формирующиеся в процессах термоупругопластического деформирования, когда их определение связано с необходимостью совместного анализа, теплового и напряженного состояний деформируемого тела, учета теплового воздействия, зависимости свойств материала от температуры и степени деформаций.

Данный подход к расчету остаточных напряжений может быть реализован в рамках сложного нагружения.

Сложное нагружение сопровождается непропорциональным изменением компонентов тензоров напряжений и деформаций, сменой процессов активного нагружения и разгрузки. При этом остаточные напряжения определяются с учетом всей истории нагружения и деформирования, предшествующей рассматриваемому моменту времени. Общая схема расчета остаточных напряжений базируется на методе последовательных нагружений, в котором история нагружения упругопластического деформирования разбивается на ряд достаточно малых этапов по параметру нагружения или времени. Предполагается, что в пределах таких малых этапов нагружение тела допустимо считать его простым.

На основании вышеизложенных алгоритмов расчета НДС и остаточных напряжений, формирующихся в процессах термоупругопластического деформирования, разработана схема расчета остаточных напряжений. Структура схемы расчета приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема расчета напряженно-деформированного состояния с учетом технологической наследственности и конструктивных особенностей

В третьей главе исследовано влияние конструктивных факторов на остаточные напряжения. Рассмотрен процесс получения посадки с натягом кольца в пластину, а также произведен учет осевых и контурных напряжений при различных видах нагружения. Для исследований приняты пластины с отверстием диаметром  $d_{пл} = (14..30)$  мм, с запрессованными в них кольцами толщиной  $t=(2..10)$  мм с величиной натяга  $\Delta$ ;  $d= 10$  мм – внутренний диаметр кольца;  $s = (5..15)$  мм - ширина кольца и пластины. Материал пластины - титановый сплав ВТ6 с пределом текучести  $\sigma_T^{пл} = 830$  МПа, а кольца - наноструктурный сплав ВТ6 с пределом текучести  $\sigma_T^{кол} = 1250$  МПа. Коэффициент линейного расширения материала пластины и кольца  $\alpha_T = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Численное решение задачи выполнено методом конечных элементов в трехмерной постановке с применением программно-вычислительного комплекса ANSYS 17.

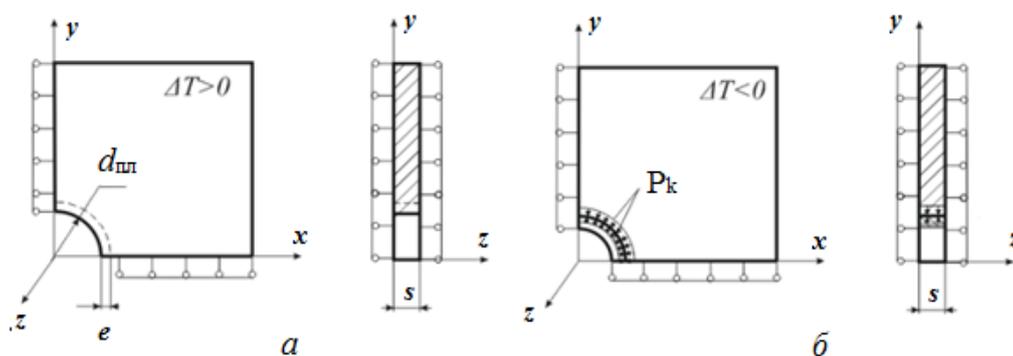


Рисунок 1 – Схема технологического получения соединения:  
а - нагрев пластины; б – охлаждение пластины и образование соединения

В результате расчета определены поля распределения осевых  $\sigma_y^{nl}$ ,  $\sigma_x^{nl}$ ,  $\sigma_y^k$ ,  $\sigma_x^k$  и контурных  $\sigma_\theta^{nl}$ ,  $\sigma_\theta^k$  напряжений при формировании соединения.

В результате исследований получены зависимости относительного напряжения в пластине  $\sigma_y^{nl}/\sigma_T^{nl}$  (рисунок 2, а) и кольце  $\sigma_{ymin}^k/\sigma_T^k$  (рисунок 2, б),  $\sigma_{ymax}^k/\sigma_T^k$  (рисунок 2, в) от отношения толщины кольца  $t$  к внешнему диаметру кольца  $d_k$ .

