

Арсланов Марат Рашитович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ  
НАСЛЕДСТВЕННОСТИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ  
СОСТОЯНИЕ И УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ  
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОБЪЕМНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

Специальность

01.02.06 – динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа–2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ) на кафедре «Сопротивление материалов».

**Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор  
**Жернаков Владимир Сергеевич**

**Официальные оппоненты: Соколкин Юрий Викторович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
зав. кафедрой механики композиционных  
материалов и конструкций ФГБОУ ВПО  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет», г.Пермь.

**Хакимов Аким Гайфуллович**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, старший научный сотрудник института  
механики УНЦ РАН, г. Уфа.

**Ведущая организация** – ФГБОУ ВПО «Самарский государственный  
аэрокосмический университет имени  
академика С.П. Королева (национальный  
исследовательский университет)», г.Самара.

Защита состоится 10 июня 2014 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.02 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект им. В.И.Ленина, д.76, ауд.1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2014г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета \_\_\_\_\_ Чернявский А.О.  
д.т.н., профессор

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время большое внимание уделяется объемным наноструктурным материалам (титановым сплавам), которые характеризуются чрезвычайно привлекательными механическими свойствами. Получение данных материалов осуществляется методами интенсивной пластической деформации (ИПД), при которых в заготовке накапливаются пластические деформации до 200-400%. В результате обработки материалов методами ИПД удается существенно увеличить их механические свойства. Так, например, предел текучести и усталостная прочность титановых сплавов возрастают практически в 1,5-2 раза, при этом пластичность уменьшается незначительно.

Наиболее распространённым среди методов ИПД, которые приводят к образованию в материале наноструктурного состояния, является равноканальное угловое прессование (РКУП). Данный процесс характеризуется достаточно большим количеством факторов, влияющих на распределение накопленных пластических деформаций и технологических остаточных напряжений, к числу которых относятся многопроходная схема деформирования, трение между заготовкой и штампом, специфика геометрии зоны пересечения каналов, размеры внешнего и внутреннего радиуса сопряжения каналов и т.д. Таким образом, в заготовке из объемного наноматериала, полученного путем РКУП, формируются значительные накопленные пластические деформации.

Несмотря на большое число работ по изучению процесса РКУП, проблема оценки влияния технологической наследственности (остаточных напряжений и накопленных пластических деформаций) в заготовке на напряженно-деформированное состояние (НДС) и прочность элементов конструкций, выполненных из объемных наноматериалов, недостаточно изучена и является актуальной задачей. Исследование особенностей формирования НДС при нагружении с учетом технологической наследственности позволит повысить надежность и усталостную прочность конструкций, выполненных из данных материалов, а также оценить возможность их использования в современных изделиях.

**Цели и задачи работы.** Целью работы является исследование влияния технологической наследственности на НДС и усталостную прочность элементов конструкций, выполненных из объемных наноматериалов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие основные задачи:

— разработать методику расчета НДС в типовых элементах конструкций с концентраторами напряжений при упругом и упругопластическом деформировании с учетом технологической наследственности, связанной с процессом формирования наноструктурного состояния в материалах методом РКУП;

— исследовать НДС в узлах сложной формы (на примере законцовки гибкого трубопровода) с учетом технологической наследственности в отдельных деталях, полученных в результате различных видов обработки (гидравлическая штамповка, РКУП и т.д.).

— исследовать теоретически и экспериментально усталостную многоцикловую прочность элементов конструкций из обычных и объемных наноструктурных титановых сплавов.

#### **Научная новизна:**

1. Разработана методика расчета НДС отличающаяся от существующих учетом технологической наследственности в заготовках после РКУП в типовых элементах конструкций (пластина с отверстием, стержень с выточкой) из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V.

2. Выполнен численный расчет НДС в законцовке гибкого трубопровода, изготовленного из обычных и объемных наноструктурных материалов. Расчет в отличие от существующих учитывает «историю» нагружения в отдельных деталях законцовки гибкого трубопровода, полученных в результате различных видов обработки (гидравлическая штамповка, РКУП и т.д.).

Выявлено положительное влияние технологической наследственности на уровень и характер распределения НДС в элементах гибкого трубопровода, формирующегося в процессе их изготовления. Установлено, что прочность гибкого трубопровода с наличием элементов из наноструктурного титанового сплава ВТ6 при статическом нагружении практически в 2 раза выше, чем для аналогичных объектов из обычного ВТ6.

3. Исследована теоретически и экспериментально усталостная многоцикловая прочность элементов конструкций из обычных и объемных наноструктурных титановых сплавов Ti-6Al-4V.

Установлено, что предел выносливости гладких образцов из наноструктурного сплава на 20% выше, чем предел выносливости образцов из обычного титанового сплава.

