

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

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

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Жернаков Владимир Сергеевич

Уфа – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
Введение	8
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОБЪЕМНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ	13
1.1. Применение наноматериалов в конструкциях современных изделий ...	15
1.2. Влияние конструктивно-технологических факторов на напряженно- деформированное состояние в элементах конструкциях	16
1.3. Расчет технологической наследственности в элементах конструкций ...	22
1.3.1. Методы определения технологической наследственности в осесимметричных деталях после гидравлической штамповки	24
1.3.2. Методы определения технологической наследственности в деталях, изготовленных пластической деформацией	26
Основные выводы по главе 1	28
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ, СФОРМИРОВАННОЙ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ (РКУП) ...	29
2.1. Методика расчета напряженно-деформированного состояния и технологической наследственности после РКУП	32
2.2. Анализ технологической наследственности в заготовках после РКУП	34
Основные выводы по главе 2	39
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОБЪЕМНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ	40

3.1.Методика расчета напряженно-деформированного состояния в элементах конструкций из объемных наноструктурных материалов при наличии концентраторов напряжений.....	40
3.2.Расчет напряженно-деформированного состояния в пластинах из обычного и наноструктурного материала при одноосном нагружении ...	47
3.2.1.Анализ напряженно-деформированного состояния в пластине из обычного и наноструктурного материала при упругом и упругопластическом одноосном нагружении	51
3.2.2.Анализ остаточных напряжений в пластине из обычного и наноструктурного материала после разгрузки	58
3.3.Расчет напряженно-деформированного состояния в пластине с запрессованным в отверстие кольцом из наноструктурного материала при одноосном нагружении	62
3.3.1.Расчет технологических остаточных напряжений, сформированных при получении соединения с натягом	62
3.3.2.Влияние одноосного нагружения на напряженно-деформированное состояние пластины с запрессованным кольцом	65
3.3.3.Влияние технологической наследственности, после РКУП, на характер распределения НДС в пластине с кольцом из наноструктурного материала при упругом одноосном нагружении	67
3.4.Расчет напряженно-деформированного состояния в стержнях с выточками из обычного и наноструктурного материала при одноосном нагружении	70
3.4.1. Анализ напряженно-деформированного состояния в стержнях с выточкой из обычного и наноструктурного материала при упругом и упругопластическом одноосном нагружении	72

3.4.2. Анализ остаточного напряженного и деформированного состояния в стержнях с выточкой из обычного и наноструктурного материала после разгрузки	77
3.5. Расчет напряженно-деформированного состояния в стержнях из наноструктурного материала при одноосном нагружении с учетом технологической наследственности после РКУП и накатки кольцевой канавки	81
3.5.1. Моделирование процесса накатки кольцевой канавки на стержнях из наноструктурного материала с учетом технологической наследственности после РКУП	82
3.5.2. Анализ напряженно-деформированного состояния и технологической наследственности после накатки кольцевой канавки	82
3.5.3. Анализ напряженно-деформированного состояния в стержне с кольцевой канавкой при одноосном нагружении с учетом технологической наследственности	85
Основные выводы по главе 3	87
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ОБЪЕКТАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ В ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ	93
4.1. Введение	93
4.1.1. Анализ технологического процесса	96
4.2. Моделирование гидропластической штамповки детали типа вкладыш	98
4.2.1. Методика расчета НДС и остаточных напряжений, сформированных после гидропластической штамповки в тонкостенных трубчатых заготовках из нержавеющей стали 12Х18Н10Т	98

4.2.2. Анализ напряженно-деформированного состояния и остаточных напряжений	103
4.2.3. Влияние конструктивных факторов на напряженно-деформированное состояние в детали типа вкладыш	106
4.2.4. Экспериментальное исследование деформированного состояния вкладыша	107
4.2.5. Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численного решения	112
4.3. Моделирование технологического процесса изготовления неразъемного соединения в законцовке трубопровода с применением материалов с обычным структурным состоянием	112
4.3.1. Методика численного расчета НДС и остаточных напряжений в деталях законцовки трубопровода, изготовленного методом пластической деформации	113
4.3.2. Анализ напряженно-деформированного состояния в деталях неразъемного соединения	116
4.3.3. Экспериментальное исследование деформированного состояния в законцовке трубопровода	118
4.3.4. Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численного решения	122
4.4. Моделирование технологического процесса изготовления неразъемного соединения в законцовке трубопровода с применением объемных наноструктурных материалов	122
4.4.1. Анализ напряженно-деформированного состояния в деталях неразъемного соединения	123
4.5. Сопоставление напряженного состояния и остаточных напряжений в деталях законцовки трубопровода, изготовленных из крупнозернистых и наноструктурных материалов	125

Основные выводы по главе 4	127
ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЦИКЛОВОЙ И МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОБЪЕМНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ	128
5.1.Методика расчета усталостной прочности конструкций при многоцикловом нагружении	128
5.1.1.Решение статической задачи	130
5.1.2.Приведение объемного напряженного к эквивалентному одноосному состоянию	130
5.1.3.Сведение асимметричного цикла напряжений к эквивалентному симметричному	131
5.1.4.Корректировка значений эквивалентных амплитудных напряжений для учета конструктивно-технологических факторов	132
5.1.5.Расчет числа циклов N , при которых происходит усталостное разрушение конструкции	134
5.1.6.Вычисление коэффициентов запаса усталостной прочности по долговечности и амплитудным напряжениям	136
5.2.Расчет усталостной прочности стержня с выточкой при симметричном циклическом изгибе	136
5.3.Расчет усталостной прочности пластины с отверстием при симметричном циклическом растяжении – сжатии	142
5.4 Экспериментальное исследование усталостной многоцикловой прочности элементов конструкций из обычного и наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V	148
Основные выводы по главе 5	151

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ	153
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	155

Введение

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

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 состояния 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. Работа содержит 167 страниц машинописного текста, включающего 91 рисунок и библиографический список из 117 наименований.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОБЪЕМНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

В настоящее время создание новых изделий в авиационной и космической технике ограничено высокими требованиями конструкционной прочности. Применение традиционных материалов не может обеспечить должным образом выполнение этих параметров. Конструктивные же методы повышения прочности приводят к увеличению массы конструкций и усложнению технологии изготовления [52].

Одно из решений данной проблемы связано с разработкой новых материалов с высокими показателями механических свойств. Возможности легирования к настоящему времени во многом уже исчерпаны. Кроме того, разработка совершенно новых сплавов требует больших материальных затрат по созданию новых композиций, их сертификации и внедрению. Между тем в последние десятилетия интенсивно развивается новое направление в материаловедении и обработке материалов, заключающееся в формировании в металлах и сплавах наноструктуры. На базе этого направления можно создать принципиально новый комплекс физико-химических и механических свойств в обычных конструкционных материалах [97, 13].

Таким образом, создание объемных наноматериалов на сегодняшний день является одной из наиболее востребованной, но в то же время и наименее изученной областью. Успешная реализация первоочередных задач по этому направлению требует проведения комплексных исследований по широкому спектру нанотехнологий, находящихся в настоящее время на разных периодах освоения.

Наиболее распространенным способом получения наноструктуры в материале является метод интенсивной пластической деформации (равноканальное угловое прессование (РКУП); всесторонняя ковка; циклическая экструзия и сжатие; многократное рифление, упрочнение и т.д.). Основной идеей метода является деформирование заготовки с большими степенями деформации, при температуре $T < (0,3-0,4)T_{пл}$ и высоком давлении. Результаты исследования

механических свойств материалов, изготовленных данным методом, свидетельствует о значительном повышении усталостной и статической прочности, предела текучести и т.д. [2 – 4, 22 – 24, 27, 45]

В работах [87, 88] исследовали усталостную прочность титана технической чистоты VT1-0 и сплава VT6 в состояниях заводской чистоты и после РКУП. Предел прочности титана после РКУП достигает значения 1140 МПа, а предел текучести – 960 МПа. Предел выносливости титана VT1-0 на базе 10^6 циклов в состоянии поставки составлял 350 МПа, а после – 520 МПа. В сплаве VT6 соответственно 570 и 670 МПа. В ультрамелкозернистом титане после РКУП предел усталости возрастает в 1,67 раз, при этом наблюдается и повышение чувствительности к надрезу.

Также, достаточно перспективным способом повышения физико-механических свойств является формирование в материале наноструктурного состояния только в поверхностном слое [117], что весьма эффективно для элементов конструкции, работающих в условия повышенного износа или усталости.

YaMin, YongmingXing, DaiFulong, LuKe, LuJian [118] провели исследование по разработке методов получения нанокристаллического слоя. Нанокристаллический слой может быть получен путем механической или термической активации, например, дробеструйной обработки, плавления и кристаллизации. В процессе формирования нанокристаллического слоя в поверхностном слое деталей возникают остаточные напряжения. Проведенные экспериментальные исследования по измерению остаточных напряжений выявили, что значение напряжений достигают уровня 530 МПа и имеют сжимающий характер. Таким образом, проводимая механическая или термическая активация с целью формирования наноструктуры позволяет увеличить предел текучести почти в полтора-два раза по сравнению с основным материалом. Отметим, что наличие сжимающих напряжений в наноструктурном слое деталей позволяет предотвратить преждевременное развитие трещин.

Таким образом, наноструктурные объемные материалы отличаются большой прочностью при статическом и усталостном нагружении, а также твердостью по сравнению с материалами с крупнозернистой структурой [67-69], хотя и имеют ряд недостатков [100, 111]. Например, предел прочности увеличивается по сравнению с обычным состоянием в 1,5-2 раза, а пластичность – либо уменьшается очень незначительно, либо возрастает, как для Ni_3Al в 4 раза. Поэтому основное направление их использования в настоящее время – это применение в качестве высокопрочных и износостойких материалов [55].

1.1 Применение наноматериалов в конструкциях современных изделий

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) является одним из крупнейших российских материаловедческих предприятий. В работе [78] представлены наиболее перспективные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ в области наноматериалов и нанотехнологий.

Еще одной ведущей организацией по разработке наноматериалов и их применению в РФ является ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». На базе этого предприятия проведены такие работы как: разработка наноструктурированных износ- и эрозионно-стойких покрытий с высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах и повышенными триботехническими характеристиками; разработка технологии получения наплавочных материалов с использованием нанопорошков для деталей и узлов, подверженных интенсивному износу; разработка технологии получения высокоэффективных узлов трения из анизотропных антифрикционных углепластиков и элементов из сферопластиков для глубоководных аппаратов и т.д. [28].

Объемные наноструктурные материалы находят широкое применение и в космической технике. Так в работе Л.С. Новикова, Е.Н. Ворониной [69] приведены сведения по применению наноматериалов в космической технике, также описана методология их подбора. Особый интерес предоставляет возможность их применения в конструкциях новых космических кораблей многоразового использования.

Использование наноматериалов также находит большое применение и в европейской авиационной промышленности, например в конструкциях нового самолета Airbus 380 [102].

В работе представителя израильской авиационной промышленности L. Boehm [99] рассмотрены основные преимущества применения наноматериалов в аэрокосмической технике. Так особенно выделяется увеличение долговечности и снижение веса летательного аппарата, а также повышенная прочность при высоких температурах.

Приведенный выше анализ литературных источников показывает, что создание новых образцов техники в авиационной, машиностроительной, нефтегазодобывающей и других отраслях промышленности практически невозможно без применения наноматериалов [57]. Однако, несмотря на значительное количество исследований, посвященных наноматериалам и их применению, тематика проектно-технологических работ по внедрению наноматериалов в конструкции современных изделий практически не затронута.

1.2 Влияние конструктивно-технологических факторов на напряженно-деформированное состояние в элементах конструкциях

В соответствии с принципами оптимального проектирования конструкций необходимо стремиться к тому, чтобы напряжения во всех точках были одинаковыми и приближались к допускаемым. Выполнение первого требования практически возможно лишь для достаточно простых конструктивных форм и слабо реализуемо для реальных машиностроительных изделий сложной пространственной формы. Это связано с тем, что строгое выполнение принципа равнопрочности требует значительного усложнения конструктивных форм, резко снижающего технологичность и увеличивающего стоимость конструкций. В инженерной практике в качестве компромиссного варианта используется принцип местного качества, заключающийся в локальном усилении перегруженных и ослаблении незначительно напряженных несущих элементов. Как отрицательное следствие таких решений часто возникает явление

концентрации напряжений, особенно опасное в условиях циклического нагружения [63, 66].

Под концентрацией напряжений понимается резкое местное изменение полей напряжений в деформируемом теле, вызванное различными источниками и причинами: конструктивными (резкое изменение формы и размеров сечений деталей, нарушение сплошности отверстиями и вырезами, многослойность конструкции из элементов с различными механическими свойствами материалов и т.д.); технологическими (шероховатость поверхности, резкое различие свойств материалов в поверхностном слое и в основном объеме в результате той или иной термомеханической обработки, наличие трещин технологического происхождения и т.д.); эксплуатационными (концентрация внешних силовых и температурных воздействий, трещины, возникшие в результате начала разрушения конструкции и т.д.).

Важная особенность явления концентрации состоит в том, что одновременно с резким повышением напряжений вблизи концентратора даже при исходном одноосном состоянии возникает плоское или объемное напряженное состояние, непосредственно влияющее на развитие пластических деформаций или трещин разрушения. Таким образом, несущая способность многих элементов конструкций обычно определяется их напряженным состоянием и условиями прочности в местах концентрации, где прежде всего, наступает предельное состояние и разрушение. Влияние концентрации напряжений на несущую способность в условиях хрупкого или вязкого разрушения, длительного статического, циклического или ударного нагружения, разумеется, будет различным [114]. Однако для оценки прочности в любых условиях необходимо установить наиболее точную картину распределения напряжений и деформаций в зоне концентрации в случае проявления различных свойств материала: упругости, пластичности и ползучести.

Пластические деформации, предшествующие разрушению, раньше возникают именно в зонах концентрации напряжений, а их развитие в большинстве случаев, особенно при циклическом нагружении, оказывается

определяющим для прочности. Отметим, что довольно распространенное представление о том, что для материалов конструкций, находящихся в пластическом состоянии, влияние концентрации напряжений при статическом нагружении несущественно, справедливо лишь для однократного статического нагружения. Однако такой случай на практике встречается редко. При малоцикловом и длительном статическом нагружении в условиях повышенных температур влияние концентрации напряжений ощутимо и в условиях пластичности материала [76].

Как отмечалось ранее, чувствительность к концентраторам напряжений в наноструктурных материалах выше, чем в крупнозернистых.

В работах [5, 39, 41, 90] авторы приводят результаты исследований напряженно-деформированного состояния резьбового соединения, изготовленных из крупнозернистых материалов, при статическом, ударном и циклическом нагружении. Разработаны методики по расчету концентрации напряжений в этих конструкциях. Также приведены практические рекомендации по проектированию и повышению вибростойкости резьбовых соединений. Были проведены исследования влияния чувствительности материалов 1X12H2BMФ и 10X11H28T3MP к концентрации напряжений при циклическом нагружении. Для испытаний использованы цилиндрические образцы с V-образным кольцевым надрезом. Выяснено, что с увеличением радиуса выточки от $R=0$ до $R=0,45$ мм, предел длительной прочности образцов с надрезом уменьшался для стали 1X12H2BMФ на базе 500 часов в пределах 5%, а для стали 10X11H28T3MP на базе 100 часов – 2%. При этом нормальное напряжение отличалось от предела длительной прочности в пределах 5%, а время до разрушения изменялось до 70 часов.

Результаты экспериментальных работ по определению усталостных свойств наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V (предел прочности $\sigma_{nc}=1310$ МПа) приведены в работе [36]. Испытания образцов проводились в условиях изгиба с вращением с частотой $f = 50$ Гц, при симметричном цикле нагружения и базе испытаний $N_6 = 10^7$ в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Объектом исследований

являлись цилиндрические образцы с наличием канавки. Коэффициенты концентрации упругих напряжений α_t составляли для каждого вида надреза с радиусом $R = 0,1; 0,2$ и $0,3$ мм соответственно $\alpha = 4,4; 3,9; 3,3$. Поверхность канавки образцов полировали до шероховатости Ra $0,2$ мкм. Анализ результатов экспериментов выявил, что на чувствительность к надрезу УМЗ титана сильное влияние оказывает геометрия надреза: с увеличением коэффициента концентрации напряжений α от $2,8$ до $4,4$ повышается коэффициент K_σ от $1,59$ до $2,77$ и q от $0,33$ до $0,53$. При этом УМЗ титан имеет повышенную чувствительность к надрезу по сравнению с обычным крупнозернистым аналогом титана ($q = 0,24$ при $\alpha = 2,7$).

Также изложены результаты сравнительных испытаний на малоцикловую усталость болтов М6 из крупнозернистого сплава ВТ-6 и наноструктурного. Исследуемые резьбовые образцы были изготовлены методом накатывания. Накатывание резьбы на образцах из титанового сплава ВТ-6 и наноструктурного чистого титана проводилось при одинаковых режимах накатывания. Выявлено, что долговечность при малоцикловом нагружении резьбовых соединений из объемных наноматериалов (чистый титан) на 20% ниже долговечности соединений из титанового сплава. Разрушение образцов из наноструктурного чистого титана и титанового сплава ВТ-6 при испытаниях на малоцикловую усталость, происходило по резьбе, непосредственно под первым витком гайки, в наиболее нагруженном сечении детали.

Известно, что в местах концентраций напряжений при нагружении конструкции возможно возникновение пластических деформаций и как следствие остаточных напряжений [74, 33, 34]. Остаточные напряжения в изделиях могут влиять на развитие замедленного разрушения, статическую, динамическую прочность и коррозионную стойкость изделий. Релаксация остаточных напряжений может вызвать нежелательные изменения геометрических размеров. Этот процесс протекает в различных участках тела с различной интенсивностью в зависимости от величины напряжений, в связи с этим тело деформируется из-за нарушения

равновесия напряжений, изменяя первоначальные размеры и форму, что особенно необходимо учитывать при изготовлении прецизионных изделий.

При воздействии внешних нагрузок в процессе эксплуатации остаточные напряжения, суммируясь с напряжениями от внешних сил, могут превысить предел упругости, что приведет к неравномерной пластической деформации, потере устойчивости, короблению, искривлению, скручиванию и т.д. [25]. Известны случаи, когда изготовленные с высокой точностью диски турбины, узлы гидромоторов, коленчатые валы, зубчатые колеса и другие детали теряют точность из-за перераспределения остаточных напряжений в процессе эксплуатации, а иногда и разрушаются, что может привести к аварийным последствиям [91, 119]. При циклическом нагружении деталей сопротивление усталости в значительной мере зависит от знака, величины и характера распределения остаточных напряжений. Если циклические напряжения от внешних нагрузок изменяются по симметричному циклу, а в поверхностном слое действуют сжимающие остаточные напряжения, то результирующее суммарное напряжение может быть асимметричным. При этом если среднее напряжение будет сжимающим, то предел выносливости увеличивается. Соответственно при среднем растягивающем напряжении предел выносливости понижается [65, 67, 79, 80]. Таким образом, технологические остаточные напряжения в зависимости от их характера и условий эксплуатации могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на прочность изделия.

В настоящее время наведение сжимающих остаточных напряжений в зонах концентраторов является одним из широко применяемых и эффективных методов повышения усталостной прочности конструкций.

В работах Павлова В.Ф., Кирпичева В.А., Вакулюка В.С. рассмотрено влияние современных видов упрочняющей обработки поверхностного слоя деталей на многоцикловую усталость. Объектом исследований являлись образцы диаметром 10 мм (из сталей 30ХГСА, 12Х18Н10Т, ЭИ961, 45, сплавов ЭИ437Б, В93 и диаметром 7,5 мм из стали ЭИ961) с надрезами полукруглого профиля радиусом 0,3 мм. Анализ напряженно-деформированного состояния после

упрочнения концентратора выявил, что максимальные сжимающие остаточные напряжения возникают на поверхности дна надреза образца и достигают значения 1100 МПа. Испытания на многоцикловую усталость проводились в условиях изгиба образцов по симметричному циклу. Значение пределов выносливости для упрочненных образцов увеличивалось в диапазоне от 1,5 до 2,2 раз в зависимости от вида обработки и материала. На основании значительного количества проведенных экспериментальных работ, авторами предложены критерии влияния остаточных напряжений на долговечность деталей в условиях концентрации напряжений и разработаны методики прогнозирования приращения усталостной прочности элементов конструкций после упрочняющей обработки [50, 77].