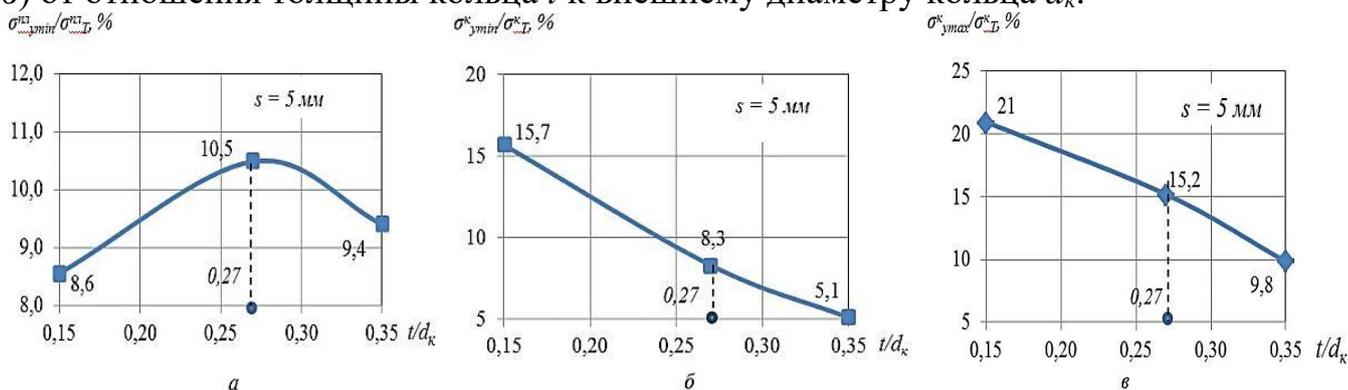


Рисунок 2 – Зависимость относительных осевых напряжений при натяге от параметров соединения  $t/d_k$  при толщине соединения  $s = 5$  мм

Установлено, что при заданной величине натяга в соединении формируются упругие напряжения; изменение ширины соединения  $s$  практически не влияет на напряженно-деформированное состояние соединения, а увеличение толщины  $t$  кольца приводит к снижению напряжений.

Полученные соединения с натягом с учетом начальных напряжений подвергались разным видам нагружения: одноосное растяжение; чистый сдвиг; двухосное растяжение ( $\sigma_y = 2\sigma_x$ ). Выявлено, что при любом из данных видов нагружений происходит нарушение контакта в области упругих деформаций.

Определена величина критических напряжений  $\sigma_0$ , при которых происходит нарушение контакта. Установлено, что ширина соединения  $s$  влияет на величину критических напряжений незначительно, однако, увеличение толщины кольца  $t$  ведет к ее резкому снижению (рисунок 3).

Так при одноосном растяжении величина критических нагрузок снижается на 76,5% при увеличении отношения с 0,15 до 0,35 (рисунок 3, а).

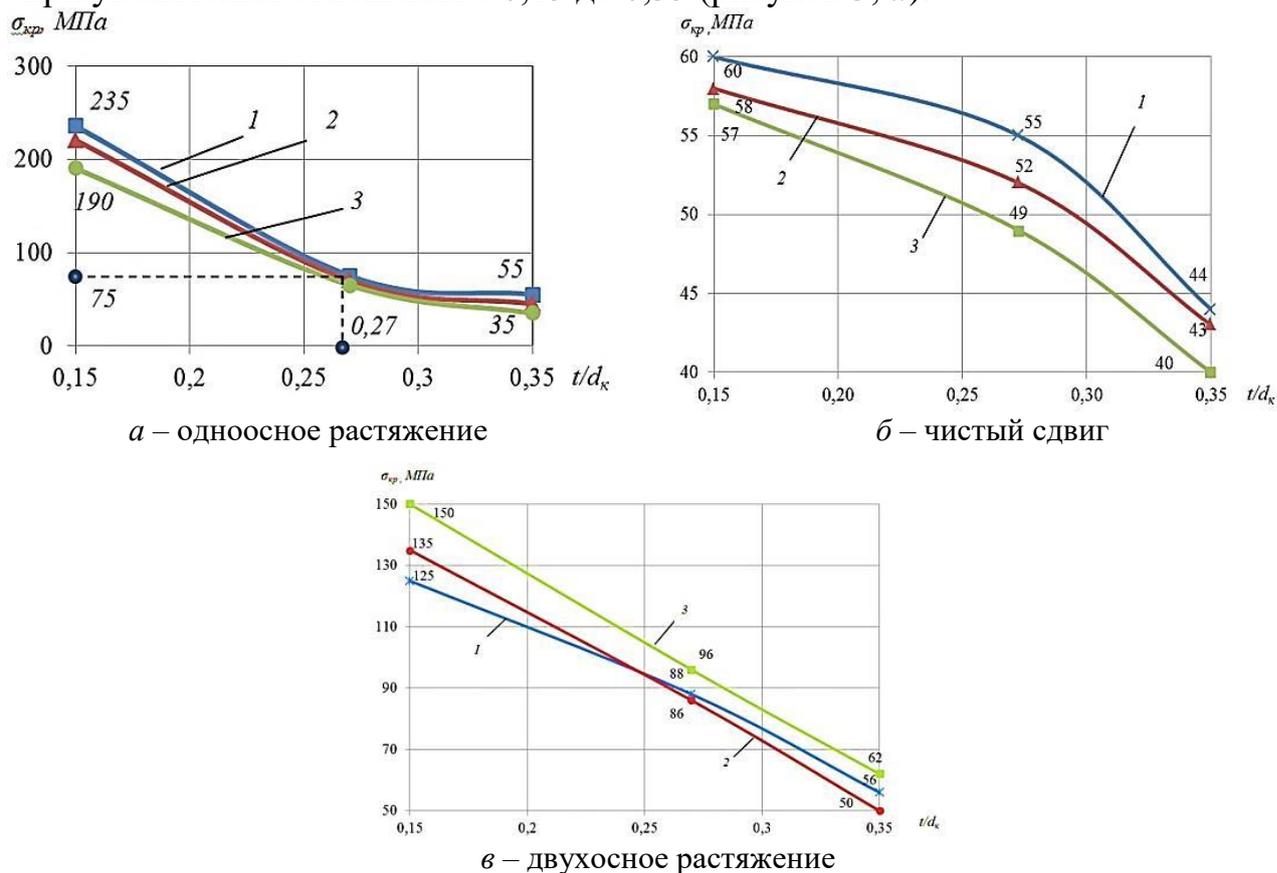


Рисунок 3 – Значение критического растягивающего напряжения  $\sigma_{кр}$ :  
 1 –  $s = 5$  мм; 2 –  $s = 10$  мм; 3 –  $s = 15$