Выявлено, что при симметричном цикле нагружения предел выносливости пластины с отверстием из обычного сплава Ti-6Al-4V практически в два раза меньше, чем для аналогичных деталей из наноструктурного материала.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Разработанная модель, учитывающая влияние технологической наследственности РКУП на НДС и усталостную прочность элементов конструкций, обеспечивает существенное уточнение прогноза предела выносливости деталей на стадии проектирования и разработки технологического процесса.

2. Результаты исследования НДС в законцовке гибкого трубопровода внедрены на предприятии УАП ОАО «Гидравлика» и позволили оптимизировать режимы технологического процесса изготовления гибкого трубопровода и его комплектующих, сформировать благоприятное остаточное напряженно-деформированное состояние в деталях и увеличить прочность конструкции в целом.

3. Результаты научных исследований данной работы могут быть использованы при проектировании элементов конструкций из объемных наноструктурных материалов с учетом технологической наследственности.

**Методы исследования.** Работа выполнена на основе классических методов теории упругости, теории пластичности и механики деформируемого твердого тела. Численный расчет осуществлен на базе метода конечных элементов с применением программно-вычислительных комплексов ANSYS, Deform 3D. Анализ и обработка результатов экспериментов выполнены классическими статистическими методами.

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

- методика расчета НДС в типовых элементах конструкций с концентраторами напряжений (пластина с отверстием, стержень с выточкой), выполненных из наноструктурного материала, с учетом технологической наследственности в заготовке, сформированной при РКУП;
- результаты расчета остаточных напряжений и деформаций в законцовке гибкого трубопровода из обычного и наноструктурного титанового сплава ВТ6 с учетом «истории» нагружения в отдельных деталях, полученных при различных видах обработки (гидравлическая штамповка, РКУП и т.д.).
- результаты теоретического и экспериментального исследования усталостной многоцикловой прочности элементов конструкций из обычного и наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V.

**Достоверность** результатов и выводов, содержащихся в диссертационной работе, основывается на фундаментальных положениях механики деформируемого тела и сопоставлением результатов численных решений с результатами соответствующих экспериментальных исследований, проведенными на производственной базе ОАО УАП «Гидравлика» и ФГБОУ ВПО УГАТУ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2010, 2012, 2013), 5-ой региональной зимней школе-семинаре аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы в науке и технике» (г. Уфа, 2012, 2014).

**Публикации.** Основные результаты диссертации отражены в 11 печатных работах, в том числе 3 в рецензируемых изданиях из списка ВАК и двух патентах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы. Содержит 168 страницы машинописного текста, включающего 91 рисунок и библиографический список из 120 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и научная новизна, решаемые задачи, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор работ, посвященных конструкционным наноматериалам, полученным методами ИПД. Выполнен анализ существующих численных моделей описания процесса наноструктурирования путем РКУП.

Показано, что объемные наноматериалы характеризуются уникальными механическими свойствами. Получение наноструктуры в материале позволяет повысить его предел текучести и усталостную прочность практически в 1,5-2 раза.

В результате экспериментальных исследований объемных наноматериалов, установлено, что в заготовках, подвергнутых ИПД, наблюдается неоднородное распределение накопленных пластических деформаций. Особенно это проявляется при РКУП. Известно, что неравномерное распределение пластических деформаций и остаточных напряжений оказывают существенное влияние на прочность элементов конструкций. Исследование влияния технологической наследственности на НДС деталей из объемных наноматериалов позволит уточнить прогноз их предела выносливости. Кроме того, отсутствуют работы по изучению НДС в деталях, подвергнутых последовательной обработке методом РКУП и пластического деформирования (гидравлическая штамповка, обжатие, раскатка) или посадки с натягом (запрессовка).

На основании анализа изложенного материала сформулированы цель и задачи исследования.

**Второй раздел** посвящен исследованию технологической наследственности в заготовках (остаточные напряжения, степени накопленных деформаций, физико-механические свойства), связанной с формированием в материале наноструктурного состояния методом РКУП.

Метод РКУП позволяет формировать наноструктурное состояние в конструкционных материалах путем многопроходного деформирования по различным маршрутам с высоким уровнем пластических деформаций. Деформирование осуществляется продавливанием заготовки в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями, ориентированными по отношению друг к другу под углом.

В качестве примера на рисунке 1, *а*, *б* представлены результаты исследований внешнего вида зерен в обычном титановом сплаве Ti Grade 4 до обработки методом РКУП и по ее окончании, проведенных в НИИ ФПМ УГАТУ.