Работа Д.В. Иванова [46] посвящена расчетно-экспериментальному определению остаточных напряжений в деталях сложной формы после поверхностно-пластического деформирования и опережающего поверхностно-пластического деформирования с последующей термоэкспозицией. Изложена оценка влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости и прогнозирование предела выносливости упрочненных деталей с концентраторами напряжений при различных температурных условиях. Выявлено, что с ростом температуры в упрочненном материале происходит деградация физических свойств материала и релаксация сжимающих остаточных напряжений и, как следствие, понижение усталостной прочности. Так, для упрочненных образцов из стали ЭИ961 при температуре 20°C значение σ_{-1} составляет 380 МПа, а при 400°C – 270 МПа.

В работах Г.Л. Колмогорова [53, 54] представлены наиболее распространенные причины возникновения и механизмы формирования остаточных напряжений, а также методы их определения в металлоизделиях. Приведены сведения из теорий упругости, пластичности, а также теоретические основы производства металлоизделий методами обработки давлением. К решению задачи определения остаточных напряжений применен энергетический подход. Представлены данные о влиянии остаточных напряжений

на прочность, точность и долговечность прутков трубных и листовых изделий из сталей и сплавов. Решены задачи определения остаточных напряжений для случая анизотропных циркониевых сплавов, используемых при изготовлении оболочек твэлов для термоядерных реакторов.

Основные методы аналитического расчета и экспериментального определения остаточных напряжений приведены в работах И. А. Биргера [18-20]. Подробно рассмотрены вопросы образования остаточных напряжений в материале в результате проведения различных технологических операций, также установлено их влияние на прочность при статических и переменных нагрузках. Автором описаны методы определения и расчета остаточных напряжений в различных деталях (пластинах, дисках и т.д.).

В монографии В.В. Новожилова [70] последовательно изложена теория необратимого деформирования и разрушения поликристаллических материалов. Приведены уравнения состояния, отражающие микронеоднородность конструкционных материалов и учитывающие влияние изменения скорости деформирования, последовательности нагружения и температуры, обсужден критерий прочности материалов.

Таким образом, важным этапом при проведении конструкторско-технологических работ является определение напряженного деформированного состояния и учет технологических остаточных напряжений в элементах конструкций с наличием концентраторов. Выявлено, что конструктивные факторы чаще всего являются основным очагом возникновения пластических деформаций и остаточных напряжений. Также было установлено, что наличие технологических остаточных напряжений кардинально влияет на характер распределения напряженного и деформированного состояния, возникающего в процессе эксплуатации [68, 89].

1.3 Расчет технологической наследственности в элементах конструкций

В настоящее время в авиастроении проявляется большой интерес к разработке двигателей нового поколения с улучшенными силовыми и прочностными характеристиками. Следствием увеличения силовых

характеристик двигателя является возникновение дополнительных нагрузок на гидро-, пневмо- и топливную системы. В условиях высоких рабочих нагрузок и сложной схемы подключения применяются гибкие трубопроводы. Основную нагрузку при эксплуатации в конструкции гибких трубопроводов испытывают законцовки, которые обеспечивают герметичность и надежность стыковки. Анализ результатов периодических испытаний, дефектов и отказов работы данных изделий [75] установил, что разрушение конструкции, в основном, происходит в законцовке. Учитывая специфику и область применения трубопроводов, повышение прочности за счет увеличения размеров изделия не является рациональным. Одно из решений связано с заменой материалов без изменения самой конструкции. Т.е. наиболее оптимальным и перспективным способом повышения прочности гибкого трубопровода является использование объемных наноструктурных металлов и сплавов в конструкциях гибких трубопроводов [37].

В нормативном документе ОСТ 1.12923-77 [73] изложены общие требования по применяемым материалам, технологии изготовления и методах испытания элементов гибкого трубопровода. Данные сведения основаны на экспериментальных исследованиях и аналитических расчетах, проводимых для крупнозернистых материалов. Что касается наноструктурированных, то работы по ним не проводились.

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

Исследование технологических остаточных напряжений, возникших в процессе изготовления конструкции, необходимо производить с учетом всей технологической цепочки производства. Таким образом, исходя из того что законцовка трубопровода является сборочной единицей (изготовлена методом

пластической деформации), состоящей из двух деталей типа «ниппель» и «вкладыш» (получена путем гидропластической штамповки трубчатой заготовки), то необходим дополнительный обзор исследований по проблематике технологии их изготовления.

1.3.1 Методы определения технологической наследственности в осесимметричных деталях после гидравлической штамповки

В настоящее время во многих странах широко применяется метод гидравлической штамповки полых трубчатых заготовок. Данным методом получают полые детали сложной пространственной конфигурации. Технология гидравлической штамповки позволяет получать легкие и прочные детали, масса которых на 25 – 30 % меньше массы деталей, полученных по традиционным технологиям (механическая обработка). Данный метод изготовления применяется в производстве ряда изделий авиационной и космической техники [49].

Гидравлическая штамповка – это процесс холодного пластического изменения формы трубчатой заготовки, при котором рабочей жидкостью создается высокое давление, воздействующее, как правило, непосредственно на внутреннюю поверхность заготовки.

В работе [25, 26] приведены методики по определению силовых параметров технологического процесса. Описаны особенности распределением напряжений по объему заготовки, которые обусловлены сложностью геометрических форм штампуемых изделий и значительным количеством внешних нагрузок. Выявлено, что большое влияние на напряженно-деформированное состояние материала заготовки оказывает схема штамповки. Например, раздача диаметра трубных заготовок за счет нагружения внутренним гидростатическим давлением характеризуется возникновением значительных растягивающих напряжений и утонением стенок.

В работе А.Н. Кобышева [38] рассмотрены различные схемы гидропластической штамповки, выявлены особенности различных вариантов деформирования, исследованы основные виды и причины возникновения дефектов при формообразовании деталей.

В отчете [42], посвященном исследованию процесса гидропластической формовки шовных и бесшовных алюминиевых трубных заготовок, приводятся результаты изучения деформирования заготовок с внешним диаметром 76, 50 мм и толщиной стенок 2 и 3,5 мм соответственно. Длины неопертых участков составляли до 420 и 360 мм соответственно. Основное внимание в отчете было уделено получению допустимых параметров проведения процесса гидропластической штамповки с осевым напряжением сжатия и растяжения. Авторы рассматривали появление браковочных признаков типа продольного разрыва и изгиба заготовки. Определение напряженного состояния проводилось при помощи метода координатных сеток. Главным результатом, отмеченным в работе, стало определение допустимых соотношений осевого и окружного напряжений.

А.С. Матвеевым, Е.М. Халатовым, С.В. Конановым [62] произведен аналитический расчет силовых факторов при гидравлической штамповке тройников. Аналитический расчет проводился на базе энергетических методов, а именно баланса мощностей.

Результаты численного решения задач по определению силовых параметров технологической операции, напряженно-деформированного состояния в оболочке приведены в работе Д.А. Алексева, М.В. Грязева [1]. Решение проводилось при помощи разработанного программного комплекса, алгоритм которого основан на базе теории течения.

Результаты численного решения задач по определению напряженно-деформированного состояния в деталях при гидропластической штамповке приведены в работах С-ТКwan, F-CLin [107, 108], D. Rajenthirakumar, G. Chandramohan, P.R. Thyla [116]. Решение задач осуществлялось при помощи программно-вычислительных комплексов ANSYS и Deform.

Литературный обзор показал, что современные работы по изучению процесса гидравлической штамповки посвящены в основном исследованиям напряженно-деформированного состояния, возникающего в процессе нагружения, либо определению силовых параметров техпроцесса и установки их влияния

на образование дефектов. Т.е. в настоящее время отсутствуют методики позволяющие установить закономерности формирования остаточных напряжений образованных при гидравлической штамповке, и методы оценки их влияния на прочность деталей.

1.3.2 Методы определения технологической наследственности в деталях, изготовленных пластической деформацией

Обработка методом пластической деформации основана на использовании пластических свойств металла, заключающихся в их способности сохранять форму и размеры, полученные под действием внешних сил. В зависимости от направления сил давления и деформации относительно оси детали различают следующие виды обработки методом пластической деформации: осадку, раздачу, обжатие, вдавливание, накатку, обкатывание роликами и правку.

Данный метод является одним из основных способов изготовления деталей современных конструкций и применяется практически во всех сферах промышленности. Особенно широко используется при изготовлении законцовок трубопроводов и их стыковке.

Например, в нефтегазовой промышленности в последнее время широкое применение получили электроизолирующие соединения, используемые для уменьшения рассеивания тока электрохимической защиты. Соединения изготовлены методом радиальной пластической деформации. Электроизолирующие соединения успешно эксплуатируется с 2007 года как на трубопроводах системы нефтесбора с рабочим давлением до 4 МПа, так и на водоводах системы ППД с рабочим давлением до 21 МПа [21].

В работе [64] изложены результаты исследований закономерностей формирования остаточных напряжений в процессе соединения труб по обжимной технологии, установлена роль остаточных напряжений в формировании прочности. Для оценки уровня остаточных напряжений во всех контактных зонах соединения труб рассматривался весь узел, состоящий из муфты, трубы, втулки, как единое целое. Для решения задачи использовалась модель пластичности, построенная на основе деформационной теории пластичности Генки – Ильюшина.

Исследование механики процесса упругопластического обжатия, выявило наличие в деталях только положительных остаточных напряжений, которые не приводят к появлению сил трения, т.е. не обеспечивают зацепления между трубой и муфтой. Дополнительный анализ возможных источников возникновения остаточных напряжений установил, что источником являются тепловые явления. Источников формирования остаточных термонапряжений несколько.

- 1) Термонапряжения от пластического обжатия.
- 2) Термонапряжения от трения на фильере.
- 3) Термонапряжения от предварительного подогрева муфты.

Методом математического моделирования было установлено, что при пластическом обжатии элементов соединения (муфты, раструба) возникают только растягивающие остаточные напряжения (положительного знака), которые не приводят к сцеплению путем трения. Появлению сжимающих остаточных напряжений, ответственных за появление сил трения между контактирующими поверхностями, способствуют тепловые эффекты: предварительный нагрев наружной поверхности, переход энергии пластического деформирования в тепловую энергию, нагрев за счет трения в фильерах.

В работах Н.Н. Малинина [61] и Г.А. Смирнов-Аляева [85] приведены основные принципы аналитического решения задач по определению напряженно-деформированного состояния в тонкостенных осесимметричных деталях, получаемых методом пластической деформации. Решение задач основано на безмоментной теории оболочек вращения.

Обзор литературы показал, что обработка деталей методом пластической деформации является достаточно изученной темой. Однако также установлено, что каждый технологический процесс, в основе которого лежит метод пластической деформации, требует специфического подхода к алгоритму определения напряженно-деформированного состояния. Спецификой операции является схема нагружения, физико-механические характеристики материалов, геометрические формы и размеры деталей и т.д. На сегодняшний день отсутствуют методики определения закономерностей формирования остаточных

напряжений в деталях из объемных наноматериалов, изготовленных методом пластических деформаций.

Основные выводы по главе 1

Анализ тематики состояния современного авиа- и ракетостроения, выявил, что увеличение силовых и прочностных характеристик невозможно реализовать без применения новых материалов с улучшенными физико-механическими свойствами. Примером тому является создание новых самолетов пятого поколения, требующих значительного улучшения прочностных свойств не только двигателя, но комплектующих изделий и агрегатов. В настоящее время идет проработка возможности применения объемных наноматериалов практически во всех областях промышленности. Согласно основным принципам проведения конструкторско-технологических работ, внедрению нового материала в серийное производство должна предшествовать полная проектная проработка, как экспериментальная, так и расчетная.

Как показал опыт применения современных крупнозернистых материалов, важным этапом при проектных работах является определение технологической наследственности, которая оказывают влияние на усталостную и статическую прочность в условиях эксплуатации [103–106, 109, 110].

Однако, анализ обзора современных примеров определения напряженно-деформированного состояния и технологических напряжений в элементах конструкций из объемных наноматериалов, а также их влияние на многоцикловую усталость, показал, что данная проблематика исследована в достаточно малом объеме. Наличие же работ по численному расчету носит единичный характер.

Таким образом, разработка численных методов расчета технологической наследственности в конструкциях из объемных наноматериалов, а также установление её влияния на многоцикловую усталостную прочность является актуальной проблемой.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ, СФОРМИРОВАННОЙ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИИ

Получение объемных наноструктурных материалов осуществляется с использованием методов интенсивной пластической деформации, среди которых значительное распространение получило равноканальное угловое прессование (РКУП), позволяющее производить многопроходное деформирование по различным маршрутам с высоким уровнем пластических деформаций. При реализации РКУП заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями под углом 90° . При необходимости в случае трудно деформируемых материалов деформация осуществлялась при повышенных температурах.

Когда внешний угол $\psi = 0^\circ$, а внутренний угол φ произволен, то приращение степени деформации $\Delta\varepsilon_i$ при сдвиге в ходе каждого прохода через каналы может быть рассчитано с использованием выражения [21, 22, 23]

$$\frac{P}{Y} = \Delta\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg}(\varphi/2), \quad (2.1)$$

где P – приложенное давление, Y – напряжение течения деформируемого материала.

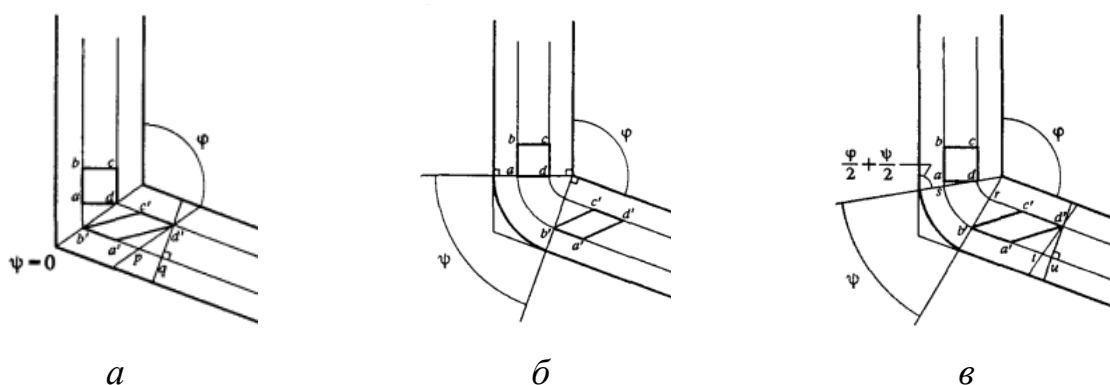


Рисунок 2.1 – Принципы РКУП прессования: $a - \psi = 0^\circ$; $b - \psi = \pi - \varphi$;

$v - \psi$ лежит между $\psi = 0^\circ$ и $\psi = \pi - \varphi$

Так как технологический процесс РКУП осуществляется в несколько проходов заготовки через пересекающиеся каналы, то общая накопленная деформация

$$\varepsilon_N = N\Delta\varepsilon_i, \quad (2.2)$$

где N – число проходов.

В процессе РКУП для структурообразования весьма важным являются направления и число проходов заготовки через каналы. Различают следующие виды направления маршрутов прохождения заготовки (рисунок 2.2): ориентация заготовки остается неизменной при каждом проходе (маршрут А); после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной оси на угол 90° (маршрут В); после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной на 180° (маршрут С).

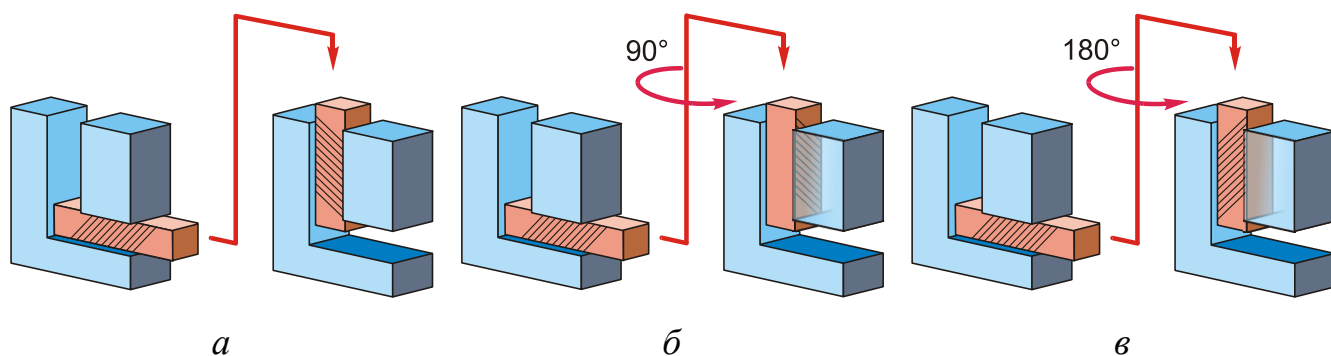


Рисунок 2.2 – Варианты РКУП: *a* – маршрут А; *б* – маршрут В; *в* – маршрут С

Эти маршруты различаются направлениями сдвига при повторных проходах заготовки через пересекающиеся каналы и приводят к формоизменению сферической ячейки в теле заготовки в ходе РКУП.

В ходе первого прохода в результате простого сдвига при РКУП в месте пересечения каналов ячейка приобретает форму эллипсоида (рисунок 2.3, *a*). Последующие проходы в ходе реализации маршрута А приводят к удлинению оси 1 и эллипсоид вытягивается. При этом направление сдвига поворачивается на угол 2 вокруг оси, перпендикулярной продольному сечению каналов (рисунок 2.3, *б*).

Повторный проход при маршруте *B* приводит к изменению направления сдвига; при этом плоскость сдвига поворачивается на угол 120° (при $2 = 90^\circ$) (рисунок 2.3, б).

В ходе деформации по маршруту *C* повторный проход приводит к сдвигу в той же плоскости, но в противоположном направлении. При этом ячейка вновь приобретает сферическую форму.