При увеличении отношения  $t/d_k$  от 0,15 до 0,27 значение коэффициента концентрации напряжения  $\alpha_\sigma$  увеличивается с 4,2 до 4,6. Дальнейшее увеличение отношения  $t/d_k$  ведет к снижению коэффициента концентрации до значения 3,9.

Из рисунка 3, б видно, что при изменении отношения  $t/d_k$  от 0,15 до 0,35 предельная нагрузка снижается на 30%. Увеличение отношения  $t/d_k$  от 0,15 до 0,35 приводит к увеличению значения коэффициента концентрации напряжения  $\alpha_\sigma$ .

В результате исследования НДС соединения с натягом при двухосном растяжении получена зависимость критического напряжения  $\sigma_{кр}$  от геометрических параметров соединения. Установлено, что при изменении ширины соединения  $s$  с 5 до 15 мм уровень максимальной нагрузки  $\sigma_{кр}$  увеличивается на 16,7%. Коэффициент концентрации при данном виде нагружения повышается на 23%.

Также произведен численный расчет остаточных технологических напряжений при установке резьбовой вставки в резьбовое соединение (рисунок 4,5).

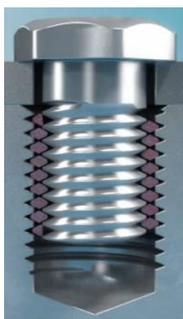


Рисунок 4 – Соединение с резьбовой вставкой

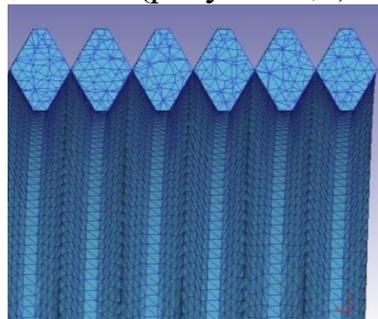


Рисунок 5 – Геометрическая модель резьбовой вставки в DEFORM-3D

Применение резьбовых вставок позволяет равномерно распределить нагрузки и снизить напряжения на первый виток резьбы. Угловая и шаговая погрешность компенсируются по всей длине резьбовой вставки, в результате чего достигаются идеальные условия для передачи усилия между болтом и приёмной резьбой и, как следствие, – увеличение срока службы резьбового соединения при любых статических и динамических нагрузках.

Технологическая операция сборки резьбового соединения состоит из этапа установки резьбовой вставки в отверстие гайки или пластины, а затем вкручивания винта в отверстие с установленной резьбовой вставкой. Исследованы резьбовые соединения M10 с шагом  $P = (1; 1,25; 1,5)$  мм и количеством витков резьбы  $n=6$ . Материалом гайки и болта являлся титановый сплав ВТ6 с пределом текучести  $\sigma_T^{пл} = 830$  МПа, а резьбовой вставки - коррозионно-стойкая жаропрочная сталь 08X18H10 (аналог *AISI 304*) с пределом текучести  $\sigma_T^{кол} = 850$  МПа. В исходном состоянии шаг резьбовой вставки составлял  $P_0 = 0,83$  мм.

Получены поля остаточных технологических напряжений в резьбовом соединении и резьбовой вставке, возникших при установке резьбовой вставки (рисунок 6).

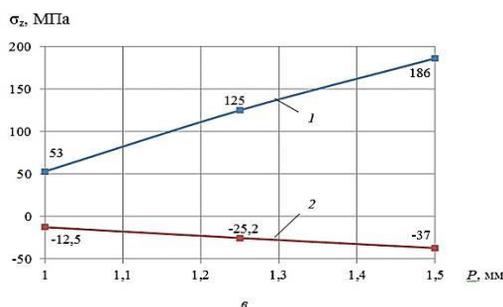
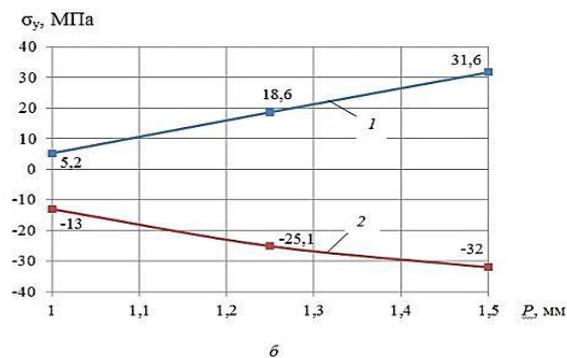
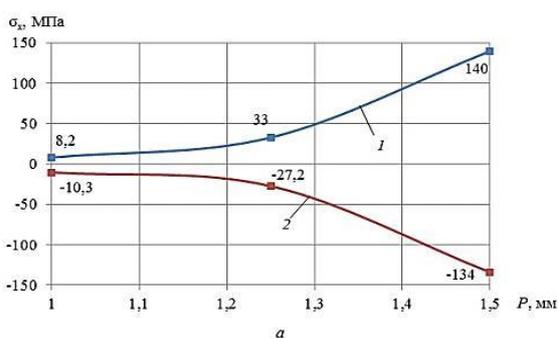