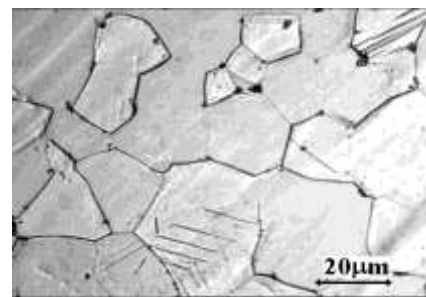
*а**б*

Рисунок 1 – Вид зерен наноструктурного (УМЗ) и обычного (крупнозернистого) титанового сплава Ti Grade 4:

*а* – наноструктурный титановый сплав; *б* – крупнозернистый Ti Grade 4

Таким образом, по окончании обработки в материале формируются наноструктурное состояние и прочностные свойства. На рисунке 2 представлены кривые деформирования для материала Ti-6Al-4V. Установлено, что обработка методом РКУП приводит к существенному увеличению предела текучести и кратковременной прочности порядка 50-52%. При этом, наблюдается снижение пластичности материала с 12% до 3.2%.

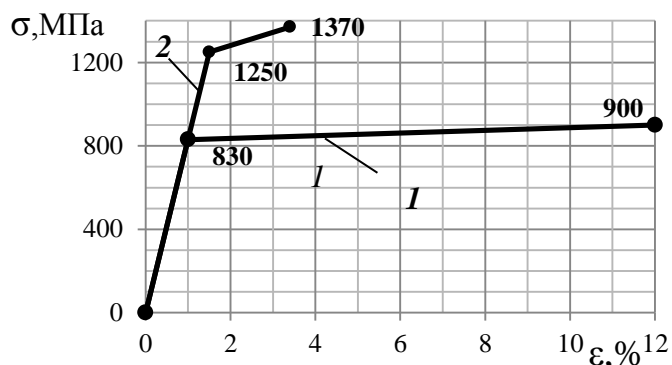


Рисунок 2 – Диаграмма растяжения обычного (кривая 1) и наноструктурного (кривая 2) титанового сплава Ti-6Al-4V

При исследовании распределения интенсивности пластической деформации  $\epsilon_i$  в заготовке из титанового сплава Ti-6Al-4V установлено, что после первого прохода  $\epsilon_i$  меняется от 0,65 до 1,15, после второго – от 1,15 до 2,2, после третьего – от 2,2 до 3,4, после четвертого – от 3,4 до 4,4. Т.е. неравномерность распределения деформаций после первого прохода составила 43,4%, а после четвертого – 20,5%. Таким образом, реализация многопроходной схемы РКУП приводит к снижению неравномерности распределения деформаций.

В результате анализа характера распределения технологических напряжений в заготовке после первого прохода установлено, что максимальные напряжения формируются на поверхности заготовки, а минимальные в центральной части, достигая значений  $\sigma_i^* = (0.35 \div 0.6)\sigma_T$  и  $\sigma_i^* = (0.1 \div 0.3)\sigma_T$  соответственно. При этом в зоне контакта заготовки с наружным радиусом штампа уровень остаточных напряжений выше на 25%, чем на поверхности, контактирующей с внутренним радиусом штампа, и выше на 25–30%, чем в центральном сечении. При многопроходной схеме РКУП происходит снижение разницы между максимальными и минимальными технологическими напряжениями. Например, после четвертого прохода разница между напряжениями на нижней и верхней поверхности не превышает 15–20%.

**В третьей главе** приведена методика расчета НДС в типовых элементах конструкций с концентраторами напряжений (пластина с отверстием, стержень с выточкой), из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V, с учетом технологической наследственности в заготовке, сформированной при РКУП. Также представлены результаты исследований полей напряжений и деформаций в типичных элементах конструкций, выполненных из объемных наноструктурных титановых сплавов и обычных материалов, возникающих при одноосном нагружении. Расчет проводился на следующих типах элементов конструкций:

1. Пластины размерами  $a \times b = 60 \times 60$  мм с центральным отверстием диаметром  $d = 10$  мм:

- пластина с отверстием из обычного и наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V;

- пластина из обычного титанового сплава Ti–6Al–4V с наноструктурным слоем вокруг отверстия;

- пластина из обычного материала с запрессованным в отверстие кольцом из наноструктурного титанового сплава Ti–6Al–4V.

2. Стержни круглого поперечного сечения диаметром  $d$  с выточкой глубиной  $t$ , радиусом впадины  $r$  и углом раствора  $\alpha=60^\circ$ :

- стержни с выточкой из обычного и наноструктурного материала;

- стержни из обычного титанового сплава с наноструктурным слоем в области концентратора напряжений.

Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния в пластинах при одноосном растяжении интенсивностью  $\sigma_0$  ( $\sigma_0=200\div 500$  МПа). Установлено, что при расчете НДС без учета технологической наследственности при упругом и упругопластическом одноосном нагружении характер распределения полей напряжений и деформаций в пластине из наноструктурных и обычных материалов одинаковый. Определено, что при упругом нагружении максимальные напряжения возникают на поверхности концентратора, а при упругопластическом смещаются вглубь тела на расстояние равное глубине распространения пластических деформаций. Выявлено, что глубина распространения пластических деформаций в пластинах из наноструктурных материалах при одноосном растяжении интенсивностью  $\sigma_0=500$  МПа в 4 раза меньше, чем в обычных.

Исследование остаточных напряжений формирующихся при одноосном упругопластическом нагружении и дальнейшей разгрузки в деталях из обычного и наноструктурного материала показало, что характер распределения остаточных напряжений в данных элементах конструкций существенно не отличается. Установлено, что максимальные сжимающие остаточные напряжения возникают на контуре отверстия, а максимальные растягивающие остаточные напряжения образуются в области однородного напряженного состояния.

Проведена оценка влияния толщины наноструктурного слоя в элементах конструкций на характер НДС при одноосном растяжении интенсивностью  $\sigma_0$ . Исследование проводилось на пластинах с наноструктурным слоем по контуру отверстия, при этом толщина слоя варьировалась в пределах  $s = (0,05\div 0,3)d$ . Установлено, что в пластине при наличии наноструктурного слоя толщиной  $s = (0,05\div 0,2)d$  в случае упругопластического одноосного нагружения образуются две зоны пластических деформаций. Первая развивается в слое из наноструктурного материала, а вторая в области обычного материала. Выявлено, что между зонами пластичности имеется упругий слой материала. Увеличение толщины наноструктурного слоя  $s$  приводит к снижению зоны пластических деформаций в обычном материале. При  $s > 0,2d$  образование зоны пластического течения наблюдается только в наноструктурном материале и отсутствует во втором слое пластины из обычного материала.

Отметим, что в пластине из обычного материала с наноструктурным слоем толщиной  $s = (0,05\div 0,2)d$  по окончании одноосного упругопластического нагружения и разгрузки в теле пластины формируются поля остаточных осевых напряжений  $\sigma_y$  с двумя участками сжимающих и растягивающих напряжений:



один возникает на контуре отверстия, а второй – на границе между слоями. Данный характер распределения обусловлен различиями физико-механических свойств материала в наноструктурном слое и в крупнозернистом объеме тела пластины. При  $s > 0.2d$  характер распределения полей напряжений подобен характеру, возникающему в деталях с однородным структурным состоянием.

Выполнен расчет НДС в пластинах из обычных материалов с запрессованными в отверстия кольцами из наноструктурного титанового сплава Ti–6Al–4V при одноосном нагружении интенсивностью  $\sigma_0$ . Толщина кольца  $s^*$  варьировалась в пределах  $s^* = 2 \div 10$  мм. Исследование состояло из следующих этапов:

1. Расчет технологической наследственности после РКУП. Результаты исследований приводятся во второй главе.
2. Моделирование процесса посадки с натягом наноструктурного кольца в отверстие пластины.
3. Расчет полей напряжений, формирующихся в процессе упругого деформирования пластины из обычного материала с запрессованным наноструктурным кольцом.

Расчет НДС на втором этапе исследования установил, что после запрессовки в кольцо возникают сжимающие напряжения. При этом минимальные напряжения формируются на глубине  $t$  от кромки внутреннего диаметра кольца, а максимальные – у стыка кольца с пластиной. Выявлено, что при увеличении толщины кольца  $s^*$  происходит снижение уровня напряженного состояния. Например, при толщине кольца  $s^* = 5$  мм уровень максимальных напряжений  $\sigma_y$  по сравнению с кольцом толщиной  $s^* = 2$  мм снижается на 53%, а минимальных – на 65%. Отметим, что в пластине технологические напряжения принимают растягивающий характер. При этом максимальные напряжения наблюдаются в области контакта пластины с кольцом. Установлено, что с увеличением толщины кольца наблюдается рост уровня максимальных напряжений. При этом зависимость напряженного состояния от толщины кольца имеет линейный характер, так увеличение толщины на 1 мм соответствует росту уровня напряжений на 5%.

Расчеты НДС при одноосном растяжении пластины выявили, что при нагружении в кольце происходит снижение уровня сжимающих напряжений. Так, например, минимальные напряжения формируются на кромке кольца, а максимальные – в зоне стыка кольца с пластиной. При этом в самом теле пластины характер распределения осевых напряжений не изменился, наблюдается только рост уровня напряжений.