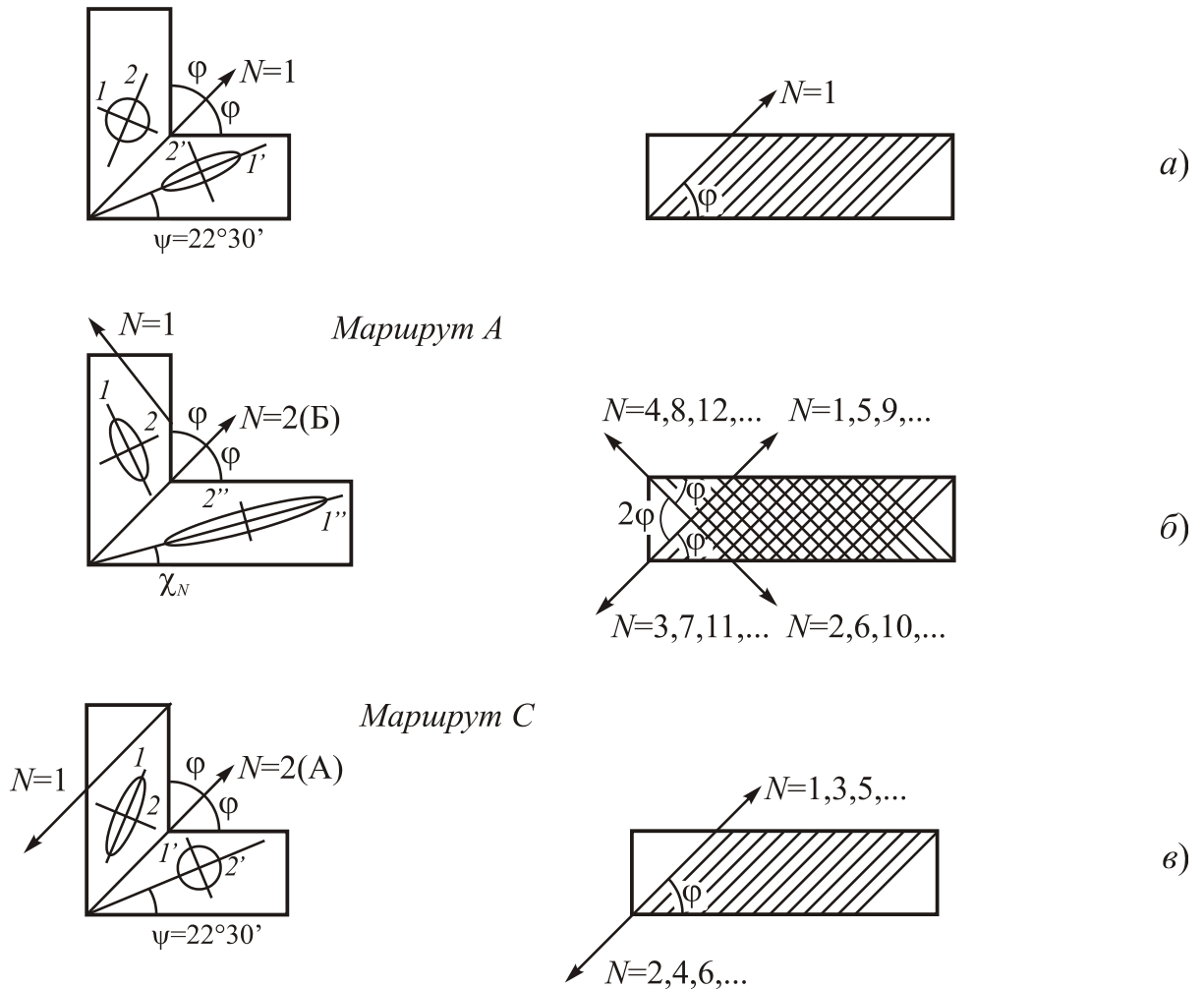


Рисунок 2.3 – Режимы простого сдвига при РКУП: а – одноцикловое деформирование; б – многоцикловое деформирование, маршрут А; в – маршрут С

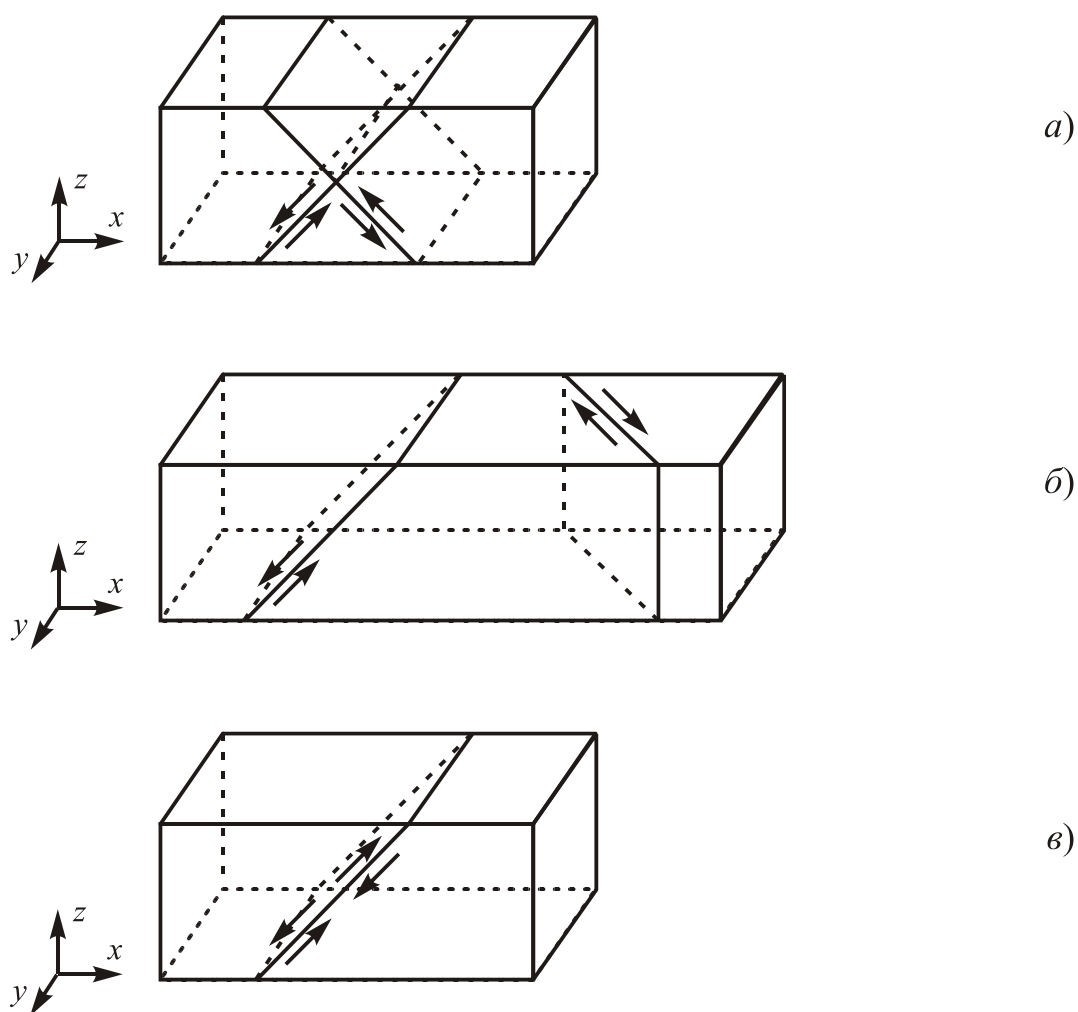


Рисунок 2.4 – Направление сдвига при РКУП по маршрутам $A(a)$, $B(б)$, $C(в)$

В данной главе представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния и технологической наследственности в заготовках, сформированных в процессе РКУП.

2.1 Методика расчета напряженно-деформированного состояния и технологической наследственности после РКУП

На данном этапе была рассмотрена методика расчета НДС и технологической наследственности в заготовках круглого сечения после многопроходной схемы РКУП. Данная методика разработана на кафедре сопротивления материалов ФГБОУ ВПО «УГАТУ» в рамках выполнения НИР.

В качестве примера представлено описание методики расчета НДС при получении наноструктуры в заготовке круглого сечения РКУП за 4 прохода.

При моделировании были приняты следующие параметры технологической операции:

1. Коэффициент трения в канале – 0,02;
2. Внешний и внутренний радиусы сопряжения каналов – $r = 3$ мм;
 $R = 3$ мм;
3. Геометрия канала – $\Phi = 90^\circ$.
4. Число проходов – 4;
5. Маршрут РКУП – С.

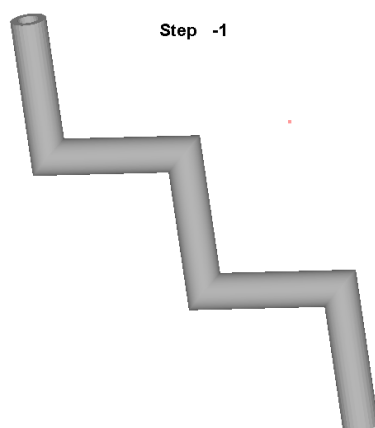


Рисунок 2.5 – Математическая модель технологической операции РКУП соответствующая маршруту С за 4 прохода

На рисунке 2.5 показана математическая модель технологической операции РКУП соответствующая маршруту С за 4 прохода.

Численное решение выполнено методом конечных элементов с применением программного вычислительного комплекса DEFORM 3D.

На рисунке 2.6 представлен сеточный аналог исследуемого образца. Данный аналог содержит 40 000 элементов.

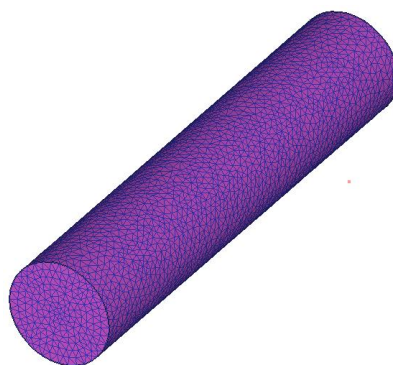


Рисунок 2.6 – Сеточный аналог заготовки

Материал заготовки соответствовал технически чистому титану ВТ6. Свойства материала отвечали свойствам сплава ВТ6 при температуре $T = 450^{\circ}\text{C}$, температуре техпроцесса РКУП.

При моделировании заготовки из титана были приняты следующие механические характеристики: модуль Юнга $E=1,15 \times 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,34$; предел текучести $\sigma_T = 80$ МПа; предел прочности $\sigma_{ПЧ} = 300$ МПа. В таблице 2.1 приведены механические характеристики материала до РКУП и после 4 прохода при комнатной температуре.

Таблица 2.1 – Механические характеристики ВТ6

Материал	$E \times 10^{-5}$, МПа	ν	σ_T , МПа	$\sigma_{ПЧ}$, МПа
титановый сплав ВТ6	1,15	0,32	700	1150
наноструктурный сплав ВТ6	1,15	0,32	900	1620

2.2 Анализ технологической наследственности в заготовках после РКУП

На основании выше описанной методики был проведен расчет НДС и технологической наследственности в заготовке из титанового сплава ВТ6 после 4 проходов РКУП по маршруту ВС.

На рисунке 2.7 в качестве примера показано распределение деформаций в заготовке в различные моменты времени.

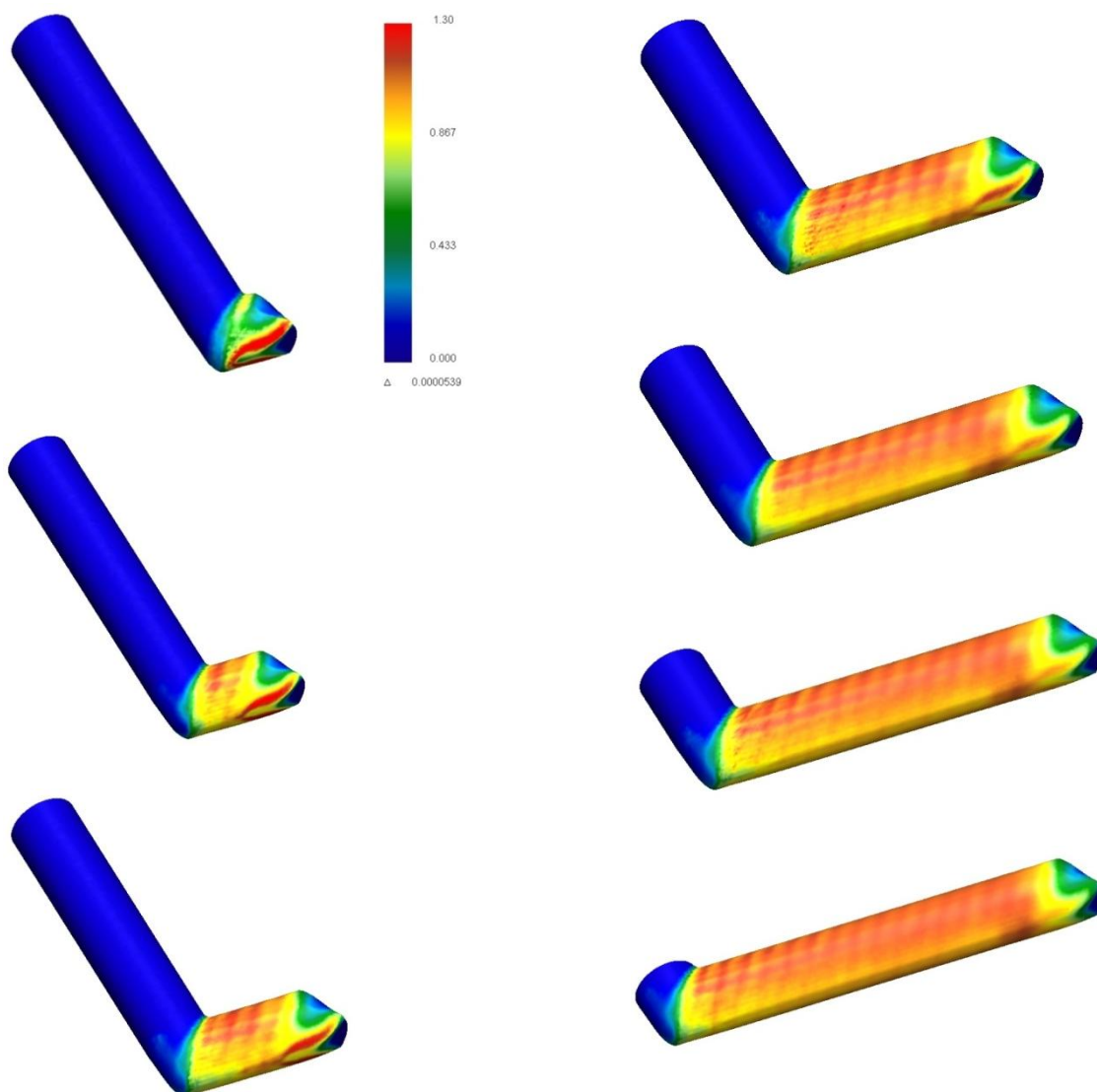


Рисунок 2.7 – Распределение деформаций в образце в различные моменты времени

Анализируя расчетные данные, можно отметить, что уровень накопленных пластических деформаций в образцах, хорошо согласуется с экспериментальными данными полученными [32], при этом ось деформаций имеет шаг $\sim 1,15$, что соответствует теоретическому уровню в одном проходе.

Кроме того, установлено, что в заготовках круглого поперечного сечения проявляется существенная неравномерность деформаций (порядка 12-16% за проход) в приповерхностном слое заготовки, обусловленная трением и геометрией штампа РКУП. Установлено, что уровень накопленной пластической деформации в заготовке круглого поперечного сечения после первого прохода

РКУП, находится в пределах $\varepsilon_{eqv}^{pl}=0,66-1,18$, при этом имеется общая тенденция к снижению неравномерности распределения накопленных пластических деформаций при реализации многопроходной схемы деформирования (рисунок 2.8). Так, неравномерность распределения накопленной пластической деформации после первого прохода составляет 44,1%, а после второго происходит ее снижение до 38,7% ($\varepsilon_{eqv}^{pl}=1,38-2,25$), после третьего – до 29,4% ($\varepsilon_{eqv}^{pl}=2,52-3,57$), после четвертого – до 20% ($\varepsilon_{eqv}^{pl}=3,75-4,70$).

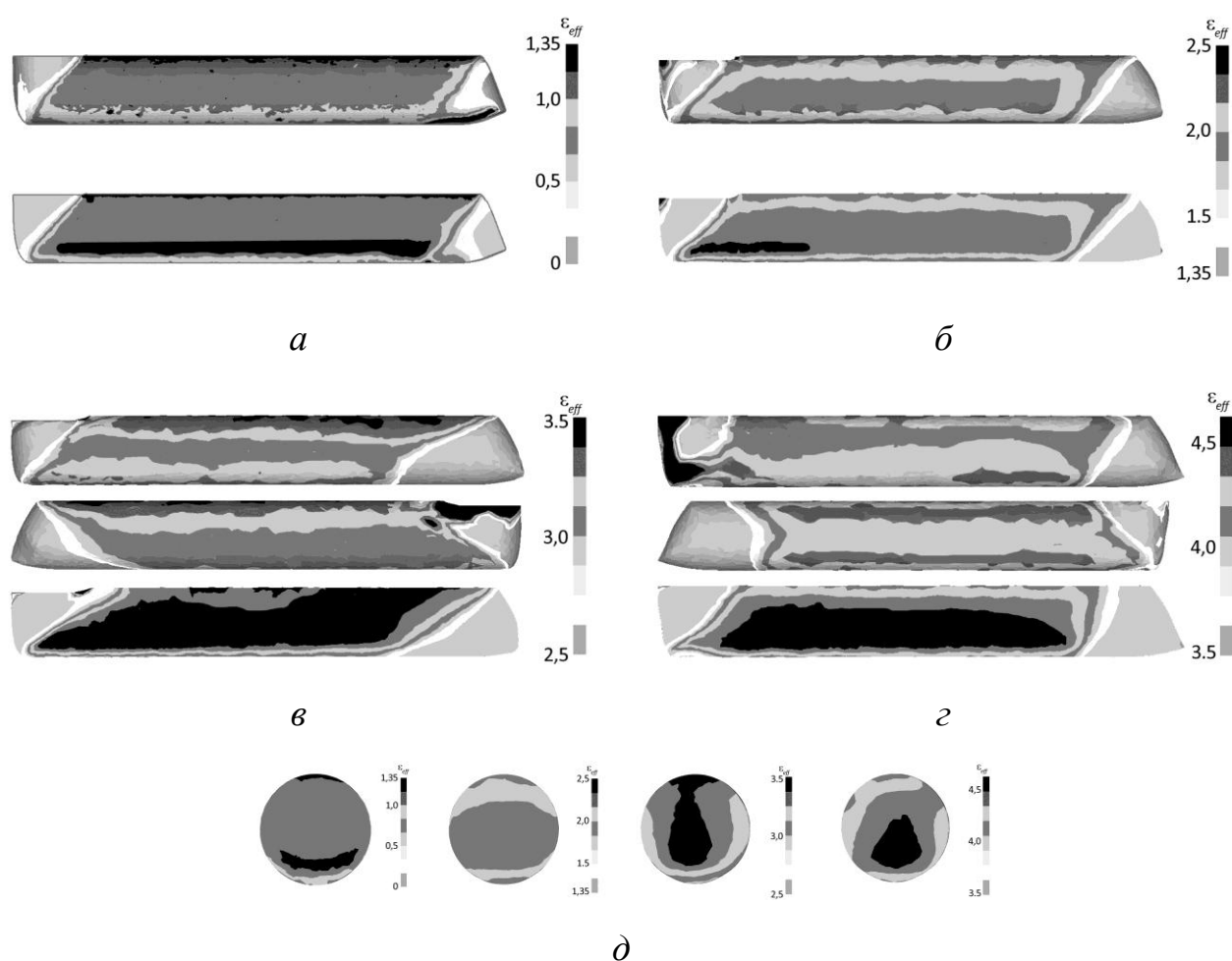


Рисунок 2.8 – Распределение деформаций в заготовке круглого поперечного сечения:

- а)* первый; *б)* второй; *в)* третий;
г) четвертый проход РКУП (по объему заготовки и в продольном сечении);
д) в поперечном сечении «рабочего» участка, для четырех проходов соответственно.

На рисунке 2.9, *а*, *б*, *в*, *г* приведено распределение полей остаточных напряжений соответственно после первого, второго, третьего и четвертого проходов.