Рисунок 6 – Зависимость технологических напряжений в резьбовой вставке от изменения шага  $P$ :  $a$  – осевые напряжения  $\sigma_x$ ;  $b$  – радиальные напряжения  $\sigma_y$ ;  $b$  – тангенциальные напряжения  $\sigma_z$

Отмечено, что с увеличением шага резьбового соединения  $P$  с 1 до 1,5 мм осевые напряжения  $\sigma_x$  увеличиваются практически симметрично. Так сжимающие напряжения увеличиваются с 10,3 до 140 МПа, а растягивающие с 8,2 до 140 МПа (рисунок 6,  $a$ ). Таким образом, величина напряжений, как сжимающих, так и растягивающих возрастает в 14 раз. Радиальные напряжения  $\sigma_y$  возрастают менее интенсивно, чем осевые – в 3 раза при увеличении шага  $P$  с 1 до 1,5 мм (рисунок 6,  $b$ ).

Максимальные значения растягивающих тангенциальных напряжений  $\sigma_z$  возрастают с 53 до 186 МПа (рисунок 6,  $b$ ). Сжимающие тангенциальные напряжения  $\sigma_z$  возрастают с 12,5 до 37 МПа при увеличении шага  $P$  с 1 до 1,5 мм.

Проведено исследование резьбовых соединений с резьбовой вставкой и без нее на распределение осевой нагрузки вдоль тела болта. Расчетная схема соответствовала схеме, представленной на рисунке 7. Величина растягивающей нагрузки  $\sigma_0$  составляла 100 МПа.

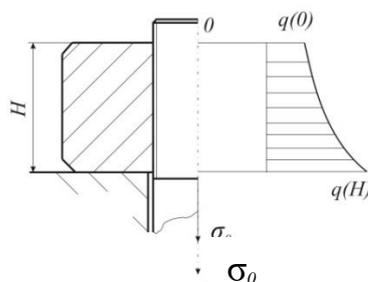


Рисунок 7 – Схема распределения нагрузки в соединении типа болт – гайка

Отмечено, что при шаге резьбы  $P=1,5$  мм первый виток резьбы принимает 46,5% всей нагрузки на стержень болта, в то время как при  $P = 1$  мм величина нагрузки на первый виток равна 35,2% (рисунок 8). Также следует отметить, что при меньшей величине шага распределение нагрузки менее равномерно по виткам резьбы. Так на 3 витке при шаге резьбы  $P=1$  мм величина напряжений достигает значения 16%, а при  $P=1,5$  мм – только 12,5%.

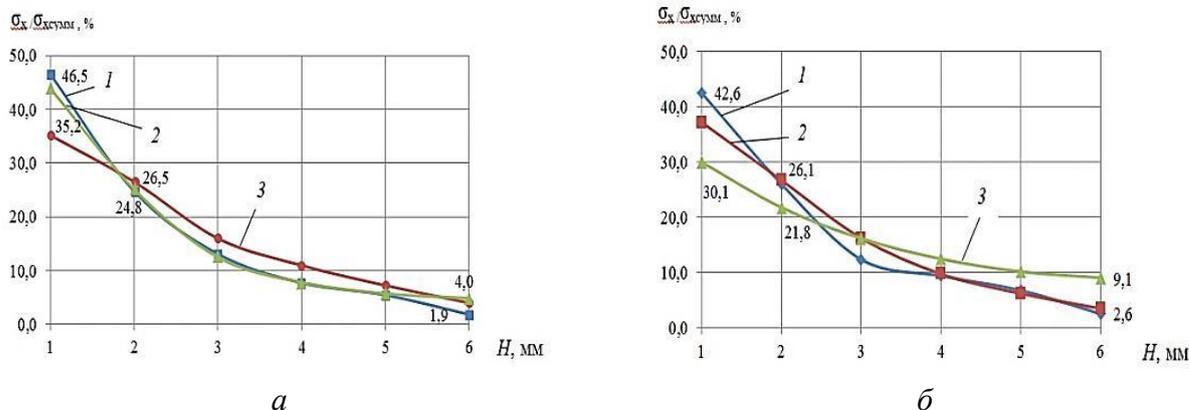


Рисунок 8 – Распределение нагрузки по виткам резьбы в %:  
1 –  $P=1,5$  мм; 2 –  $P=1,25$  мм; 3 –  $P=1$  мм

В результате исследования выявлено положительное влияние резьбовой вставки в соединении на НДС. Наличие резьбовой вставки позволяет снизить нагрузку на первый виток до 5%. Нагрузка на весь болт становится более равномерная, что благоприятно влияет на прочность резьбового соединения.

В четвертой главе по разработанной схеме определены НДС и остаточные напряжения в элементах конструкций, а также их влияние на прочность при ионно-плазменном напылении.