Установлено, что при одноосном нагружении пластины интенсивностью  $\sigma_0 \geq \sigma_{кр}$  происходит потеря контакта между кольцом и пластиной.

При этом максимальное значение  $\sigma_{кр}$  достигает при толщине кольца  $s_1 = 6$  мм (рисунок 3). При дальнейшем увеличении толщины кольца уровень критической растягивающей нагрузки снижается.

Отметим, что наличие технологической наследственности в заготовке кольца не влияет на прочность соединения, т.к. соединение теряет работоспособность при потере контакта между пластиной и кольцом, а как отмечалось ранее изменение напряженного состояния в кольце при одноосном нагружении не оказывает влияние на НДС в пластине.

Исследовано влияние технологических остаточных напряжений, сформированных после РКУП в заготовке и накатки кольцевой канавки на стержне, на уровень концентрации напряжений в стержнях диаметром  $d=6$  мм при упругом одноосном нагружении. Расчет проводился в три этапа:

1. Расчет технологической наследственности после РКУП. Результаты исследований приводятся во второй главе.
2. Моделирование технологического процесса формирования кольцевой канавки на стержне путем накатывания.
3. Расчет полей напряжений формирующихся в процессе упругого деформирования стержня с кольцевой канавкой.

Результаты исследований показали, что максимальные напряжения формируются на глубине  $t_1/d = 0.23$  от кромки канавки ( $t_1$  – глубина формирования максимальных сжимающих напряжений). При этом характер остаточных напряжений соответствует сжимающим напряжениям. Зона растягивающих напряжений возникает на глубине  $t_2/d = 0.35$  ( $t_2$  – глубина формирования максимальных растягивающих напряжений). Выявлено, что при упругом одноосном нагружении наличие технологических напряжений существенно снижает негативное влияние концентратора напряжений. Так, например, для стержня с канавкой ( $d = 6$  мм,  $r/f = 0.1$ , угол раствора  $\alpha=60^\circ$ , где  $r$  и  $f$  – радиус и глубина впадины канавки соответственно) из наноструктурного материала уровень напряжений в зоне концентратора напряжений при упругом одноосном нагружении в 2,6 раза больше, чем уровень напряжений, рассчитанный с учетом технологической наследственности для наноматериалов.

Выполнен расчет НДС и определены остаточные напряжения в стержнях с выточкой при упругом и упругопластическом деформировании. Деформирование осуществлялось при одноосном растяжении деталей интенсивностью  $\sigma_0$ , меняющейся в диапазоне от 200 до 500 МПа. Установлено, что при расчете НДС без учета технологической наследственности при упругом и упругопластическом одноосном нагружении характер распределения полей напряжений и деформаций в стержнях из наноструктурных и обычных

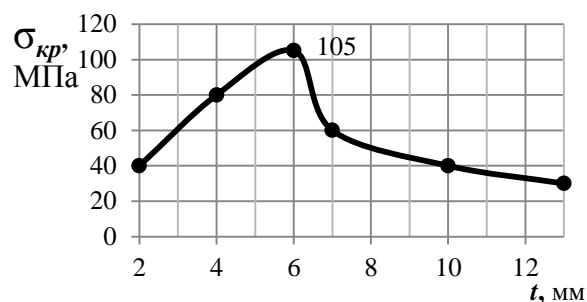


Рисунок 3 – Зависимость максимальной интенсивности нагружения  $\sigma_{кр}$  от толщины кольца

материалов одинаковый. Определено, что при упругом нагружении максимальные напряжения возникают на кромке выточки, а при упругопластическом смещаются вглубь тела на расстояние равное глубине распространения пластических деформаций. Выявлено, что глубина распространения пластических деформаций в стержнях из наноструктурных материалов при одноосном растяжении интенсивностью  $\sigma_0 = 500$  МПа на 20% меньше, чем в обычных.

Проведена оценка влияния толщины наноструктурного слоя по контуру канавки в стержне на характер НДС при одноосном растяжении интенсивностью  $\sigma_0$ . При исследовании толщина слоя  $s$  варьировалась от 0,5 мм до 1 мм. Установлено, что характер распределения полей напряжений и деформаций подобен НДС при нагружении стержней из материала с однородным структурным состоянием. Т.е. наличие наноструктурного слоя не оказывает существенного влияния на характер напряженного состояния.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования НДС в законцовке гибкого трубопровода (рисунок 4) с учетом технологической наследственности в отдельных элементах конструкции, полученных в результате различных видов обработки (гидравлическая штамповка, РКУП и т.д.).

Гибкие трубопроводы (рукав) применяются в условиях высоких рабочих нагрузок и сложной схемы подключения в гидро-, пневмо- и топливных системах для транспортировки рабочей среды. Основную нагрузку при эксплуатации в конструкции гибких трубопроводов испытывают законцовки, которые обеспечивают герметичность и надежность стыковки.