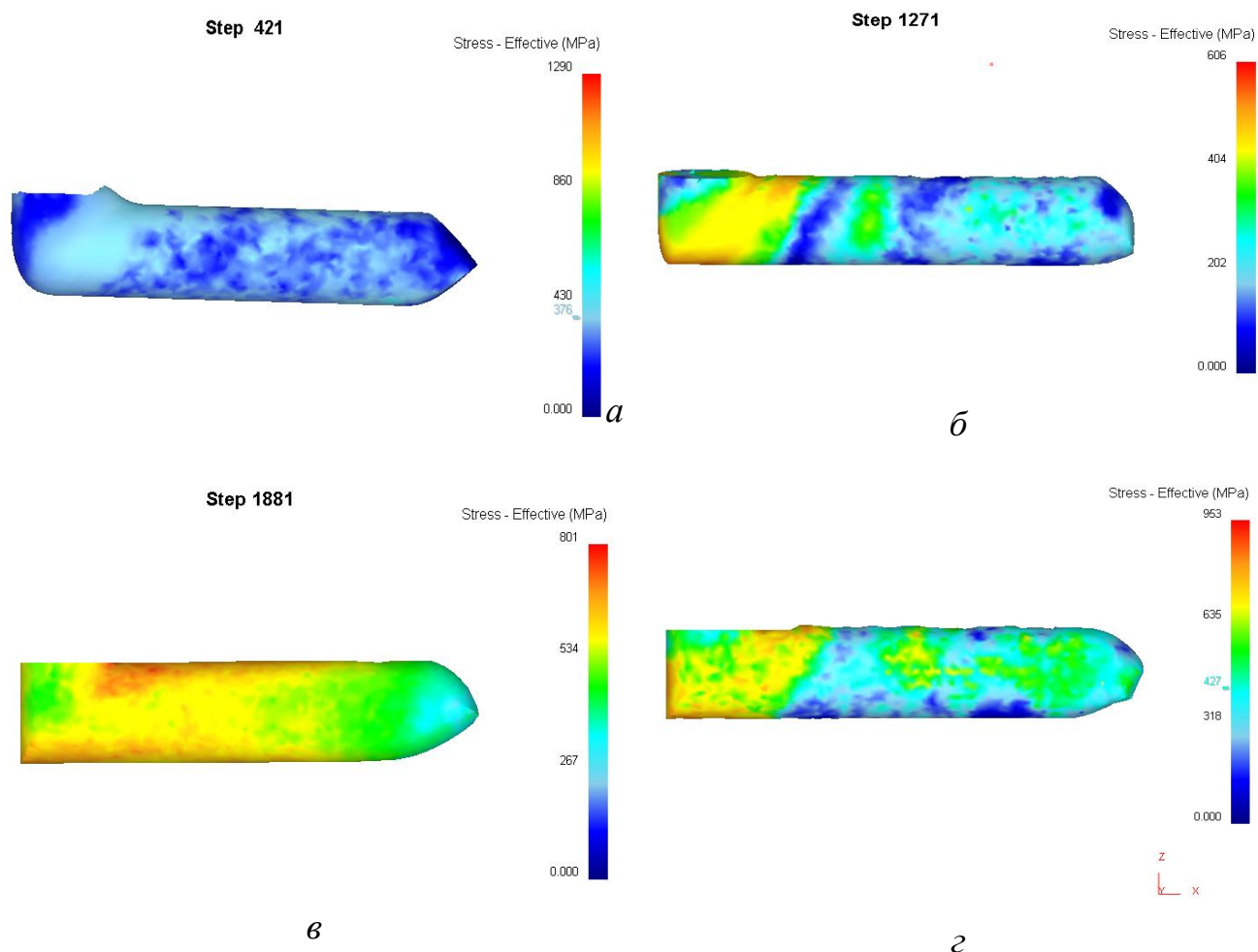


Рисунок 2.9 – Распределение полей остаточных напряжений после первого(*a*), второго (*б*), третьего (*в*) и четвертого(*z*) прохода

Установлено, что в теле заготовки по окончании каждого этапа РКУП формируются неравномерные поля остаточных напряжений. Так, уровень неравномерности распределения σ^* после первого прохода по длине заготовки составляет 40% (рисунок 2.9, *a*), после второго – 34% (рисунок 2.9, *б*), после третьего – 31% (рисунок 2.9, *в*), а после четвертого – 25% (рисунок 2.9, *z*). Также было определено, что после первого прохода в заготовке на поверхностях непосредственно контактирующих с внешним и внутренним радиусом штампа формируются сжимающие остаточные радиальные напряжения. В центральном сечении возникают растягивающие остаточные радиальные напряжения. Аналогичная картина прослеживается и в отношении тангенциальных и осевых остаточных напряжений.

На рисунке 2.10, *а*, *б*, *в*, *г* приведены поля распределения остаточных напряжений в поперечном сечении соответственно после первого, второго, третьего и четвертого проходов.

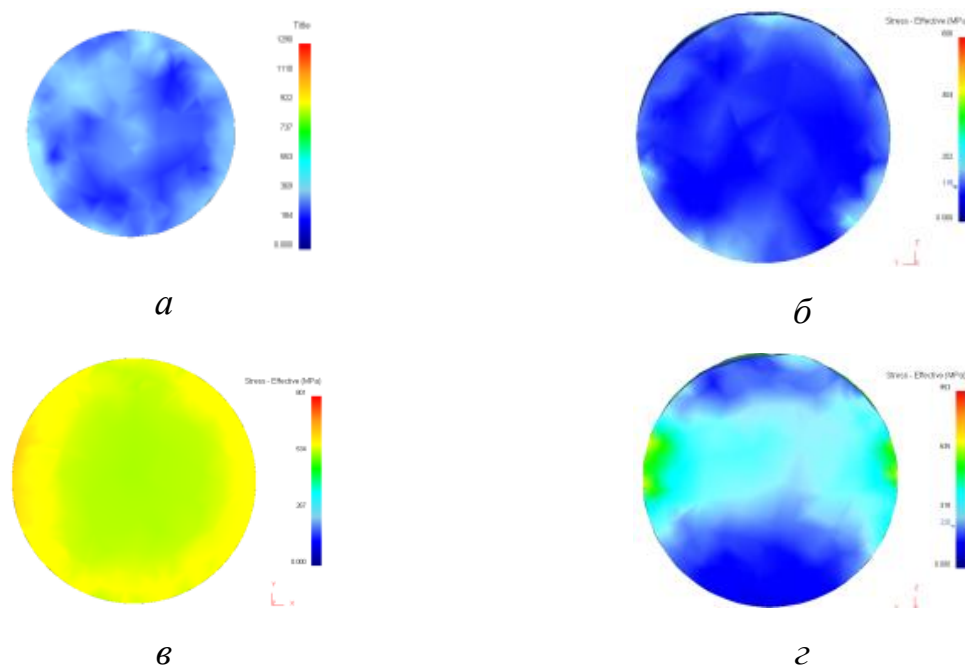


Рисунок 2.10 – Распределение остаточных напряжений в поперечном сечении заготовки после первого(*а*), второго (*б*), третьего (*в*) и четвертого(*г*) прохода

Анализ характера распределения остаточных напряжений в поперечном сечении заготовки после первого прохода установил, что максимальные напряжения формируются на поверхности и достигают значения $\sigma_i^* = (0.35 \div 0.6)\sigma_T$, а минимальные в центральной части, $\sigma_i^* = (0.1 \div 0.3)\sigma_T$ (рисунок 2.10, *а*). При этом на поверхности заготовки, соприкасающейся с наружным радиусом штампа, уровень остаточных напряжений на 25% выше, чем на поверхности, контактирующей с внутренним радиусом штампа, и на 25-30 %, чем в центральном сечении. Однако, при реализации многопроходной схемы РКУП наблюдается снижение неравномерности распределения остаточных напряжений (рисунок 2.10, *б*, *в*). Например, после четвертого прохода разница между напряжениями на нижней и верхней поверхности не превышает 15–20 % (рисунок 2.10, *г*).

Основные выводы по главе 2

Выполнено исследование распределения накопленной деформации в заготовке из титанового сплава Ti-6Al-4V. Установлено, что после первого прохода ε_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 на 25-30%, чем в центральном сечении. При многопроходной схеме РКУП, как и в случае деформаций, 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%.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОБЪЕМНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

Детальное изучение напряженного и деформированного состояния в местах концентрации напряжений в условиях упругости и пластичности является обязательной частью общего прочностного расчета и важной предпосылкой создания оптимальных и надежных конструкций [59, 60]. Недостаточно строгая оценка напряженного состояния и условий прочности в зоне концентрации при проектировании может послужить причиной преждевременного разрушения высоконапряженных конструкций и иметь тяжелые последствия.

3.1 Методика расчета НДС в элементах конструкций из объемных наноструктурных материалов при наличии концентраторов напряжений

В данном разделе приведено описание методики расчета НДС в элементах конструкций из объемных наноструктурных материалов при наличии концентраторов напряжений.

Как было описано ранее, особенностью расчета НДС в элементах конструкций из объемных наноструктурных материалов является учет технологической наследственности, сформированной после РКУП. Т.е. расчету НДС в элементах конструкций должен предшествовать этап определения технологической наследственности. Последовательность этапов решения приведены на рисунке 3.1.

На первом этапе проводится расчет технологической наследственности в заготовках после РКУП. Методика решения задач данного этапа представлена в главе 2. Полученный массив результатов является исходным для второго этапа.

На втором этапе осуществлялся расчет напряженного состояния в элементах конструкции, формирующийся в результате проведения формообразующих

технологических операций (накатка, запрессовка кольца в пластину с отверстием).

На третьем этапе реализовывался расчет НДС в элементах конструкций при одноосном нагружении. При этом расчет проводился с учетом технологической наследственности, формирующейся на предыдущих этапах.

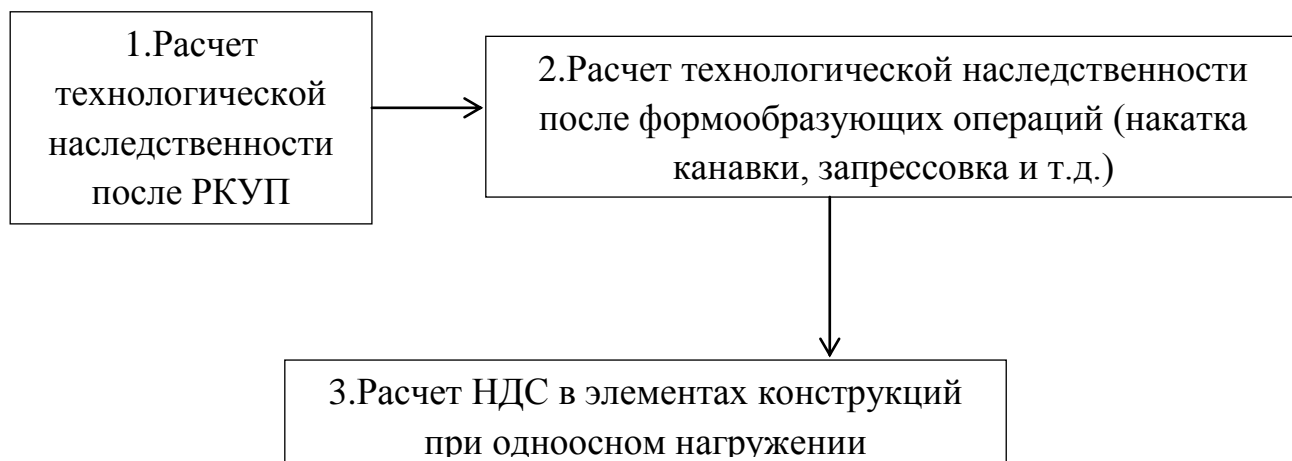


Рисунок 3.1 – Структурная схема расчета НДС в элементах конструкций из объемных наноструктурных материалов с учетом технологической наследственности

Как видно из схемы расчета, на каждом этапе формируются пластические деформации. При наличии деформаций пластичности и ползучести трудность расчета состоит в том, что компоненты деформаций и напряжений не могут быть связаны между собой конечными соотношениями. Для решения этой задачи использовался метод последовательных нагружений. Идея метода заключается в последовательном решении задач упругости, пластичности и ползучести. Реальная история нагружения разбивается на достаточно малые этапы нагружения. При этом на каждом этапе полную деформацию представляли в дифференциальной форме:

$$\partial \varepsilon_x = \partial \varepsilon_x^e + \partial \varepsilon_x^p + \partial \varepsilon_x^c, \dots \quad (3.1)$$

$$\partial \gamma_{xy} = \partial \gamma_{xy}^e + \partial \gamma_{xy}^p + \partial \gamma_{xy}^c, \dots, \quad (3.2)$$

где верхние индексы относятся к деформациям упругости, пластичности и ползучести соответственно; (x, y, z) – означает круговую перестановку индексов.

Составляющие полной деформации зависят от свойств материала, напряженного состояния и всей истории деформирования конструкции.

Следует подчеркнуть, что длительность этапа нагружения должна быть достаточно малой, чтобы значения характеристик материала, параметров пластичности и ползучести в пределах этапа можно было считать постоянными.

Расчет НДС на некотором n -ом этапе нагружения строится следующим образом. Полагаем, что из расчета предыдущего $(n-1)$ -го этапа полностью известны значения напряжений и деформаций за всю предшествующую историю деформирования.

На рассматриваемом n -ом этапе решается краевая задача упругости, пластичности, ползучести при заданных приращениях внешних воздействий (сил, температуры, времени и т.д.). При этом удовлетворяются уравнения неразрывности деформаций, уравнения равновесия

$$\frac{\partial \Delta \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \Delta \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \Delta \tau_{xz}}{\partial z} + \rho \Delta x = 0, \dots \quad (3.3)$$

и краевые условия

$$\Delta \sigma_x + \Delta \tau_{xy} m + \Delta \tau_{xz} n = \Delta g_x, \dots (x, y, z), \quad (3.4)$$

в которых $\Delta \sigma_x, \dots, \Delta \tau_{xy}, \dots$ – приращения нормальных и касательных напряжений на этапе нагружения; l, m, n – направляющие косинусы к элементу поверхности, Δg_x – приращения поверхностной нагрузки в направлении осей x, y, z ; Δx – приращения массовой силы; ρ – плотность материала.

Проинтегрировав зависимости (3.1-3.2) в пределах расчетного этапа, приращения компонентов полной деформации представим в форме

$$\Delta \varepsilon_x = \Delta \varepsilon_x^e + \Delta \varepsilon_x^p + \Delta \varepsilon_x^c, \dots \quad (3.5)$$

$$\Delta \gamma_{xy} = \Delta \gamma_{xy}^e + \Delta \gamma_{xy}^p + \Delta \gamma_{xy}^c, \dots \quad (3.6)$$

Далее расчет сводится к установлению характера нагружения в каждой точке исследуемой конструкции. Для этого в этих точках определяются приращения интенсивности напряжений $\Delta \sigma_i$. Причем $\Delta \sigma_i$ рассматривается как

приращение интенсивности напряжений, вызванные приращением параметра нагружения (температура и т.д.).

Если приращение интенсивности $\Delta\sigma_i > 0$, то в данной точке тела имеет место нагружение. В противном случае – разгрузка.

Заметим, что нагружение может быть упругим и упругопластическим. Наличие упругопластических деформаций проверяется по условиям:

$$\sigma_i \leq \sigma_s(T, \varepsilon_{i_*}^p) \quad (3.7)$$

$$\partial\sigma_i \geq \frac{\partial\sigma_s(T, \varepsilon_{i_*}^p)}{\partial T} \partial T \quad (3.8)$$

в которых $\sigma_s(T, \varepsilon_{i_*}^p)$ – мгновенный предел текучести; T – температура; $\varepsilon_{i_*}^p$ – интенсивность накопленной пластической деформации. При выполнении этих условий в рассматриваемой точке тела имеет место рост пластических деформаций. Величина деформаций определяется законами пластичности.

Полные деформации и напряжения в конце n -го этапа нагружения находятся по формулам

$$\varepsilon_{x_n} = \varepsilon_{x_{n-1}} + \Delta_n \varepsilon_x, \dots \quad (3.9)$$

$$\gamma_{xy_n} = \gamma_{xy_{n-1}} + \Delta_n \gamma_{xy}, \dots \quad (3.10)$$

и

$$\sigma_{x_n} = \sigma_{x_{n-1}} + \Delta_n \sigma_x, \dots \quad (3.11)$$

$$\tau_{xy_n} = \tau_{xy_{n-1}} + \Delta_n \tau_{xy}, \dots \quad (3.12)$$

Аналогичным образом ведется расчет всех этапов нагружения за всю «историю» деформирования.

Деформации, напряжения в конце нагружения находятся с помощью зависимостей

$$\varepsilon_x = \sum_{n=1}^N \Delta_n \varepsilon_x, \dots \quad (3.13)$$

$$\gamma_{xy} = \sum_{n=1}^N \Delta_n \gamma_{xy}, \dots (x, y, z) \quad (3.14)$$

$$\sigma_x = \sum_{n=1}^N \Delta_n \sigma_x, \dots \quad (3.15)$$

$$\tau_{xy} = \sum_{n=1}^N \Delta_n \tau_{xy}, \dots (x, y, z) \quad (3.16)$$

где N – суммарное число этапов за всю «историю» нагружения.

Деформационная теория

Основным недостатком этой теории является требование активности нагружения во всех точках тела на протяжении всего процесса деформирования. Поэтому обычная форма деформационной теории применима лишь для описания простого нагружения или близкого к нему.

Однако если использовать эту теорию в рамках метода последовательных нагружений, то это позволит значительно смягчить требование активности нагружения. Что обеспечивает выполнение данного требования лишь в пределах достаточного малого этапа, в пределах которого нагружение можно считать простым. Такой подход, возможности которого указаны в работе (6), позволяет использовать деформационную теорию пластичности и для описания сложного нагружения.

В основу данной теории в приращениях положены предположения о том, что в пределах расчетного этапа нагружения полная деформация складывается из двух частей – упругой и пластической:

$$\Delta_n \varepsilon_x = \Delta_n \varepsilon_x^e + \Delta_n \varepsilon_x^p, \dots \quad (3.17)$$

$$\Delta_n \gamma_{xy} = \Delta_n \gamma_{xy}^e + \Delta_n \gamma_{xy}^p, \dots \quad (3.18)$$

а относительное изменение объема является упругой деформацией

$$\Delta_n \varepsilon = \frac{1-2\mu}{E} \Delta_n \sigma, \quad (3.19)$$

где $\Delta_n \varepsilon$, $\Delta_n \sigma$ – приращение средней деформации и среднего напряжения на n -ом этапе нагружения.

Приращения компонентов деформаций связаны между собой соотношениями Генки:

$$\Delta_n \varepsilon_x - \Delta_n \varepsilon = \frac{1+\mu}{E} \Psi (\Delta_n \sigma_x + \Delta_n \sigma), \dots \quad (3.20)$$

$$\Delta_n \tau_{xy} = \frac{\Psi}{G} \Delta_n \tau_{xy}, \dots \quad (3.21)$$

в которых Ψ – параметр пластичности, определяемый зависимостью

$$\Psi = \frac{3}{2(1+\mu)} E \frac{\Delta_n \varepsilon_i}{\Delta_n \sigma_i} \quad (3.22)$$

С учетом выше сказанного приращения компонентов деформаций запишем в виде

$$\Delta_n \varepsilon_x^p = \frac{\Psi-1}{2G} (\Delta_n \sigma_x + \Delta_n \sigma), \dots \quad (3.23)$$

$$\Delta_n \gamma_{xy}^p = \frac{\Psi-1}{G} \Delta_n \tau_{xy}, \dots \quad (x, y, z) \quad (3.24)$$

а приращение интенсивности пластических деформаций

$$\Delta_n \varepsilon_i^p = \frac{\Psi-1}{3G} \Delta_n \sigma_i, \dots \quad (3.25)$$

Теория пластического течения

Более широкие возможности для описания сложного нагружения имеет теория течения. В основе этой теории лежат зависимости между приращениями пластических деформаций и полными напряжениями, которые имеют вид

$$\Delta_n \varepsilon_x^p = [F_\sigma(T, \sigma_i) \Delta \sigma_i + F_T(T, \sigma_i) \Delta T] (\sigma_x - \sigma), \dots \quad (3.26)$$

$$\Delta_n \gamma_x^p = 2[F_\sigma(T, \sigma_i) \Delta \sigma_i + F_T(T, \sigma_i) \Delta T] \tau_{xy}, \dots \quad (3.27)$$

где σ_i – интенсивность напряжений, $F_\sigma(T, \sigma_i)$, $F_T(T, \sigma_i)$ – функция пластичности.

Функция пластичности $F_\sigma(T, \sigma_i)$ определяется по обычной кривой деформирования причем

$$F_\sigma(T, \sigma_i) = \frac{3}{2\sigma_i} \left[\frac{1}{E_k} - \frac{1}{E} \right] \quad (3.28)$$

где E_k – касательный модуль.

Равенство имеет место при $\sigma_{in} > \sigma_{i(n-1)}^*$. В противном случае функция пластичности принимается равной нулю $F_\sigma(T, \sigma_i) = 0$.

Термомеханическая функция $F_T(T, \sigma_i)$ может быть найдена из уравнения

$$F_T(T, \sigma_i) = -\frac{3}{2\sigma_i} \left[\frac{1}{E_k} - \frac{1}{E} \right] \frac{\partial \sigma_s(T, \varepsilon_{i_*}^p)}{\partial T} \quad (3.29)$$

в котором $\partial \sigma_s(T, \varepsilon_{i_*}^p)$ – мгновенный предел текучести; $\varepsilon_{i_*}^p$ – накопленная пластическая деформация к началу рассматриваемого нагружения. Величина этой деформации определяется за время по зависимости

$$\varepsilon_{i_*}^p = \int_0^t d\varepsilon_{i_*}^p = \int_0^t \frac{d\varepsilon_{i_*}^p}{dt} dt \cong \sum_{n=1}^N \Delta_n \varepsilon_{i_*}^p \quad (3.30)$$

где $\Delta_n \varepsilon_{i_*}^p$ – интенсивность приращения пластической деформации

$$\Delta_n \varepsilon_{i_*}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta \varepsilon_x^p - \Delta_n \varepsilon_y^p)^2 + \dots + \frac{3}{2} \Delta \gamma_{xy}^p{}^2 + \dots} \quad (3.31)$$

Приведенные соотношения теории пластического течения являются нелинейными. Задача, как и в случае деформационной теории пластичности линеаризуется методом переменных параметров упругости или методом дополнительных деформаций.