Одним из перспективных методов повышения ресурса высоконагруженных деталей и узлов ГТД является модификация поверхности пучками заряженных частиц – электронных, ионных, плазменных, а также их комбинаций. При этом на поверхности детали формируется специальное защитное покрытие, обеспечивающее сопротивление износу, коррозии и эрозии.

При построении схемы расчета остаточных напряжений для рассматриваемого технологического процесса учтено, что при нанесении покрытий при температуре  $T$  происходит формирование адгезионных связей между деталью и покрытием и полностью завершены релаксационные процессы. Производится учет физико-механических характеристик материалов в зависимости от температуры.

В данном разделе рассмотрена пластина из материала ВТ6, на которую нанесено покрытие. Покрытие состояло из функционального подслоя нитрида титана  $TiN$  толщиной  $t_{ij}$  и подслоя из чистого титана ВТ1-0 толщиной  $t_{i(j-1)}$  (рисунок 9).

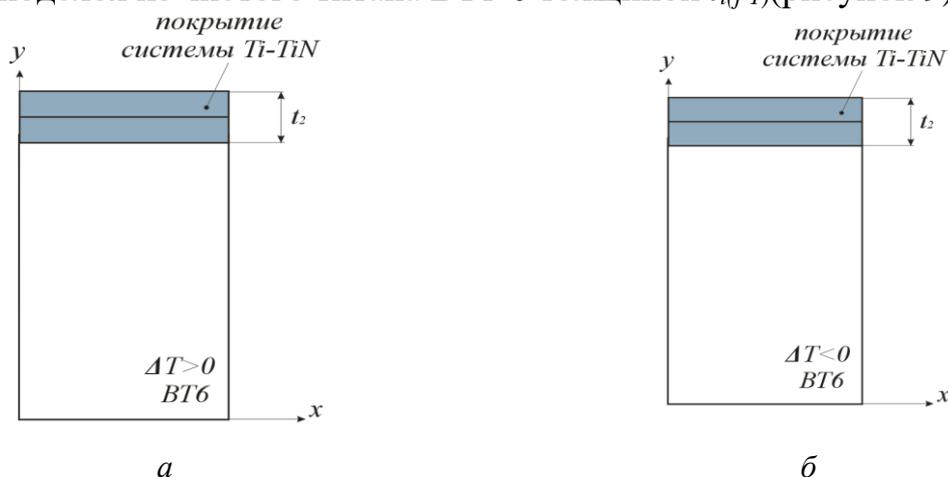


Рисунок 9 - Расчетная схема нанесения двухслойного покрытия системы  $(Ti-TiN)_n$ : *а* – поэтапное нанесение покрытия; *б* – формирование покрытия при остывании конструкции

Выполнены расчеты остаточных напряжений для конструкций с однослойными покрытиями. Толщина слоя из чистого титана  $t_{0i}$  варьировалась от 0,5 мкм до 1,5 мкм, а толщина нитрида титана  $TiN$   $t_{1i}$  менялась от 1,5 мкм до 14,5 мкм.

Установлено влияние максимальных остаточных сжимающих напряжений  $\sigma_x^*$  на поверхности нанесенных слоев от отношения толщин  $t_{11}/t_{01}$  в однослойных конструкциях при различных толщинах подложки  $t_{01}$  (рисунке 10).

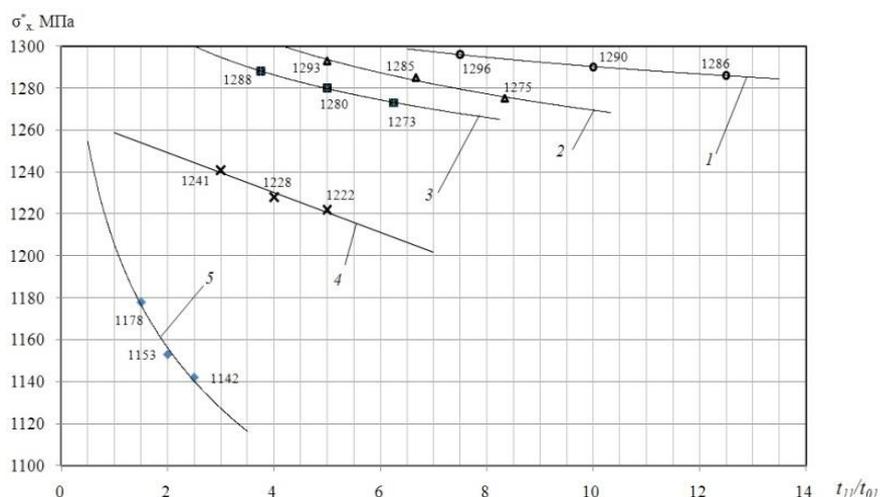


Рисунок 10 - Зависимость максимальных сжимающих напряжений  $\sigma_x^*$  на поверхности конструкции от толщины слоев  $t_{11}/t_{01}$ :  
 кривая 1 –  $t_{01}=0,2$  мкм; кривая 2 –  $t_{01}=0,3$  мкм; кривая 3 –  $t_{01}=0,4$  мкм;  
 кривая 4 –  $t_{01}=0,5$  мкм; кривая 5 –  $t_{01}=1$  мкм

Выявлено, что с увеличением отношения  $t_{11}/t_{01}$  во всех конструкциях с покрытием происходит снижение сжимающих остаточных напряжений  $\sigma_x^*$ . При толщинах чистого титана VT1-0 от 0,2 мкм до 0,4 мкм величина напряжений практически одинакова и с увеличением толщины подслоев нитрида титана  $TiN$  снижается с 1296 МПа до 1288 МПа.