Рисунок 4 – Внешний вид гибкого трубопровода

В качестве примера объектом исследования являлся рукав, использующийся в двигателе для подачи воздуха. Анализ результатов периодических испытаний, дефектов и отказов работы данного изделия установил, что при статическом и циклическом изменении нагрузок разрушение гибкого трубопровода происходит в законцовке. Данный элемент конструкции является соединением двух деталей: вкладыша, изготовленного из нержавеющей стали 12X18H10T ( $\sigma_{0.2} = 210$  МПа,  $\sigma_B = 670$  МПа,  $E = 210$  ГПа), и ниппеля, выполненного из титанового сплава ВТ6 ( $\sigma_{0.2} = 700$  МПа,  $\sigma_B = 1150$  МПа,  $E = 115$  ГПа). Причиной потери работоспособности и разрушения являлись следующие факторы:

1. Вырыв ниппеля из соединения законцовки при нагружении внутренним давлением  $p_{\text{раб}}$ . Исследование данного разрушения установило, что причиной является отклонения геометрических размеров деталей. Это привело к снижению контактного давления между ниппелем и вкладышем.

2. Разрушение ниппеля при нагружении внутренним давлением свыше  $3 \times p_{\text{раб}}$ . Причиной потери работоспособности является разрушения материала

ниппеля в области кольцевых канавок, использующихся для создания дополнительного сцепления между деталями в законцовке.

С целью повышения прочности законцовки трубопровода предлагается использовать при изготовлении ниппеля наноструктурный титановый сплав ВТ6 ( $\sigma_{0,2} = 900$  МПа,  $\sigma_B = 1620$  МПа,  $E = 115$  ГПа) без изменения его конструкции.

Серийный технологический процесс изготовления законцовки трубопровода и его комплектующих включает в себя механическую обработку ниппеля, гидравлическую штамповку вкладыша и развальцовку собранного узла. Учитывая специфику серийного технологического процесса и получения наноструктурного материала, исследование проводилось в несколько этапов:

1. Расчет технологической наследственности в заготовке после РКУП.
2. Моделирование процесса гидравлической штамповки вкладыша.
3. Расчет полей напряжений формирующихся при изготовлении законцовки трубопровода методом пластического деформирования (развальцовки).

В ходе исследования было изучено формирования НДС и остаточных напряжений и деформаций в деталях (ниппель, вкладыш) на всех этапах технологического процесса.

Выявлено влияние технологической наследственности, сформированной в деталях законцовки трубопровода. Установлено, что по окончании изготовления законцовки уровень максимальных остаточных тангенциальных напряжений в наноструктурном ниппеле на 40% ниже, чем в ниппеле из обычного материала, а уровень максимальных остаточных осевых напряжений – на 28%. Снижение уровня напряжений в ниппеле из наноструктурного сплава объясняется влиянием полей технологических напряжений, наведенных на предыдущих операциях, и высокими физико-механическими свойствами наноструктурного титанового сплава ВТ6.

Анализ полей технологических напряжений в законцовке из крупнозернистых материалов установил, что разрушение ниппеля при статическом нагружении внутренним давлением свыше  $3 \times p_{\text{раб}}$  происходит по причине суммирования напряжений от статических нагрузок и технологических напряжений. Определено, что прочность законцовки гибкого трубопровода с применением наноструктурного материала повышается практически в 2 раза по сравнению с прочностью аналогичных конструкций из обычных материалов.

Для проверки достоверности полученных результатов выполнены экспериментальные работы по определению деформированного состояния деталей на основных технологических операциях. Было проведено исследование деформированного состояния деталей законцовки



а



б

Рисунок 5 – Внешний вид трубчатых заготовок (а) и вкладыша (б)

трубопровода и самого узла до начала технологической операции и по ее окончанию. На рисунке 5 в качестве примера приведен внешний вид трубчатой заготовки до операции гидравлической штамповки и вкладыша по окончанию.

Сравнение полученных экспериментальных результатов с расчетными установило, что отклонение значений деформаций не превышает 10 %.

**В пятой главе** представлены результаты численного расчета и экспериментального исследования усталостной многоциклового прочности элементов конструкций (гладкие образцы, стержни с выточкой и пластины с отверстием).