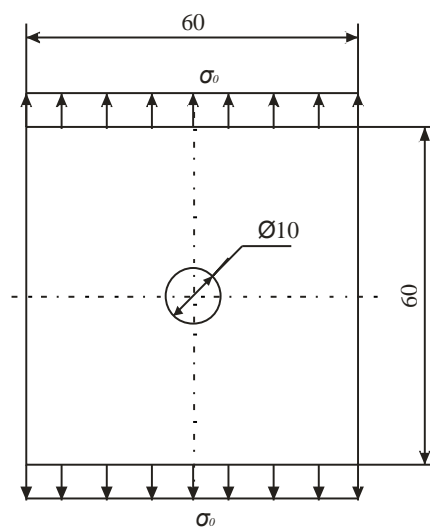
На основании данной методики были проведены расчеты НДС при одноосном нагружении в следующих элементах конструкций:

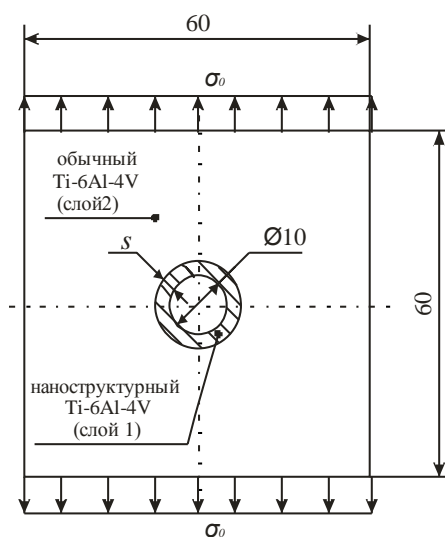
- в пластинах с отверстием из обычного и наноструктурного материала (без учета технологической наследственности);
- в пластинах и стержнях с наноструктурным слоем в области концентратора напряжений;
- в пластинах с запрессованным в отверстие кольцом из наноструктурного материала;
- в пластинах с отверстием из обычного и наноструктурного материала при раздаче отверстия внутренним давлением (без учета технологической наследственности);

- в стержнях с выточкой из обычного и наноструктурного материала (без учета технологической наследственности);
- в стержнях с кольцевой канавкой с учетом технологической наследственности, сформированной в процессе получения наноструктуры в титановом сплаве и последующей операции накатки кольцевой канавки.

3.2 Расчет напряженно-деформированного состояния в пластинах из обычного и наноструктурного материала при одноосном нагружении

В данной главе была поставлена задача исследования НДС и остаточных напряжений при одноосном растяжении и последующей разгрузки в пластинах с отверстием, выполненных из обычного крупнозернистого и наноструктурного материала (рисунок 3.2, *а*), а также пластин из обычного титанового сплава Ti-6Al-4Vc наличием наноструктурного слоя (рисунок 3.2, *б*). На рисунке 3.3 показана диаграмма растяжения образцов для данных материалов [2, 3].

*a*



б

Рисунок 3.2 – Геометрические размеры пластины с отверстием: *a* – пластина из материала с однородным состоянием, *б* – пластина с наноструктурным слоем

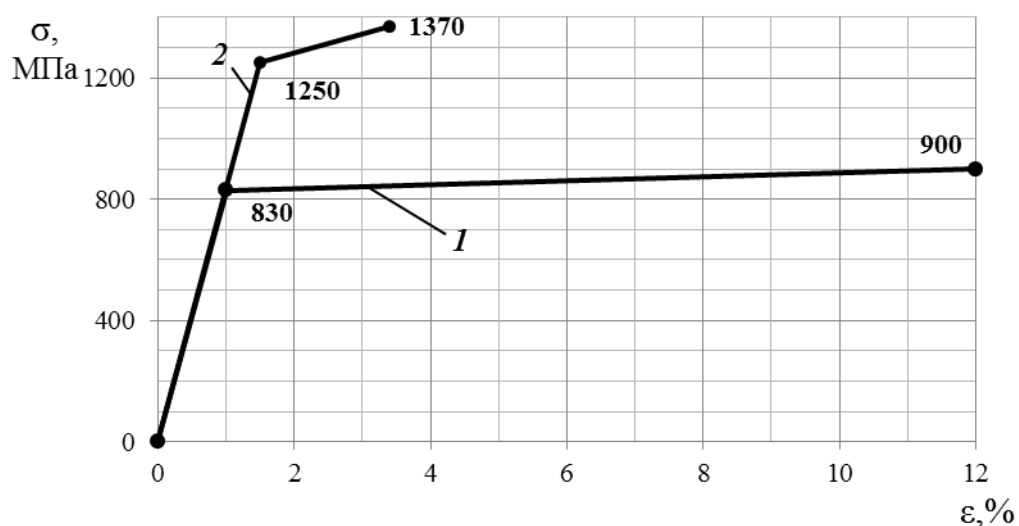


Рисунок 3.3 – Диаграмма растяжения обычного (кривая 1) и наноструктурного (кривая 2) титанового сплава Ti-6Al-4V

Физико-механические характеристики материалов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Физико-механические свойства Ti-6Al-4V

Материал	$E \times 10^{-5}$, МПа	ν	σ_T , МПа	σ_B , МПа
титановый сплав Ti-6Al-4V	0,83	0,32	830	900
наноструктурный сплав Ti-6Al-4V	0,83	0,32	1250	1370

где E – модуль упругости первого рода, ν – коэффициент Пуассона,
 σ_T – предел текучести материала, σ_B – предел прочности материала

В качестве расчетной схемы для одноосного растяжения пластины нагрузкой σ_0 выбрана $1/4$ часть пластины (рисунок 3.4, а, б).

В силу симметрии пластины:

- а) перемещения точек на линии 1-2 по оси X равны $u = 0$
- б) перемещения точек на линии 3-4 вдоль оси Y равны $v = 0$

На линии 1-5 прикладывалась растягивающая нагрузка σ_0 .

При составлении расчетной схемы для пластины с наличием наноструктурного слоя использовалась аналогичная расчетная схема (рисунок 3.4, б).

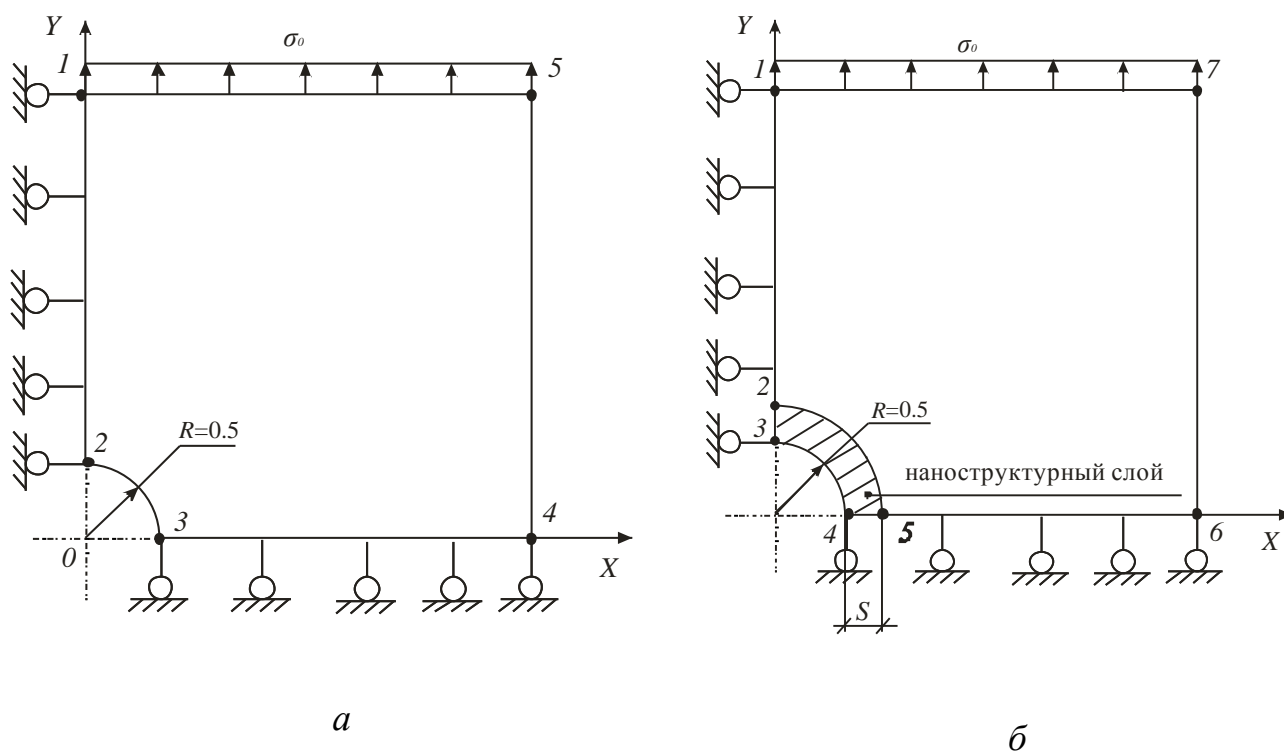


Рисунок 3.4 – Расчетная схема для пластины из материала с однородным структурным состоянием (а) и с наличием наноструктурного слоя толщиной s (б) при одноосном растяжении

Численное решение выполнено методом конечных элементов [44] с применением программно-вычислительного комплекса ANSYS [47], с учетом нелинейного поведения материала.

Известно, что вокруг круглого отверстия наблюдается большой градиент распределения напряжений. Для получения адекватных результатов, использовалось неравномерное разбиение на конечные элементы исследуемой области конструкции. Размеры конечных элементов подбирались путем опытного разбиения и сравнения полученных данных с известными результатами [31]. Так, в области отверстия круговая зона толщиной 1 мм разбивалась на конечные элементы треугольной формы с длиной ребра 0.05 мм. Следующая зона толщиной 2 мм – на треугольные элементы с длиной ребра 0,1 мм. Остальная часть пластины состояла из аналогичных элементов с длиной ребра 0,2 мм. Для уточнения решения в узловых точках, расположенных вблизи поверхности конструкции и стыка слоев в пластине с наноструктурным слоем, использовалось усреднение с весом [44]. Сеточный аналог пластины приведен на рисунке 3.5.

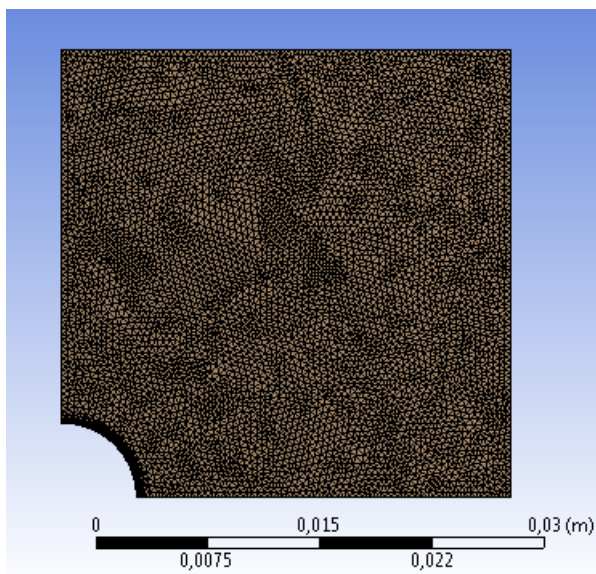


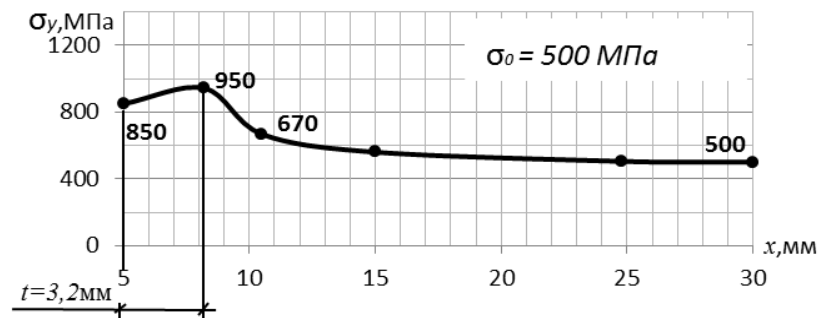
Рисунок 3.5 – Сеточный аналог $\frac{1}{4}$ пластины

При задании свойств материала в программно-вычислительном комплексе ANSYS, поведение материала выбиралось как билинейное изотропное упрочнение [83].

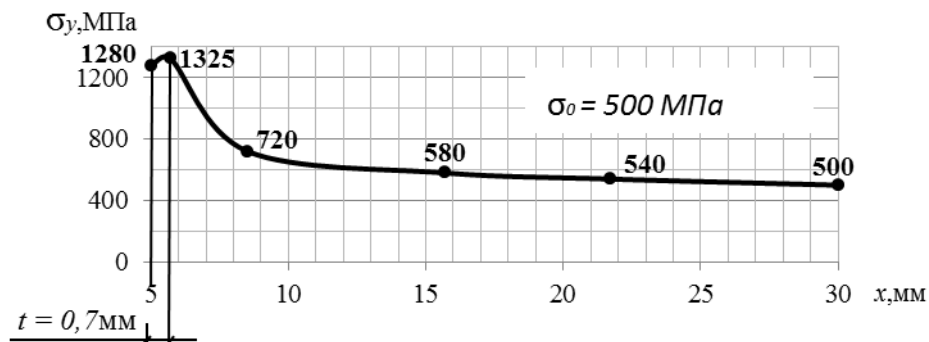
3.2.1 Анализ напряженно-деформированного состояния в пластине из обычного и наноструктурного материала при упругом и упругопластическом одноосном нагружении

На основании описанной выше методики выполнен расчет напряженно-деформированного состояния в пластинах при одноосном растяжении интенсивностью σ_0 , меняющейся в диапазоне от 200 до 500 МПа. При исследовании пластин с наноструктурным слоем, толщина слоя s варьировалась от 0,5 мм до 3 мм.

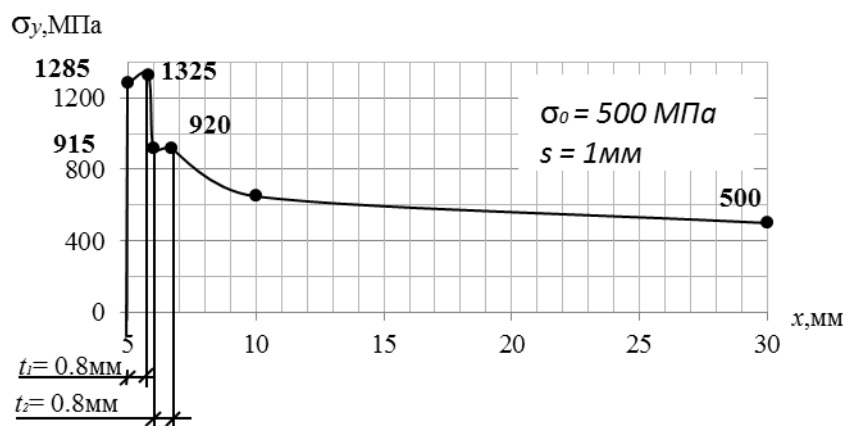
На рисунке 3.6, *а*, *б*, *в* в качестве примера приведены эпюры распределения нормальных напряжений σ_y при одноосном растяжении нагрузкой $\sigma_0 = 500$ МПа пластин из титанового сплава Ti-6Al-4V, наноструктурного сплава Ti-6Al-4V и неоднородных пластин с наноструктурным слоем толщиной $s = 1$ мм соответственно. Распределение осевых напряжений σ_y показаны в сечении в сечении 3 – 4 пластины из однородного материала (рисунок 3.4, *а*) и в сечении 4 – 6 для пластин с наноструктурным слоем (рисунок 3.4, *б*).



а



б



в

Рисунок 3.6 – Распределение осевых напряжений σ_y в пластине:

a – из титанового сплава Ti-6Al-4V, *б* – из наноструктурного Ti-6Al-4V,

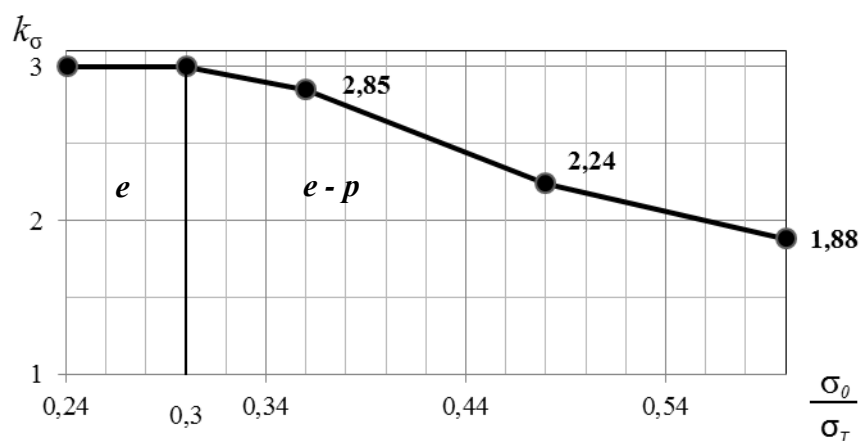
в – с наноструктурным слоем толщиной $s = 1$ мм

Как видно (рисунок 3.6, *a*) пластические деформации распространяются в тело пластины на глубину $t = 3,2$ мм и при этом осевые напряжения в этой точке достигают максимального значения $\sigma_y^{\max} = 950$ МПа. Образование зоны пластической деформации связано с возникновением в данном месте плоского напряженного состояния с одинаковыми знаками главных напряжений, что затрудняет пластическое течение и делает эти слои более жесткими [1]. В случае пластины из наноструктурного материала (рисунок 3.6, *б*), глубина распространения зоны пластических деформаций на порядок меньше и составляет $t = 0,8$ мм, а уровень максимальных напряжений увеличивается на 45% и достигает значения $\sigma_y^{\max} = 1325$ МПа.

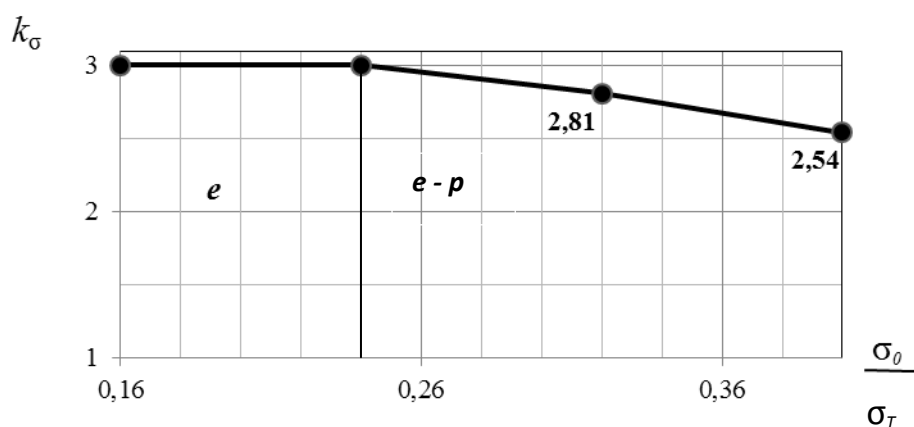
Особый интерес представляет изучение характера распределения напряжений σ_y при осевом нагружении неоднородной пластины с наличием наноструктурного слоя [38]. На рисунке 3.6, *в* показан характер распределения осевых напряжений σ_y . Видно, что в слое 1 глубина проникновения пластических деформаций составляет 0,8 мм, при этом максимум напряжений равен $\sigma_y^{\max} = 1325$ МПа, во втором слое пластины прослеживается возникновение второго максимума напряжений $\sigma_y^{\max} = 920$ МПа. Отметим, что на границе слоев

происходит резкое снижение уровня напряжений до 915 МПа. Таким образом, в пластине наблюдается формирование двух зон пластических деформаций. Первая развивается в слое из наноструктурного материала и распространяется вглубь пластины на $t_1 = 0,8$ мм. Вторая зона пластичности возникает во второй части пластины из обычного титанового сплава Ti-6Al-4V, глубина которой равна $t_2 = 0,8$ мм от границы слоев 1 и 2. Интересно отметить, что в области между зонами пластичности t_1 и t_2 поведение материала слоя упругое.