С применением покрытий с толщиной  $t_{01}$  равной 0,5 мкм (кривая 4) и 1 мкм (кривая 5) наблюдается снижение величины поверхностных сжимающих остаточных напряжений на 4,3% и 9% соответственно.

Выполнено исследование влияния количества нанесенных слоев  $b_i$  в конструкции на распределение остаточных напряжений  $\sigma_x^*$ . Количество нанесенных слоев варьировалось в диапазоне от 1 до 5. Зависимость величины поверхностных технологических напряжений  $\sigma_x$  от количества нанесенных слоев  $k$  при одинаковой толщине покрытия  $t=15$  мкм представлена на рисунке 11.

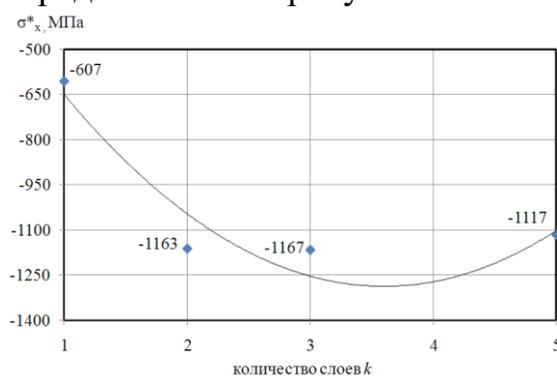


Рисунок 11 – Влияние поверхностных напряжений  $\sigma_x^*$  от количества нанесенных слоев  $k$  при  $t=15$  мкм

Установлено, что при увеличении количества слоев покрытия  $k$  равное 3, наблюдается рост поверхностных сжимающих напряжений  $\sigma_x^*$ , что благоприятно

влияет на эксплуатационные свойства конструкции. Так, в конструкциях с толщиной чистого титана  $t_{0i}=0,5$  мкм при нанесении 1 слоя покрытия поверхностные напряжения сжатия достигают значения 607 МПа. При нанесении 3 слоев покрытия сжимающие напряжения  $\sigma_x^*$  увеличиваются до 1167 МПа, то есть в 1,9 раза.

Выявлена связь между количеством слоев и величиной поверхностных остаточных напряжений  $\sigma_x^*$  при постоянной толщине подслоя чистого титана VT1-0 и при различных толщинах подслоя нитрида титана  $TiN$  (рисунок 12).

В модели с толщиной нитрида титана  $t_{Ti}=1,5$  мкм (кривая 1) происходит снижение величины сжимающих напряжений на 5% (с -1296 МПа до -1230 МПа). В модели с  $t_{Ti}=2,5$  мкм (кривая 2) при нанесении 5 слоев наблюдается снижение напряжений на 10% (с -1286 МПа до -1170 МПа). Выявлено, увеличение толщины функционального слоя нитрида титана также влияет на формирование остаточных технологических напряжений  $\sigma_x$ , так в однослойных конструкциях разница напряжений составляет 1%, а при нанесении пяти слоев – 5%.

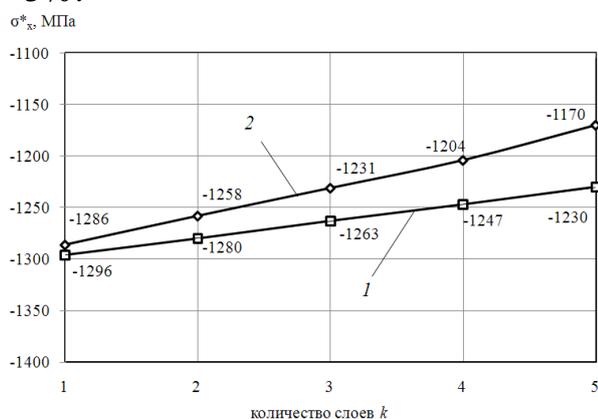


Рисунок 12 – Зависимость поверхностных напряжений  $\sigma_x^*$  от количества нанесенных слоев  $k$  при  $t_{0i}=0,2$  мкм:  
кривая 1 –  $t_{Ti}=1,5$  мкм; кривая 2 –  $t_{Ti}=2,5$  мкм

Численным методом проведено определение собственных частот колебания образца, имитирующего упрощенную модель лопатки с ионно-плазменным многослойным покрытием (рисунок 13).

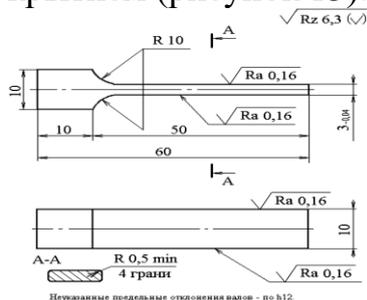


Рисунок 13 – Эскиз (а) и образец-имитатор лопатки (б)

Установлено, что несущая частота (изгибная) в образце с ионно-плазменным покрытием составила 970 Гц, что совпадает с частотой колебаний, полученной во время эксперимента, проведенного ранее в работах других исследователей.