Испытание гладких образцов проводилось в условиях изгиба с вращением с частотой  $f=50$  Гц при симметричном цикле нагружения и базе испытаний  $N=10^7$  в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Установлено, что предел выносливости  $\sigma_{-1}$  образцов из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V достигает значения 740 МПа, образцов из обычного титанового сплава – 600 МПа.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование усталостной многоциклового прочности стержней с выточкой. Анализ результатов численного расчета выявил, что предел выносливости  $\sigma_{-1Д}$  стержней с выточкой из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V при симметричном нагружении (циклическом изгибе с вращением) соответствует значению  $\sigma_{-1Д}^P = 222$  МПа ( $\sigma_{-1Д}^P$  – усталостная прочность, рассчитанная теоретически). Экспериментальные исследования усталостной прочности стержней установили, что  $\sigma_{-1Д}^Э$  достигает уровня 220 МПа ( $\sigma_{-1Д}^Э$  – усталостная прочность определенная экспериментально). Разница между результатами численного расчета и экспериментальными данными составляет не более 5%.

Однако при числе циклов  $N = 10^4$  анализ результатов численного расчета выявил, что разрушение детали происходит при уровне максимальных напряжений 252 МПа, а при эксперименте напряжения цикла достигают значения 325 МПа. Разница между значениями составляет 22,5%. Таким образом, заметим, что при приближении значения напряжений цикла к малоциклового области, разница между результатами численного расчета и эксперимента увеличивается. При этом в пределах многоциклового области ( $N \geq 10^5$ ), отклонение не превышает 10%.

Исследования усталостной прочности пластины с отверстием при ее симметричном растяжении–сжатии установили, что предел выносливости  $\sigma_{-1Д}$  для пластины из обычного титанового сплава почти в два раза меньше, чем для аналогичной детали из наноструктурного материала. При этом предел выносливости для пластины из крупнозернистого материала составляет 105 МПа,

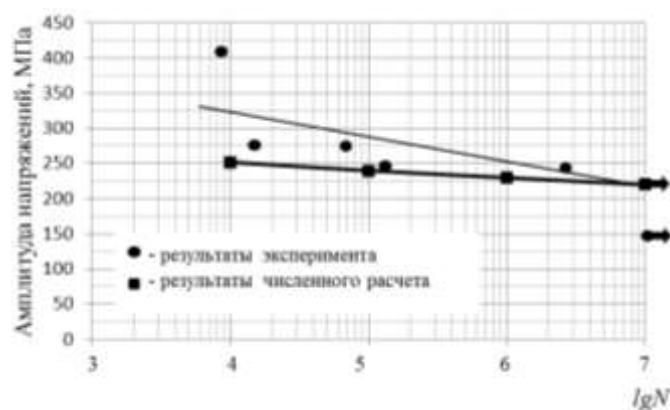


Рисунок 6 – Результаты усталостных испытаний стержня с выточкой при симметричном нагружении

а для пластины из наноструктурного сплава – 216МПа. Отметим, что при числе циклов  $N=10^4$ , разрушение пластины из обычного сплава Ti-6Al-4V происходит при уровне напряжений цикла – 179МПа, а детали из наноструктурного титана при 240МПа.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Разработана методика расчета НДС в типовых элементах конструкций с концентраторами напряжений (пластина с отверстием, стержень с выточкой) из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V, с учетом технологической наследственности в заготовке, сформированной при РКУП.

Исследовано влияние наноструктурного слоя в области концентратора напряжений в элементах конструкций на уровень и характер распределения напряжений и деформаций. Установлено, что в пластине при наличии наноструктурного слоя толщиной  $s = (0,05 \div 0,2)d$  в случае упругопластического одноосного нагружения формируются две зоны пластических деформаций, где первая развивается в слое из наноструктурного материала и вторая – в области обычного материала. При  $s > 0,2d$  образование зоны пластического течения наблюдается только в наноструктурном материале и отсутствует во втором слое пластины из обычного материала.

Выявлено положительное влияние технологической наследственности, сформированной после РКУП и накатки, на НДС в стержне с выточкой при одноосном нагружении. Определено, что уровень напряжений в зоне концентратора для стержней с выточкой из обычного и наноструктурного материалов (рассчитанного без учета технологической наследственности) при упругом одноосном нагружении в 2,6 раза выше, чем уровень напряжений, рассчитанный с учетом технологической наследственности.

2. Проведено исследование НДС в узлах сложной формы (на примере законцовки гибкого трубопровода) с учетом технологической наследственности в отдельных деталях, полученных в результате различных видов обработки (гидравлическая штамповка, РКУП и т.д.).

Выявлено влияние технологической наследственности, сформированной в деталях законцовки трубопровода. Установлено, что по окончании изготовления законцовки уровень максимальных остаточных тангенциальных напряжений в наноструктурном ниппеле на 40% ниже, чем в ниппеле из обычного материала, а уровень максимальных остаточных осевых напряжений – на 28%. Снижение уровня напряжений в ниппеле из наноструктурного сплава объясняется влиянием полей технологических напряжений, наведенных на предыдущих операциях, и высокими физико-механическими свойствами наноструктурного титана ВТ6. Установлено, что прочность гибкого трубопровода с наличием элементов из наноструктурного титанового сплава ВТ6 при статическом нагружении практически в 2 раза выше, чем для аналогичных объектов из обычного ВТ6.