Для оценки работоспособности элементов конструкций в условиях пластичности важно знать значения коэффициента концентрации напряжений k_σ (рисунок 3.7, а, б).



а



б

Рисунок 3.7 – Зависимость k_σ от отношения растягивающего напряжения на невозмущенной границе σ_0 к пределу текучести материала σ_T : в пластинах из Ti-6Al-4V(а) и наноструктурного Ti-6Al-4V (б)

На рисунке 3.7, *а*, *б* приведены зависимости k_{σ} от отношения растягивающего напряжения на невозмущенной границе σ_0 к пределу текучести материала σ_T в пластинах из Ti-6Al-4V и наноструктурного Ti-6Al-4V соответственно.

Анализ результатов показал, что упругое деформирование пластины из титанового сплава Ti-6Al-4V происходит при значениях отношения σ_0/σ_T от 0 до 0,3 (рисунок 3.7, *а*), а из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V при уровне σ_0/σ_T от 0 до 0,24 (рисунок 3.7, *б*). Увеличение нагрузки σ_0 приводит к развитию зон пластических деформаций и уменьшению значения коэффициента концентрации напряжений k_{σ} .

Зависимости глубины пластических деформаций t в однородных пластинах от величины нагружения σ_0 представлены на рисунке 3.8. Так, при растяжении пластины из титанового сплава Ti-6Al-4V (рисунок 3.8 – пунктирная линия) возникновение зоны пластических деформаций прослеживается уже при величине σ_0 более 240 МПа, увеличение уровня нагрузки приводит к дальнейшему распространению пластических деформаций.

Подобная зависимость наблюдается и при растяжении пластины из наноструктурного материала (рисунок 3.8 – сплошная линия), в данном случае происходит снижение уровня t . Так при $\sigma_0 = 500$ МПа глубина распространения составляет $t = 0,7$ мм, что практически на 78% меньше, чем в предыдущем примере.

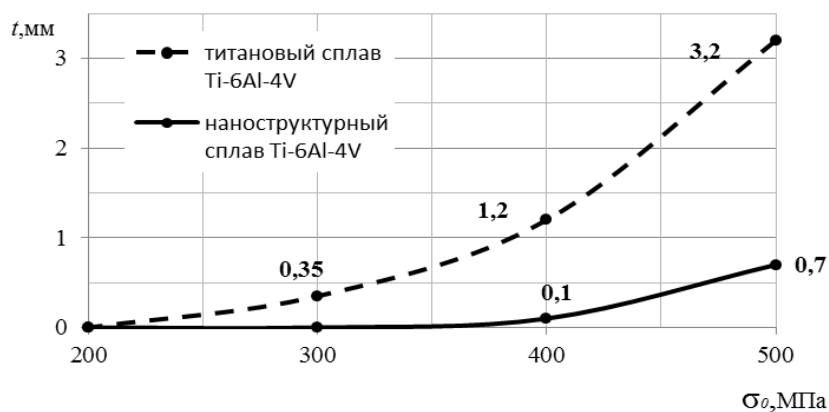
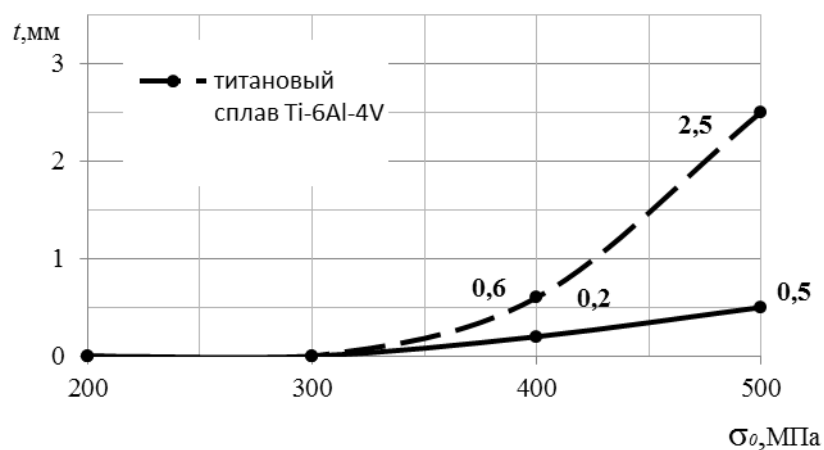
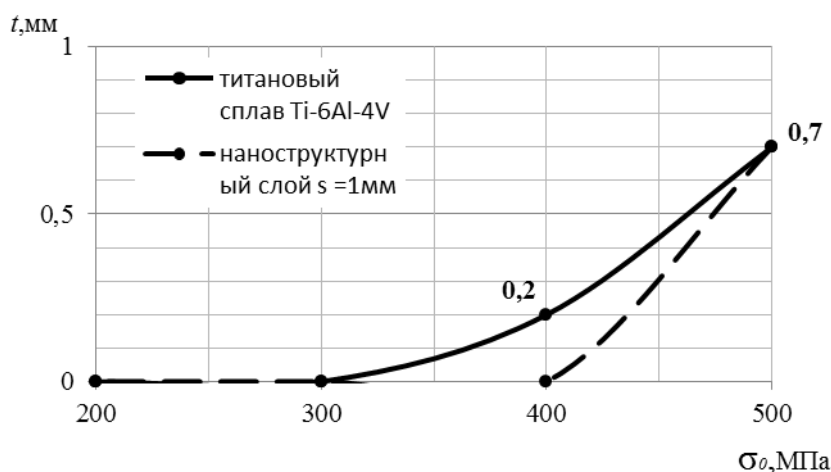


Рисунок 3.8 – Зависимость глубины распространения пластических деформаций t в однородных пластинах от величины нагружения σ_0

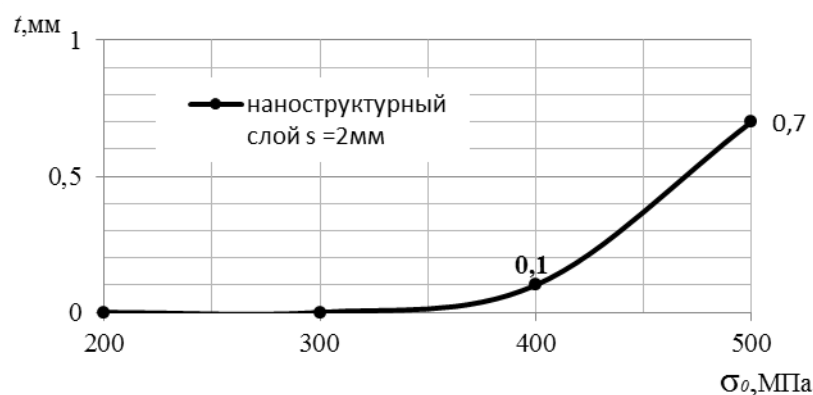
На рисунке 3.9, *а*, *б*, *в* показана зависимость глубины распространения пластических деформаций в пластинах с неоднородной структурой от величины нагружения σ_0 . Сплошной линии соответствует глубина проникновения в 1 слой, пунктирной линии – в обычном материале (слой 2).



а



б



в

Рисунок 3.9 – Зависимость глубины распространения пластических деформаций t в пластинах с наноструктурным слоем от величины нагружения σ_0 :
 а – с наноструктурным слоем $s = 0,5$ мм; б – с наноструктурным слоем $s = 1$ мм;
 в – с наноструктурным слоем $s = 2$ мм

Интересно отметить, что при толщине наноструктурного слоя $s = 0,5$ мм и при значении растягивающей нагрузки $\sigma_0 = 500$ МПа пластическое течение наблюдается во всем слое и переходит в область обычного материала на глубину $t = 2,5$ мм (рисунок 3.9, а). Установлено, что развитие пластических деформаций в наноструктурном слое начинается при $\sigma_0 = 380$ МПа, а в области обычного материала при $\sigma_0 = 240$ МПа.

Отметим, что при толщине первого слоя $s = 1$ мм в пластине формируются две зоны пластического течения. Первая возникает в наноструктурном слое и при $\sigma_0 = 500$ МПа распространяется на $t = 0,7$ мм, вторая в крупнозернистом сплаве

и составляет 0,7 мм (рисунок 3.9, б). Определено, что пластические деформации в слое 1 возникают при $\sigma_0 = 380$ МПа, в области обычного материала при $\sigma_0 = 400$ МПа. Рост значения порогового уровня σ_0 для обычного материала обуславливается увеличением толщины наноструктурного слоя.

Таким образом, следствием увеличения толщины первого слоя является снижение уровня t в титановом сплаве Ti-6Al-4V (слой 2). Так при $s = 2$ мм образование зоны пластического течения наблюдается только в наноструктурном материале и отсутствует во втором слое пластины (рисунок 3.9, в).

Для сравнительной оценки напряженного состояния в исследуемых пластинах, на рисунке 3.10 приведен характер распределения отношения σ_y / σ_T^* в теле пластин. Сплошная линия на рисунке 3.10 соответствует крупнозернистому Ti-6Al-4V; пунктирная – наноструктурному сплаву; штрихпунктирная – пластине с наноструктурным слоем 0,2 мм.

Из рисунка 3.10 видно, что при одноосном растяжении пластин, наиболее напряженное состояние наступает в крупнозернистом материале, меньший уровень – в пластине с наноструктурным слоем. Наименее напряженное состояние прослеживается в отношении пластины из однородного наноструктурного материала.

Отношение σ_y / σ_T^* характеризует напряженное состояние в пластине, так, при $\sigma_y / \sigma_T^* > 1$ в теле развиваются пластические деформации, а при $\sigma_y / \sigma_T^* = 1$ нагружение происходит в упругой зоне. Видно, что наибольшие пластические деформации возникают в пластине из Ti-6Al-4V.

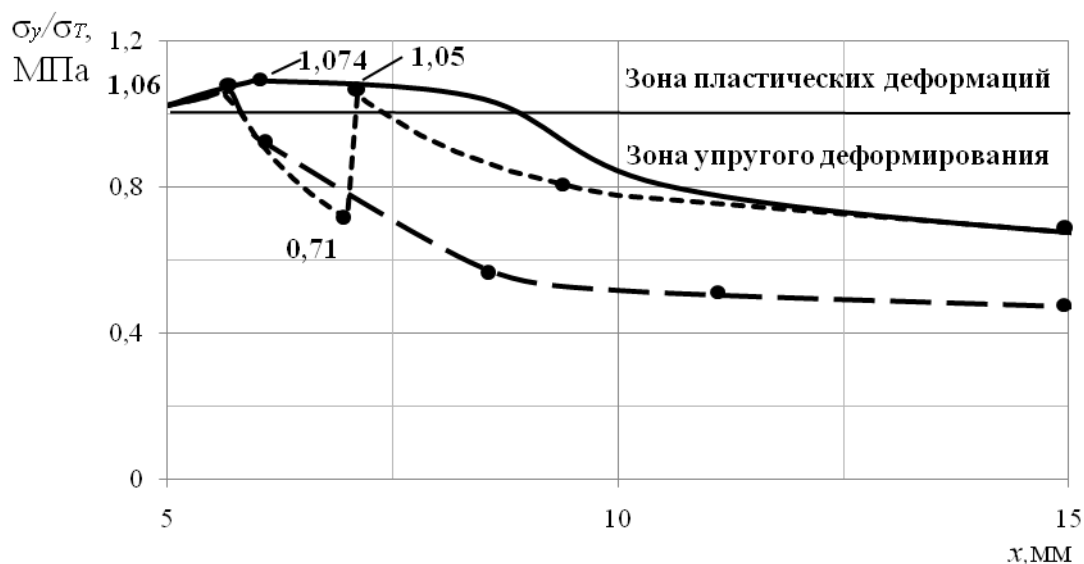


Рисунок 3.10 – Распределение отношения σ_y/σ_T в характерном сечении тела пластины

3.2.2 Анализ остаточных напряжений в пластине из обычного и наноструктурного материала после разгрузки

По окончании нагружения и разгрузки в теле пластины, вследствие неоднородности деформаций, формируются остаточные напряжения и деформации [58].

На рисунке 3.11 показан характер распределения остаточных осевых напряжений σ_y^* (в сечении 3-4, рисунок 3.3, а) в пластине из титанового сплава Ti-6Al-4V, сформированных в результате осевого растяжения интенсивностью $\sigma_0 = 500$ МПа и последующей разгрузки. Видно, что наибольшие сжимающие остаточные напряжения возникают на контуре отверстия, в точке пересечения контура отверстия с осью X , и достигают значения $\sigma_y^* = 760$ МПа. Растягивающие остаточные напряжения действуют в области однородного напряженного состояния и их величина существенно ниже сжимающих, при этом их максимальный уровень составляет 170 МПа.

Подобное распределение остаточных напряжений характерно и для пластины из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V после осевого нагружения $\sigma_0 = 500$ МПа (рисунок 3.11). Отметим, что наблюдается только

изменение уровня напряжений, так величина сжимающих σ_y^* падает до 330 МПа, а растягивающих – 95 МПа.

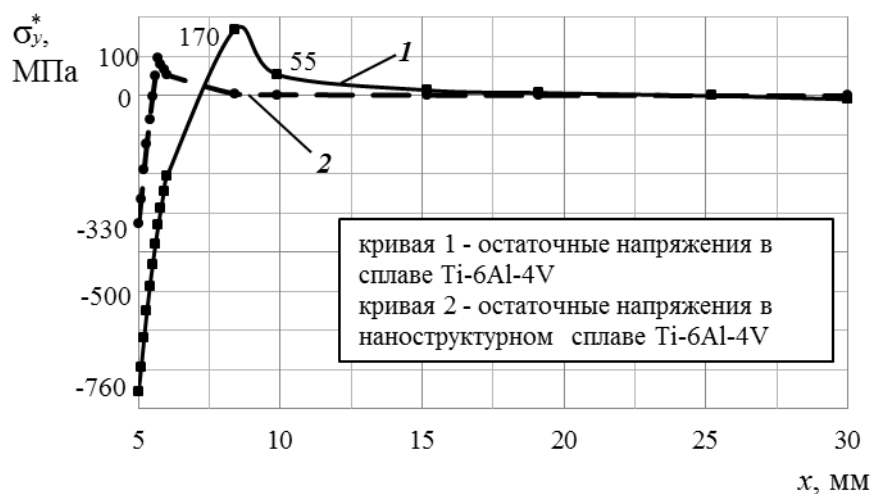
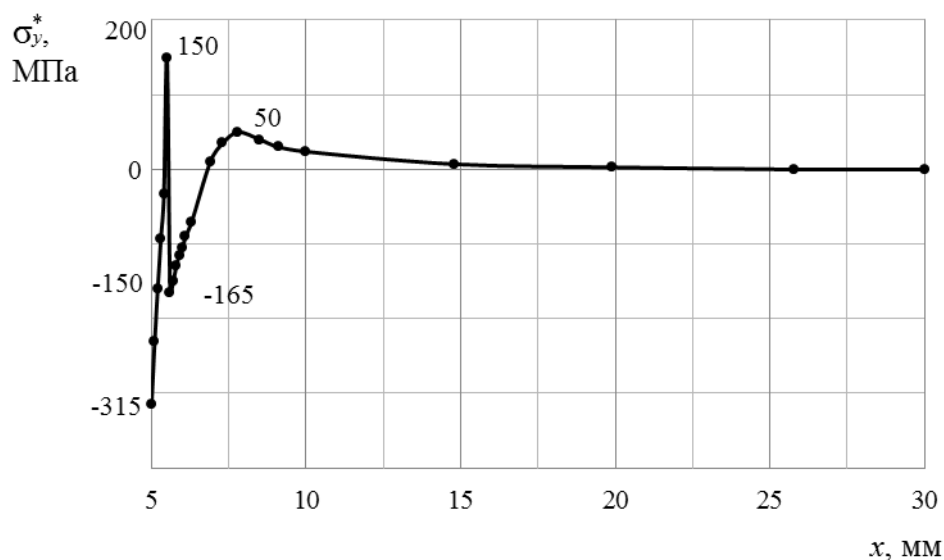


Рисунок 3.11 – Поля остаточных осевых напряжений σ_y^* в пластине из обычного и наноструктурного сплава Ti-6Al-4V

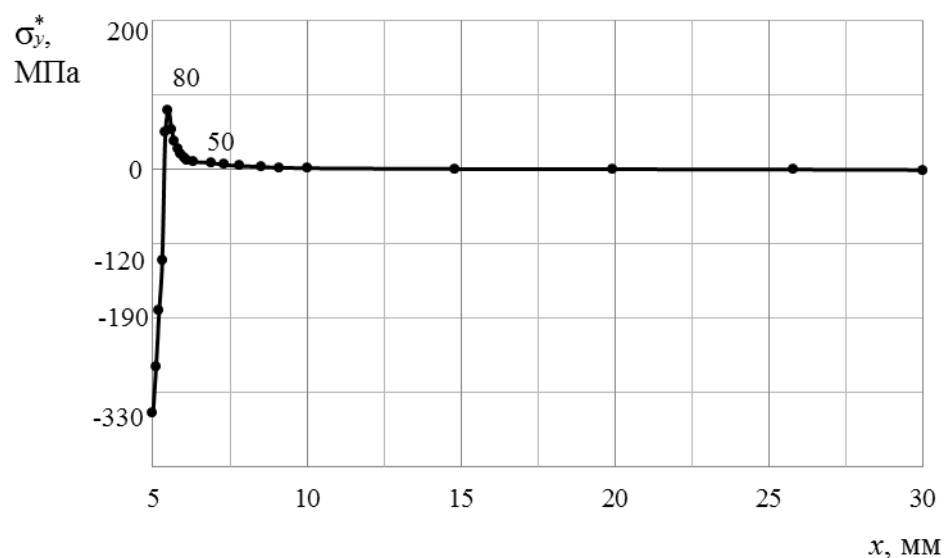
Особый интерес представляет анализ распределения остаточных напряжений в пластине из титанового сплава с наличием наноструктурного слоя по внутреннему диаметру отверстия (рисунок 3.12, а, б).

Видно, что в пластине поля остаточных осевых напряжений σ_y^* имеют 2 участка с сжимающими и 2 участка с растягивающими напряжениями. При этом их уровень составляет 315 МПа и 165 МПа для сжимающих, 150 МПа и 50 МПа для растягивающих напряжений. Данный характер распределения σ_y^* обусловлен различиями физико-механических свойств материала в наноструктурном слое и в крупнозернистом объеме тела пластины.

Заметим, что такие же поля остаточных осевых напряжений формируются и в пластинах со слоями толщиной s от 0,5 мм до 2 мм. Однако уже при $s=2$ мм распределение σ_y^* имеет другой вид, аналогичный пластине состоящей из материала с однородной структурой (рисунок 3.12, б). При этом уровень остаточных напряжений близок к значениям σ_y^* в пластине из наноструктурного материала (рисунок 3.11, кривая 2).



a



б

Рисунок 3.12 – Распределение остаточных осевых напряжений σ_y^* в пластине:

a – с наноструктурным слоем толщиной $s = 0,5$ мм, *б* – с наноструктурным слоем толщиной $s = 2$ мм

В таблице 3.2 приведены данные по результатам исследования уровня максимальных осевых остаточных напряжений в пластинах, сформированных при одноосном растяжении интенсивностью $\sigma_0 = 200, 300, 400, 500$ МПа.

Анализ приведенных данных показывает, что с увеличением толщины наноструктурного слоя до 2 мм в пластине происходит рост уровня максимальных сжимающих осевых напряжений в наноструктурной зоне до 328 МПа и снижение

до нуля в крупнозернистом материале. Максимальные растягивающие осевые напряжения в первом слое составляют 13 МПа, во втором слое – 136 МПа. При увеличении толщины s до 2 мм уровень растягивающих напряжений достигает значения 80 МПа в наноструктурном слое и отсутствуют в обычном материале.