Выполнены исследования образцов с ультра-мелкозернистой структурой из титанового сплава ВТ6 с вакуумно-плазменным покрытием  $(Ti+V)N$  на определение предела прочности  $\sigma_{пч}$  (рисунок 14). Испытания проведены по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

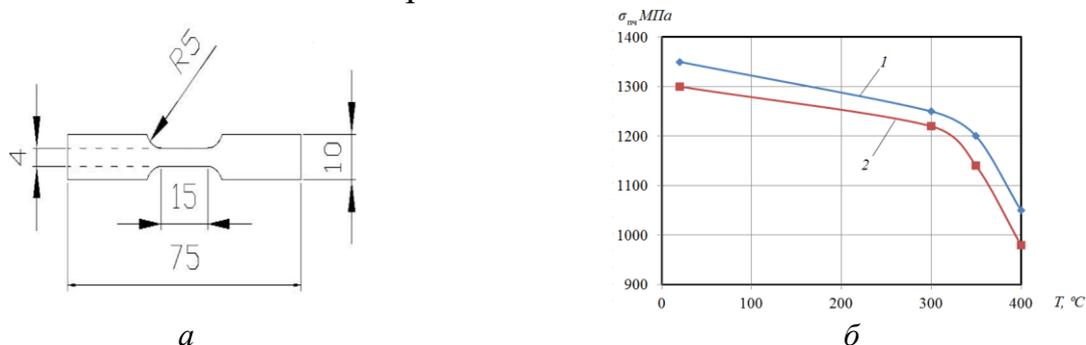


Рисунок 14 – Эскиз образца (а) и зависимость (б) предела прочности  $\sigma_{пч}$  от температуры испытаний образцов: 1 – эксперимент; 2 – моделирование

Проведены механические испытания образцов при комнатной и повышенной температурах. Расхождение значений, полученных в результате экспериментов и численным методом, составляет не более 5%.

Испытания на усталость проводили согласно схеме изгиб с вращением на специальной установке для усталостных испытаний, разработанной на кафедре сопротивления материалов УГАТУ при частоте 50 Гц.

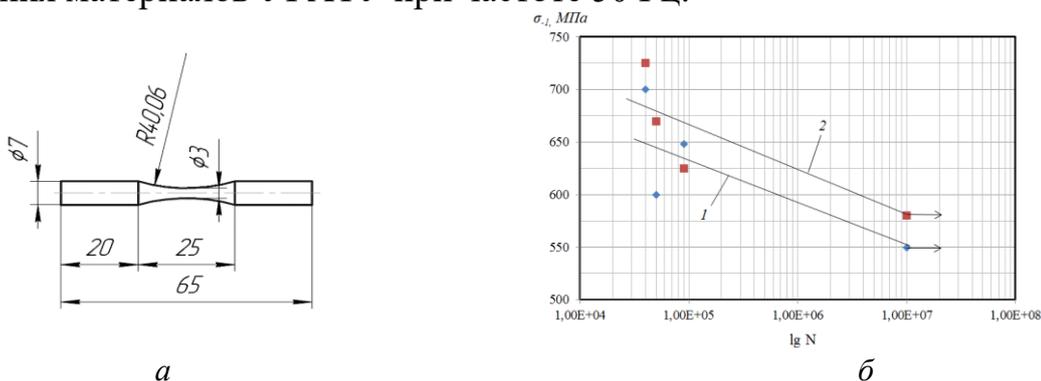


Рисунок 15 – Эскиз образца (а) и усталостные кривые образцов (б): 1 – эксперимент; 2 – моделирование

Усталостная прочность в результате моделирования оказалась выше на 6%, чем при экспериментальном исследовании (рисунок 15). Данная разница объясняется возможным неучтенным влиянием электролитно-плазменного полирования.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Разработана схема расчета НДС и остаточных напряжений с учетом влияния конструктивно-технологических факторов и истории нагружения на прочностные характеристики при различных этапах жизненного цикла изделия, позволяющая получить эпюры распределения напряжений, возникающих в процессе различных технологических операций (получение соединений с натягом, ионно-плазменное напыление защитных покрытий, процессы обработки металлов давлением и др.).

2. Выполнены расчеты НДС при получении посадки с натягом, учитывая конструктивные факторы. Установлено, что при увеличении отношения  $t/d_k$  значения относительных напряжений в кольце снижаются. В пластине относительные напряжения увеличиваются при  $t/d_k = (0,15 \div 0,27)$  от 8,6 до 10,5 %, после чего наблюдается снижение.

Произведен учет напряженно-деформированного состояния резьбового соединения в результате технологической операции посадки резьбовой вставки. Проведено исследование резьбовых соединений на распределение осевой нагрузки вдоль тела болта. Установлено, что с увеличением шага резьбы величина нагрузки на первый виток возрастает на 10%, а нагрузка распределяется более неравномерно.