3. Экспериментально установлено, что предел выносливости для обычного титанового сплава Ti-6Al-4V на 20% меньше, чем для наноструктурного материала. При этом  $\sigma_{-1}$  для наноструктурного Ti-6Al-4V составляет 750 МПа, а для обычного – 600 МПа.

Установлено, что при симметричном циклическом изгибе предел выносливости стержня с выточкой из наноструктурного титанового сплава соответствует значению 220 МПа.

Выявлено, что предел выносливости  $\sigma_{-1д}$  для пластин из обычного титанового сплава почти в два раза меньше, чем для аналогичных деталей из наноструктурного материала. Предел выносливости для пластины из крупнозернистого материала достигает значения 105 МПа, а для пластины из наноструктурного сплава – 216 МПа.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

#### **Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:**

1. Жернаков, В.С. Влияние конструктивно-технологических факторов на величину остаточных напряжений при упрочнении отверстий / В.С. Жернаков, Т.Н. Мардимасова, М.Р. Арсланов // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т.15, №4(44). – С. 90-94.
2. Жернаков, В.С. Особенности распределения остаточных напряжений в деталях неразъемных соединений, изготовленных из наноструктурного титанового сплава ВТ6/ В.С. Жернаков, Т.Н. Мардимасова, М.Р. Арсланов // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т.16, №5(50). – С. 83-88.
3. Жернаков, В.С. Особенности распределения остаточных напряжений в элементах конструкций с концентраторами напряжений из наноматериала / В.С. Жернаков, Т.Н. Мардимасова, М.Р. Арсланов // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т.17, №3(56). – С. 260 – 265.
4. **Пат.2493930 Российская Федерация, МПК В21J 5/08 В21J 13/02.** Матрица для высадки многогранных деталей [Текст] / Жернаков В.С., Валиев Р.Ш., Газизов Х.Ш., Фаизов Ю.Р., Арсланов М.Р.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО УГАТУ. – № 2012114010/02; заявл. 10.04.2012; опубл. 27.09.2013, Бюл. №27 – 5с: ил.
5. **Пат. 2496596 Российская Федерация, МПК В21J 5/08, В21J 13/02.** Матрица для высадки многогранных деталей [Текст] / Жернаков В.С., Валиев Р.Ш., Газизов Х.Ш., Фаизов Ю.Р., Арсланов М.Р.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО УГАТУ. – № 2012112568/02; заявл.30.03.2012; опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30 – 5с: ил.

#### **В других изданиях, включая труды всероссийских и международных НТК:**

6. **Арсланов, М.Р.** Исследование напряженно-деформированного состояния в местах упрочнения элементов конструкций/ М.Р. Арсланов.//Российская

научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения». – 2011. – Т.3. – С. 77-82.

7. **Арсланов, М.Р.** Напряженно-деформированное состояние в трубчатых заготовках при гидропластической штамповке/ М.Р. Арсланов. //Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения». –2012. – Т.1. – С. 136.

8. **Арсланов, М.Р.** Особенности распределения остаточных напряжений в деталях наноструктурного титанового сплава ВТ6 при изготовлении сложных неразъемных соединений/ М.Р. Арсланов, В.Р. Акбашев //Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения». – 2012. – Т.1. – С. 137-138.

9. **Арсланов, М.Р.** Изменение напряженно-деформированного состояния в деталях при изготовлении сложных неразъемных соединений / М.Р. Арсланов.//Седьмая Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники». – 2012. – Т.2. – С. 82–85.

10. **Арсланов, М.Р.** Остаточные напряжения при гидропластической штамповке в трубчатых заготовках/ М.Р. Арсланов. // Седьмая Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых. Актуальные проблемы науки и техники. – 2012. – Т.2. – С. 86–89.

11. **Арсланов, М.Р.** Численный расчет усталостной прочности элементов конструкций / М.Р. Арсланов. //Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения». –2013. – Т.1.–С.81–83.

12. **Арсланов, М.Р.** Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность элементов конструкций/ М.Р. Арсланов. //Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения». – 2013 –Т.1.–83–84.

13. **Арсланов, М.Р.** Моделирование технологических остаточных напряжений, сформированных при получении соединения с натягом / М.Р. Арсланов, В.Р. Акбашев. // Девятая Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники». – 2014 –Т.1.–83–84.