Таблица 3.2 – Максимальные осевые остаточные напряжения σ_y^* в пластине

σ_0 , МПа		200	300	400	500
Наноструктурный титановый сплав Ti-6Al-4V					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	30	330
	Растягивающие	0	0	5	95
Крупнозернистый титановый сплав Ti-6Al-4V					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	130	450	760
	Растягивающие	0	20	20	170
Пластина из титанового сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя $s = 0.5$ мм					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	25/135	300/370
	Растягивающие	0	0	40/25	15/140
Пластина из титанового сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя $s = 1$ мм					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	25	315/190
	Растягивающие	0	0	6	150/50
Пластина из титанового сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя $s = 1,5$ мм					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	25	320/35
	Растягивающие	0	0	6	150/50
Пластина из титанового сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя $s = 2$ мм					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	30	330
	Растягивающие	0	0	5	80
Пластина из титанового сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя $s = 3$ мм					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	30	330
	Растягивающие	0	0	3	80

3.3 Расчет напряженно-деформированного состояния в пластине с запрессованным в отверстие кольцом из наноструктурного материала при одноосном нагружении

Соединения с натягом представляют собой напряженные посадки. При насадке охватывающей детали (втулки, ступицы и т.д.) с меньшим диаметром отверстия на охватываемую деталь (ось, вал и т.д.) благодаря силе упругости на поверхности сопряжения возникает сила сцепления, препятствующая взаимному смещению деталей.

Соединения с натягом получают механической запрессовкой, с помощью нагрева охватывающей или охлаждения охватывающей детали, а также путем гидрораспора. Эти высоконадежные соединения позволяют передавать значительные осевые усилия и крутящие моменты. Они просты по конструкции и технологии изготовления

При проектировании соединений важно иметь точные данные по предельным и действующим на них нагрузкам, что в сочетании с устанавливаемым запасом прочности обеспечит необходимую надежность. Кроме того, посадка втулки вызывает концентрацию напряжений у вала, снижающую его предел выносливости.

В данной главе рассмотрен пример использования кольца из наноструктурного материала для запрессовки в отверстие пластин.

3.3.1 Расчет технологических остаточных напряжений, сформированных при получении соединения с натягом

В данном разделе была поставлена задача по исследованию напряженно-деформированного состояния, возникающего в процессе получения соединения и по окончании создания натяга. Объектом исследования являлись пластины с отверстием с запрессованными кольцами. При этом материал пластины соответствовал титановому сплаву Ti-6Al-4V, а материал кольца – наноструктурному сплаву Ti-6Al-4V. Физико-механические свойства материалов и геометрические размеры приведены в параграфе 3.2 (рисунок 3.3; таблица 3.1).

Моделирование процесса получения соединения с натягом состояло из двух шагов. Первому шагу соответствовало охлаждение кольца из наноструктурного материала и установка его в отверстие пластины. На втором шаге проводилось моделирование процесса нагрева данного кольца до комнатной температуры.

Численное решение выполнено методом конечных элементов с применением программно-вычислительного комплекса ANSYS.

На основании выше описанной методики был выполнен расчет НДС в пластинах при запрессовке кольца. Толщина кольца варьировалась в диапазоне от 2 мм до 5 мм, а диаметр отверстия пластины от 5 мм до 13 мм.

На рисунке 3.13 приведены поля распределения технологических напряжений σ_y^* по характерному сечению, сформированных при запрессовке колец. Распределение осевых технологических напряжений σ_y^* показаны в сечении 4 – 6 (рисунок 3.4, б).

Видно, что в кольце возникают сжимающие напряжения, при этом минимальные напряжения формируются в зоне стыка кольца с пластиной, а максимальные – по внутреннему диаметру кольца. Так, для запрессованного кольца толщиной $t = 2$ мм максимальные сжимающие напряжения достигают уровня 160 МПа, а минимальные – 140 МПа. Отметим, что с увеличением толщины кольца происходит снижение уровня напряженного состояния. Например, при толщине кольца 5 мм уровень максимальных напряжений по сравнению с кольцом толщиной $t = 2$ 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, по мере удаления от области стыка деталей происходит плавное снижение уровня напряжений. Необходимо отметить, что с увеличением слоя кольца наблюдается увеличение 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%.

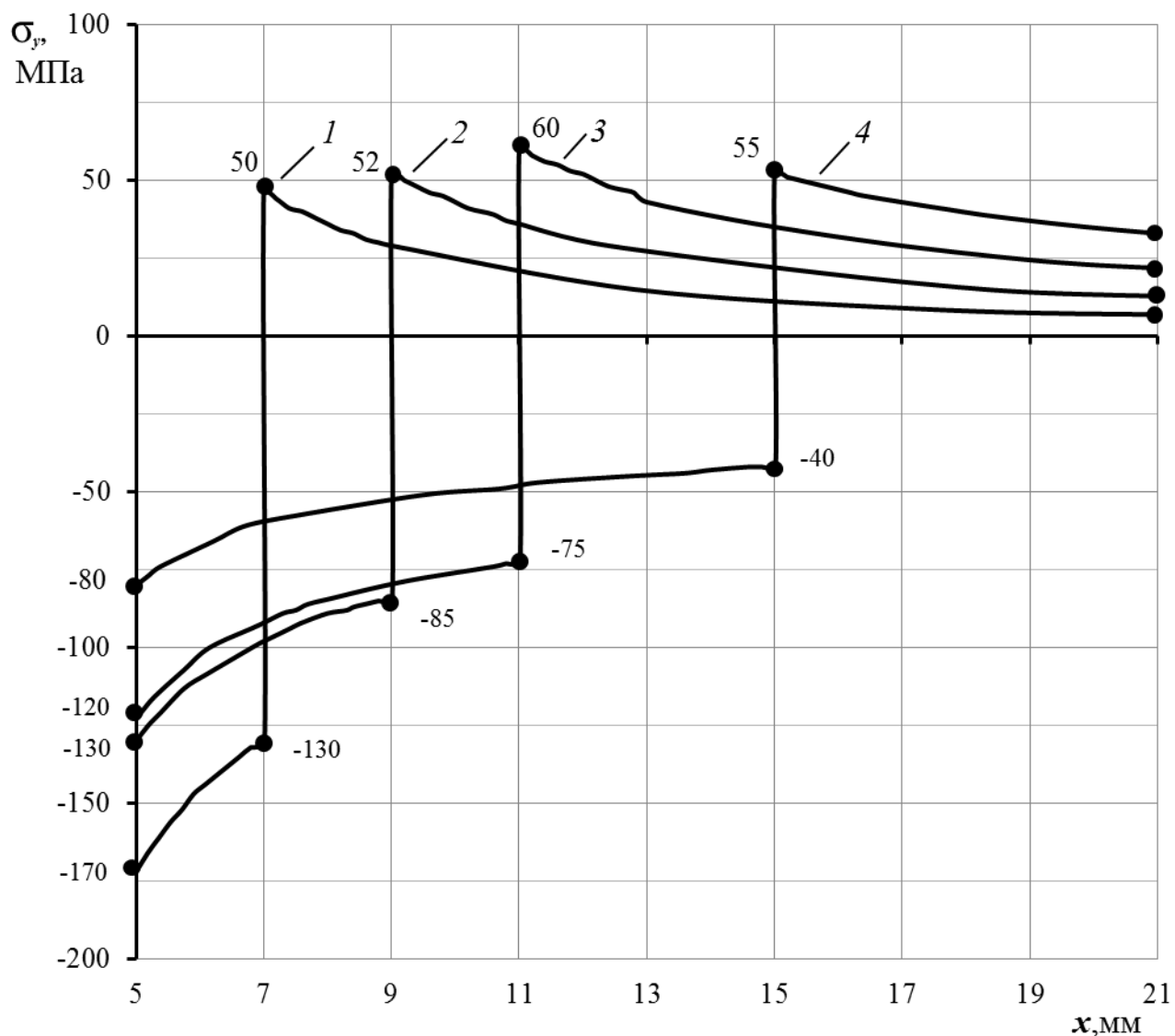


Рисунок 3.13 – Характер распределения осевых технологических напряжений σ_y^*

после запрессовки наноструктурного кольца:

кривая 1 – пластина с запрессованным кольцом толщиной 2мм,

кривая 2 – пластина с запрессованным кольцом толщиной 4мм,

кривая 3 – пластина с запрессованным кольцом толщиной 6мм,

кривая 4 – пластина с запрессованным кольцом толщиной 10мм

Достоверность полученных результатов была проверена аналитическим решением поставленной задачи по известным выражениям механики деформируемого тела:

$$\sigma_{\text{п}} = p_{\text{к}} \frac{(b^2 + c^2)}{b^2 - c^2} \quad (3.32)$$

$$p_K = \frac{E\Delta}{2c^3} \frac{(c^2 + a^2)(b^2 + c^2)}{b^2 + a^2} \quad (3.33)$$

где a – внутренний радиус кольца, c – внешний радиус кольца, b – $1/2$ длины пластины, p_K – контактное давление между кольцом и пластиной, $\sigma_{\text{п}}$ – максимальное давление в пластине

На рисунке 3.14 приведены результаты аналитического расчета и математического эксперимента.

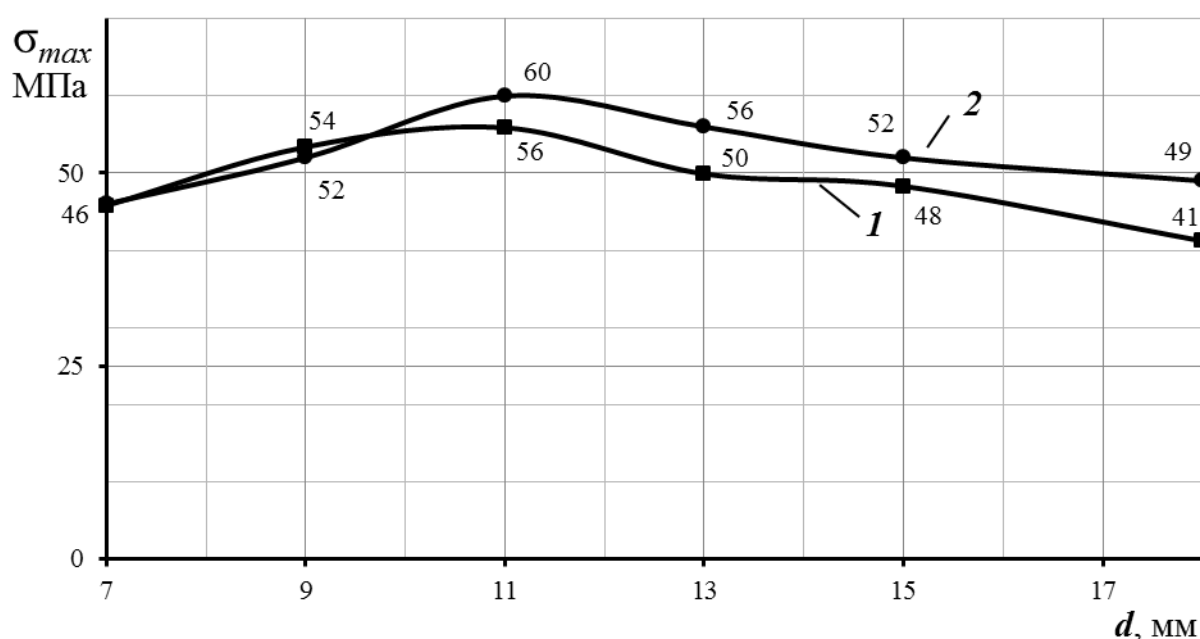


Рисунок 3.14 – Значение максимальных растягивающих напряжений σ_{ymax}^*

в пластине при натяге: кривая 1 – результаты аналитического расчета,

кривая 2 – результаты расчета методом МКЭ.

3.3.2 Влияние одноосного нагружения на напряженно-деформированное состояние пластины с запрессованным кольцом

На втором этапе проводилось нагружение пластины одноосной растягивающей нагрузкой.

В качестве расчетной схемы для одноосного растяжения пластины с запрессованным кольцом выбрана $1/4$ часть пластины (рисунок 3.15).

В силу симметрии пластины:

- а) перемещения точек на линии 1-2 по оси X равны $u = 0$;
 б) перемещения точек на линии 3-4 вдоль оси Y равны $v = 0$.

На линии 1-5 прикладывалась растягивающая нагрузка σ_0

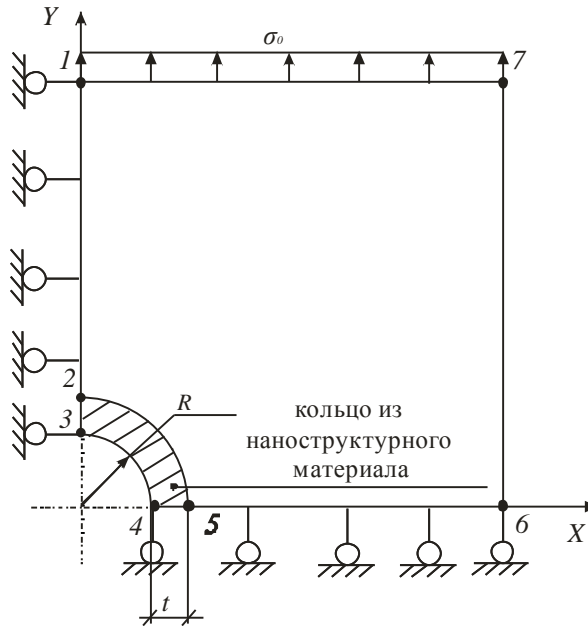


Рисунок 3.15 – Расчетная схема для пластины с запрессованным кольцом из наноструктурного материала толщиной t при одноосном растяжении

В качестве примера на рисунке 3.16 представлены поля распределения напряжений в характерном сечении при одноосном растяжении пластины с запрессованным кольцом интенсивностью $\sigma_0 = 40$ МПа.

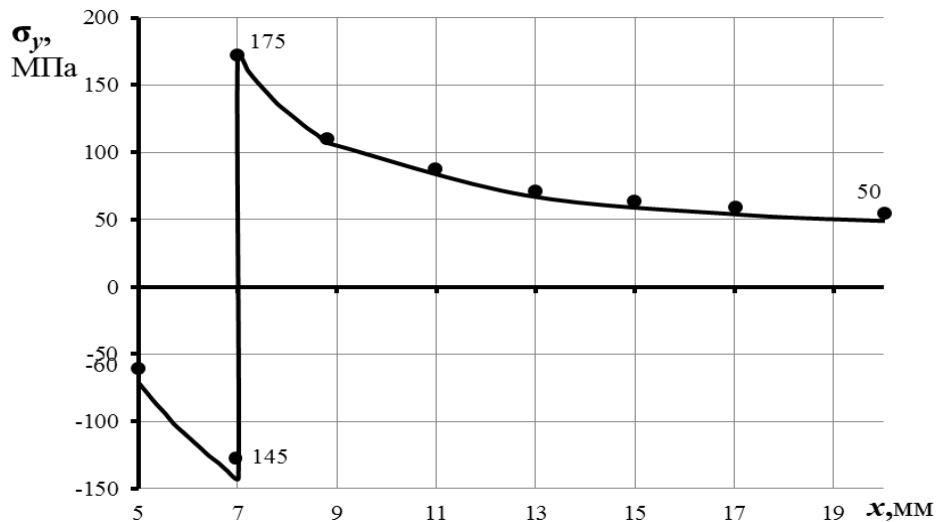


Рисунок 3.16 – Распределение осевых напряжений σ_y в соединении при одноосном растяжении пластины интенсивностью $\sigma_0 = 40$ МПа

Выявлено, влияние толщины кольца на напряженно-деформированное состояние пластины. Установлено, что при значении интенсивности одноосного нагружения $\sigma_0 \geq \sigma_{кр}$ происходит потеря контакта между кольцом и пластиной. При этом максимальное значение $\sigma_{кр}$ достигает при толщине кольца $t = 6$ мм (рисунок 3.17). Еще одной особенностью является, то что при $\sigma \leq \sigma_{кр}$ данный элемент конструкции работает в зоне упругости. При дальнейшем увеличении толщины кольца уровень критической растягивающей нагрузки существенно снижается.

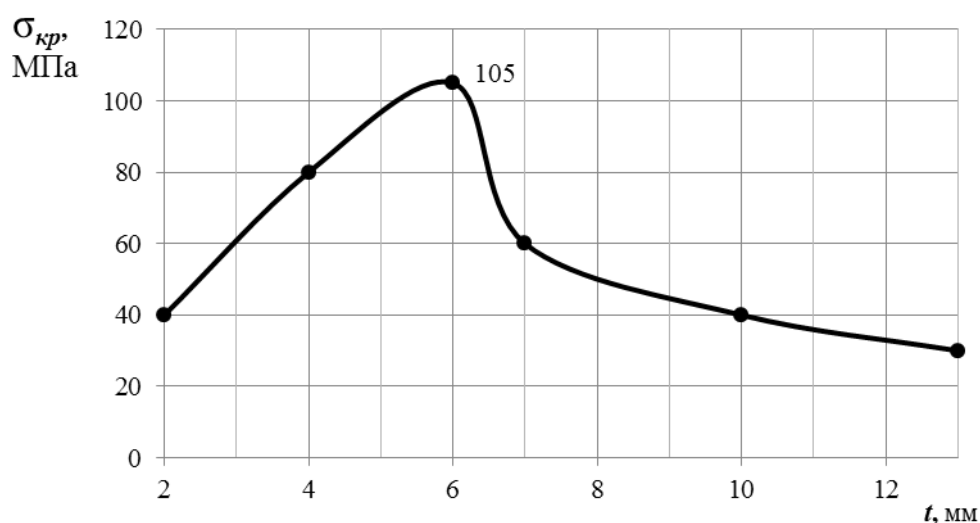


Рисунок 3.17 – Зависимость критического значения интенсивности одноосного нагружения от толщины наноструктурного кольца

3.3.3 Влияние технологической наследственности, после РКУП, на характер распределения НДС в пластине с кольцом из наноструктурного материала при упругом одноосном нагружении

В данном разделе приведены результаты исследования влияния технологической наследственности, после РКУП, на характер распределения НДС в пластине с отверстием с запрессованным кольцом из наноструктурного титанового сплава после создания натяга и при последующем упругом одноосном нагружении.

На рисунке 3.18 в качестве примера приведены поля распределения осевых остаточных напряжений σ_y^* в характерном сечении соединения после запрессовки

кольца $t = 2$ мм в отверстие пластины, где кривой 1 соответствуют расчеты НДС в соединении с учетом технологической наследственности в заготовке кольца после РКУП, кривой 2 – расчеты без учета технологических напряжений.

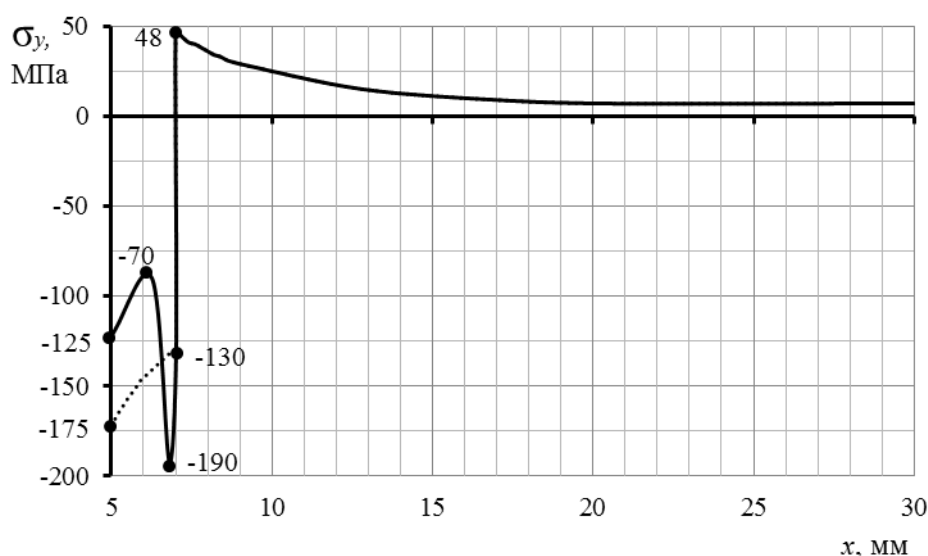


Рисунок 3.18 – Поля осевых остаточных напряжений σ_y^* в характерном сечении соединения после запрессовки кольца $t = 2$ мм в отверстие пластины

Видно, что наличие технологической наследственности в кольце из наноструктурного сплава оказывает существенное влияние на характер и уровень напряженного состояния. При этом происходит снижение уровня σ_y^* на кромке кольца по внутреннему диаметру на 28% по сравнению с расчетами аналогичного соединения без учета технологической наследственности. Отметим, что на глубине 1 мм от кромки кольца наблюдается скачок напряжений, и уровень сжимающих напряжений снижается до 70 МПа. Однако у стыка кольца с пластиной значение σ_y^* достигает значения 190 МПа. Данное различие напряженного состояния в соединениях объясняется наличием значительных технологических напряжений в заготовке кольца после РКУП (см. раздел 2).