Получены зависимости критического напряжения  $\sigma_{кр}$  от геометрических характеристик в соединении с натягом при разных видах нагружения (одноосное растяжение, чистый сдвиг, двухосное растяжение). Выявлено, что с увеличением отношения  $t/d_k$  происходит снижение критического напряжения до 23,4 % при одноосном растяжении.

Проведено исследование резьбовых соединений на распределение осевой нагрузки вдоль тела болта. Установлено, что наличие резьбовой вставки позволяет снизить нагрузку на первый виток до 5-10%. Нагрузка на весь болт, в целом, становится более равномерная, что благоприятно влияет на прочность соединения.

3. Произведено определение остаточных напряжений в элементах конструкций при вакуумном ионно-плазменном напылении. При этом установлено, что увеличение толщины подложки чистого титана  $t_{0i}$  от 0,2 мкм до 1 мкм в однослойных конструкциях приводит к снижению сжимающих остаточных напряжений на 9%. Рост толщины подслоя нитрида титана  $TiN$  с 1,5 мкм до 14,5 мкм влечет снижение сжимающих остаточных напряжений более чем в 2 раза.

Выполнен сравнительный анализ численных и экспериментальных значений НДС в конструкции с ионно-плазменным напылением. Установлено, что расхождение составляет не более 5%.

Выявлено, что при определении собственных частот колебаний, предела прочности и выносливости в образцах с вакуумным ионно-плазменным напылением по предложенной методике, расхождение с существующими экспериментальными методиками составляет не более 6%.

## Список основных публикаций

### *Рецензируемые издания, рекомендуемые ВАК*

1. Акбашев В.Р. Исследование напряженно-деформированного состояния соединения «пластина-кольцо» при формировании соединения и одноосном нагружении/ Жернаков В. С., Мардимасова Т. Н., Акбашев В.Р. // Вестник УГАТУ. 2015. Т19, № 2 (68). С. 14–19.

2. Акбашев В.Р. Прогнозирование усталостной прочности стержня с выточкой из наноструктурного титанового сплава при симметричном циклическом изгибе/ Жернаков В. С., Мардимасова Т. Н., Акбашев В.Р.// Вестник УГАТУ. 2016. Т.20, № 2 (72). С. 17–22.

3. Акбашев В.Р. Напряженно-деформированное состояние соединения с натягом при чистом сдвиге и двухосном растяжении с учетом технологических напряжений/ Жернаков В. С., Мардимасова Т. Н., Акбашев В.Р., Конева К.В. // Вестник УГАТУ. 2016. Т.20, № 3 (73). С. 12–18.

4. Акбашев В.Р. Исследование влияния резьбовых вставок на напряженно-деформированное состояние резьбового соединения/ Жернаков В. С., Мардимасова Т. Н., Арсланов М.Р., Акбашев В.Р.// Вестник УГАТУ. 2017. Т.21, № 4 (78). С. 18–24.

5. Акбашев В.Р. Моделирование остаточных напряжений при ионно-плазменном напылении в элементах конструкции/ Жернаков В. С., Мардимасова Т. Н., Смыслов А. М., Дубин А. И., Акбашев В.Р.// Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23, № 3 (85). С. 39–45.

#### *Рецензируемые издания, индексируемые Scopus*

6. V.R. Akbashev V.S. Zhernakov, T.N. Mardimasova, M.R. Arslanov. Modeling of threaded connection with threaded insert// International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). 21-25 Oct. 2019. Ufa, Russia.

7. V.R. Akbashev V.S. Zhernakov, T.N. Mardimasova. Calculation of nonlinear material deformation processes under nonisothermal loading and elastoplastic unloading // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). 21-25 Oct. 2019. Ufa, Russia.

#### *Патент*

8. Пат. 2652331 Российская Федерация, МПК В21К 1/46. Способ изготовления шаровых пальцев [Текст] / Жернаков В.С., Валиев Р.Ш., Валиев Э.Р., Акбашев В.Р.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «УГАТУ». – № 2017104585; заявл. 13.02.2017; опубл. 25.04.2018, Бюл. №12 – 8с: ил.

#### *Другие публикации*

9. Акбашев В.Р. Анализ напряженно-деформированного состояния в стержне с кольцевой канавкой при одноосном нагружении с учетом технологической наследственности/ Жернаков В. С., Арсланов М.Р., Акбашев В.Р.// Материалы Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» 22 – 23 октября 2014 г., Т. 1. С.122-123.

10. Акбашев В.Р. Моделирование технологических напряжений в соединении «пластина-кольцо» / Жернаков В. С., Акбашев В.Р.// Материалы Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» 28 – 30 октября 2015 г., Т. 1. С.290-293.

11. Акбашев В.Р. Расчет резьбового соединения с учетом технологических напряжений в соединении с резьбовой вставкой/ Жернаков В. С., Мардимасова Т. Н., Акбашев В.Р., Сабитов Р.А.// Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: СПбФ НИЦ МС, 2018. – №1. – 237 с., с.85-88.

12. Акбашев В.Р. Определение собственной частоты имитатора лопатки с ионно-плазменным покрытием Ti-TiN численным методом/ Жернаков В. С., Акбашев В.Р.//Материалы V Международной научно-технической конференции «Мавлютовские чтения» 22-25 марта 2021 г., Т. 3. С.57-60.

Соискатель



В.Р. Акбашев