На рисунке 3.19 в качестве примера приведены распределение полей осевых напряжений в соединении при упругом одноосном растяжении пластины, где кривой 1 соответствуют расчеты НДС в соединении с учетом технологической

наследственности в заготовке кольца после РКУП, кривой 2 – расчеты без учета технологических напряжений.

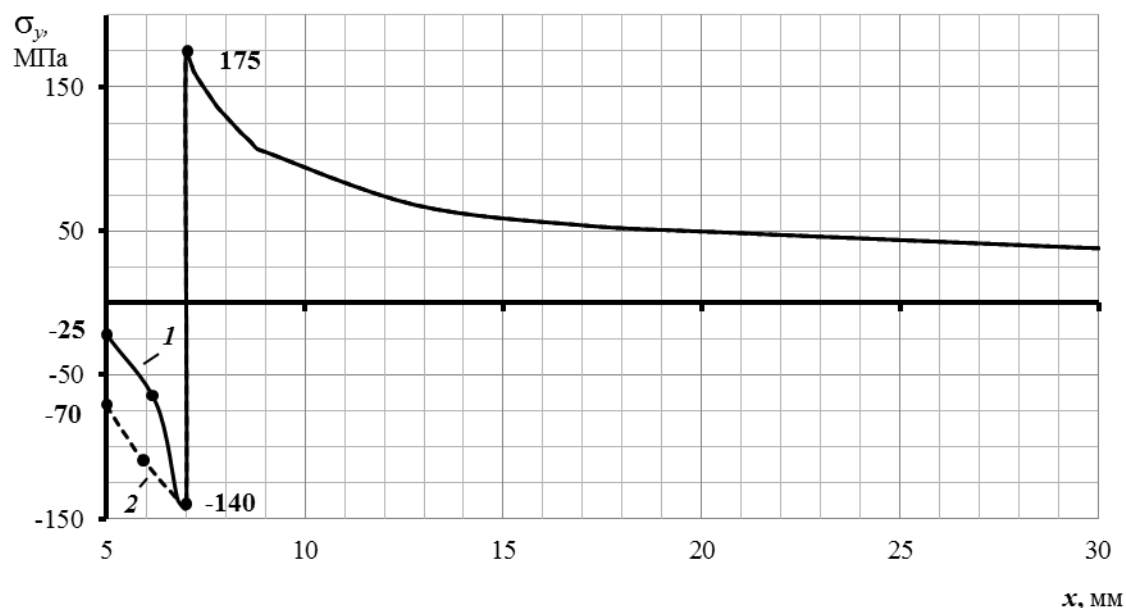


Рисунок 3.19 – Распределение полей напряжений в характерном сечении при одноосном растяжении интенсивностью 40 МПа

Видно, что в случае учета технологической наследственности в заготовке после РКУП, уровень НДС в кольце несколько ниже (кривая 1), чем напряженное состояние, рассчитанное без учета технологической наследственности (кривая 2). Так уровень минимальных сжимающих напряжений снижается на 35%, а максимальных остается на прежнем уровне. При этом изменение напряженного состояния в кольце при одноосном нагружении не оказывает влияние на НДС в пластине.

Интересно отметить, что наличие технологической наследственности в заготовке кольца также не оказывает влияние 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.

3.4 Расчет напряженно-деформированного состояния в стержнях с выточками из обычного и наноструктурного материала при одноосном нагружении

В данном разделе приведены результаты исследования характера распределения напряжений и деформаций в стержнях с выточкой при одноосном растяжении и остаточных напряжений, сформированных после разгрузки. Материалы стержней соответствовали наноструктурному и крупнозернистому титановому сплаву Ti-6Al-4Vс наличием наноструктурного слоя в зоне концентратора напряжений. Геометрические размеры рассмотренных стержней приведены на рисунке 3.20. Физико-механические свойства материалов, а также диаграмма растяжения представлены в таблице 3.1 и рисунке 3.3 соответственно.

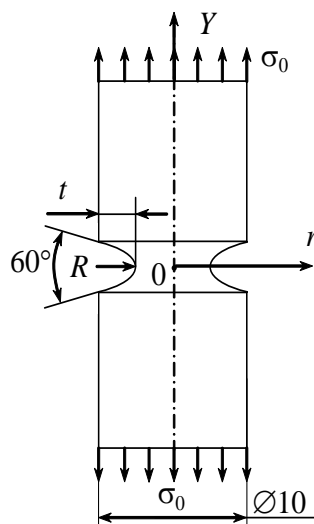


Рисунок 3.20 – Геометрические размеры стержня с выточкой:

$$t = 0,98 \text{ мм}, R = 0,1 \text{ мм}$$

В качестве расчетной схемы для одноосного растяжения нагрузкой σ_0 стержня с выточкой выбрана 1/2 часть выточки. В силу симметрии стержня:

а) перемещения точек на линии 2 - 3, по оси OY равны нулю, $u = 0$;

На линии 1 - 4 прикладывалась растягивающая нагрузка σ_0 .

На рисунке 3.21 приведена расчетная схема для одноосного растяжения стержня нагрузкой σ_0 .

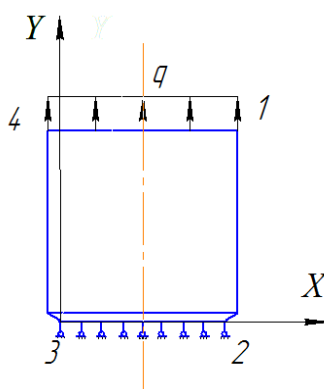
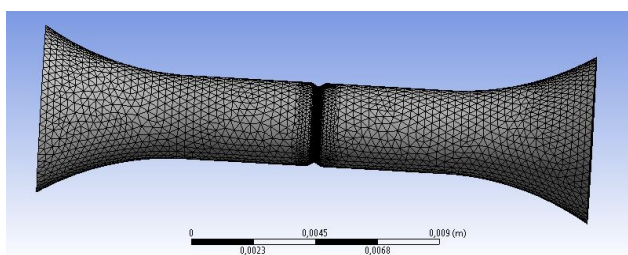


Рисунок 3.21 – Расчетная схема для стержня с выточкой при одноосном растяжении

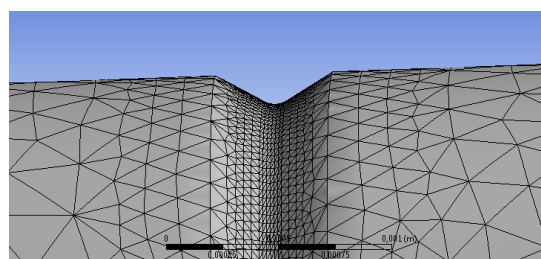
Численное решение выполнено методом конечных элементов с применением программно-вычислительного комплекса ANSYS [112] в осесимметричной постановке с учетом нелинейного поведения материала.

При построении сеточного аналога стержня с выточкой была использована методика, описанная в параграфе 3.2. Выявлено, что рациональным размером является длина ребра 3×10^{-1} мм. Дальнейшее уменьшение размера приводило к увеличению алгебраической ошибки и, как следствие, к ухудшению качества результатов.

На рисунке 3.22, *а*, *б* показан сеточный аналог рабочей части цилиндра. Видно, что в зоне концентратора напряжений производилось сгущение сетки (рисунок 3.22, *б*)



а



б

Рисунок 3.22 – Сеточный аналог для стержня с выточкой:

а – рабочая часть стержня, *б* – сеточный аналог выточки

3.4.1 Анализ напряженно-деформированного состояния в стержнях с выточкой из обычного и наноструктурного материала при упругом и упругопластическом одноосном нагружении

Выполнен расчет НДС и определены остаточные напряжения в стержнях с выточкой при одноосном растяжении интенсивностью σ_0 , меняющейся в диапазоне от 200 до 500 МПа. При исследовании стержня с наноструктурным слоем, толщина слоя s варьировалась от 0,5 мм до 1 мм.

В качестве примера, на рисунке 3.23, *а*, *б* приведены эпюры нормальных осевых напряжений σ_y при одноосном растяжении нагрузкой $\sigma_0 = 500$ МПа стержней с выточкой, выполненных из обычного и наноструктурного Ti-6Al-4V соответственно.

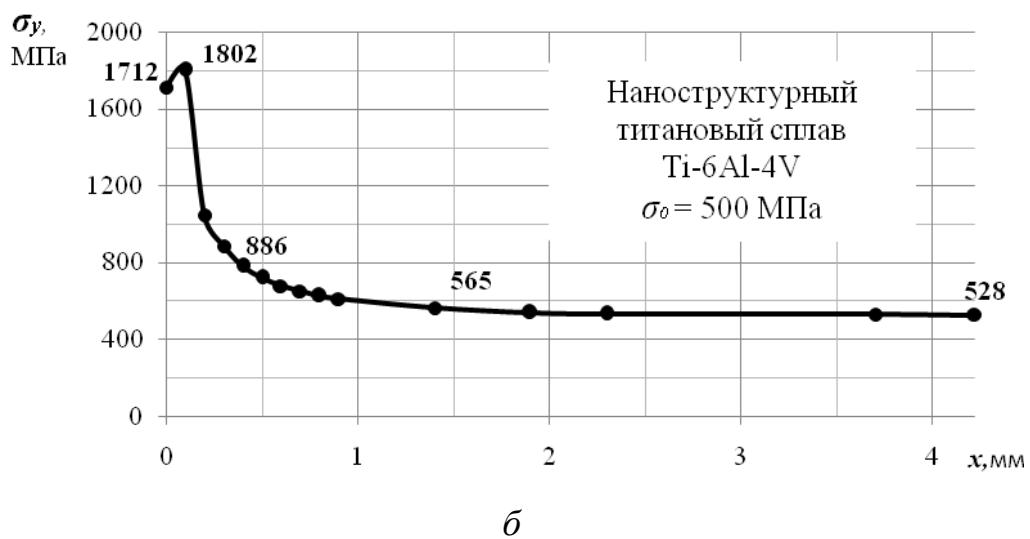
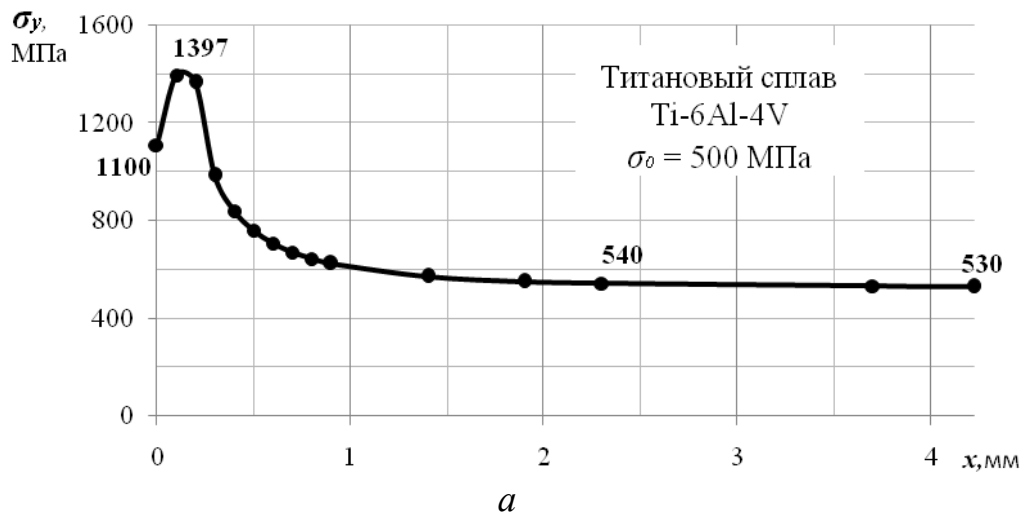


Рисунок 3.23 – Распределение осевых напряжений σ_y в стержне:

а – из титанового сплава Ti-6Al-4V, *б* – из наноструктурного Ti-6Al-4V

Как видно (рисунок 3.23, *a*) максимум осевых напряжений σ_y на линии 3 – 2 (рисунок 3.21) сдвигается от кромки выточки вглубь стержня по оси r на 0,12 мм и достигает уровня $\sigma_y^{\max} = 1397$ МПа. При этом на кромке выточки σ_y принимает значение 1100 МПа. В случае наноструктурного титанового сплава характер распределения полей осевых напряжений σ_y аналогичен предыдущему. Зона пластических деформаций распространяется на глубину $t = 0,05$ мм, а максимальные значения напряжений составляют $\sigma_y = 1802$ МПа.

Особый интерес, составляет изучение характера распределения напряжений σ_y в стержне из обычного сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя. Характер распределения осевых напряжений σ_y в сечении 3–2 представлен на рисунке 3.24. Выявлено, что в стержне наблюдается формирование одного максимума осевых напряжений. При этом $\sigma_y^{\max} = 1863$ МПа, а $t = 0,05$ мм, что по уровню напряжений и глубине распространения пластических деформаций близко к стержню из однородного наноструктурного материала (рисунок 3.23, *б*). Отсутствие второго максимума в обычном материале объясняется низким уровнем напряженного состояния в данной зоне ($\sigma_i \leq 430$ МПа).

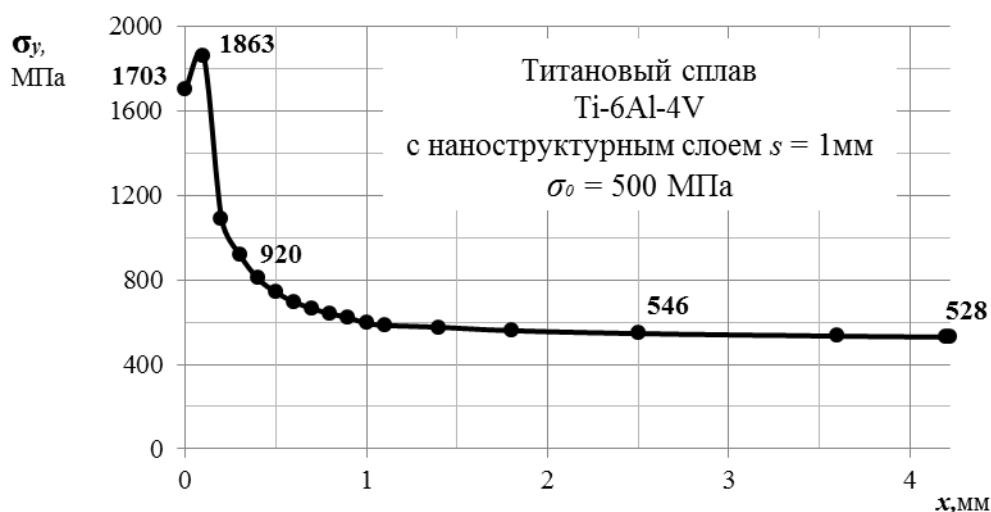
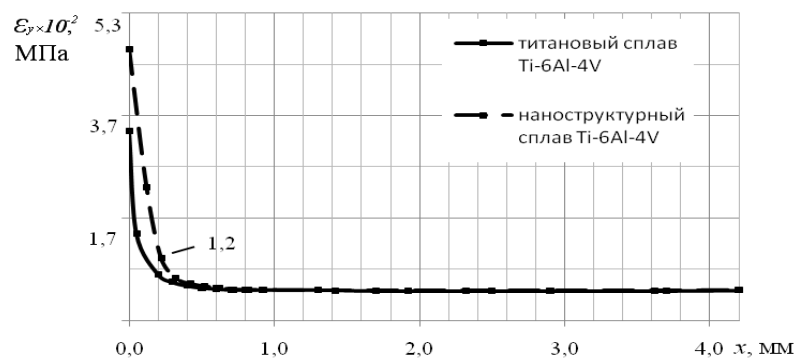
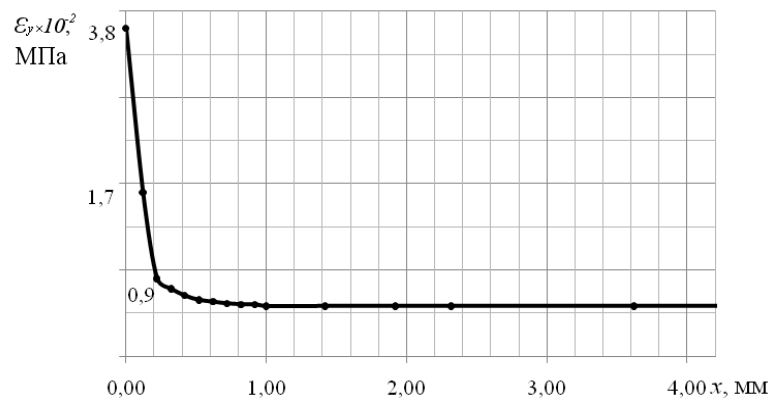


Рисунок 3.24 – Распределение осевых напряжений σ_y в стержне: обычного материала с наноструктурным слоем толщиной $s = 1$ мм

На рисунке 3.25, *а*, *б* приведены поля распределения деформаций ϵ_y при одноосном растяжении нагрузкой $\sigma_0 = 500$ МПа стержней с выточкой, выполненных из обычного и наноструктурного титанового сплава, обычного сплава с наноструктурным слоем толщиной $s = 1$ мм соответственно. Видно, что характер распределения деформаций во всех трех случаях одинаковый, различие наблюдается только в уровне ϵ_y . Так в стержне из титанового сплава $\epsilon_y = 5,3$, в стержнях из наноструктурного Ti-6Al-4V и обычного сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя деформации по уровню одинаковы и равны $\epsilon_y = 3,8$.



а



б

Рисунок 3.25 – Распределение осевых деформаций ϵ_y в стержне:

а – из обычного и наноструктурного материала Ti-6Al-4V,

б – с наноструктурным слоем толщиной $s = 1$ мм

Зависимость распространения глубины пластических деформаций t от интенсивности внешней нагрузки σ_0 приведена на рисунке 3.26. Видно, что возникновение пластических деформаций ϵ^p в титановом сплаве Ti-6Al-4V

наблюдается при $\sigma_0 > 300$ МПа, и достигает максимального значения при $\sigma_0 = 500$ МПа. В случае наноструктурного материала характер подобен, однако, уровень несколько ниже. Так при $\sigma_y = 400$ МПа, глубина пластических деформаций составляет $t = 0,05$ мм, а при $\sigma_y = 500$ МПа зона ε^p развивается на глубину $t = 0,1$ мм.

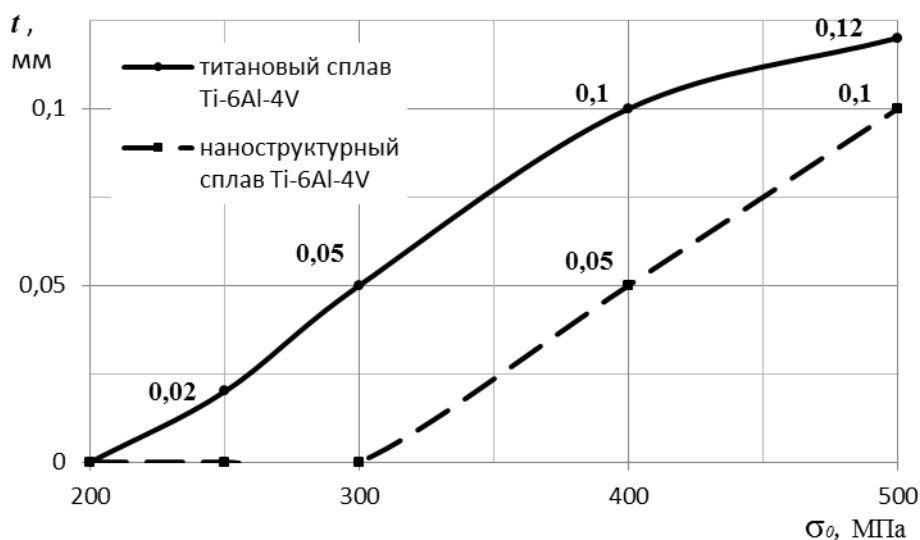
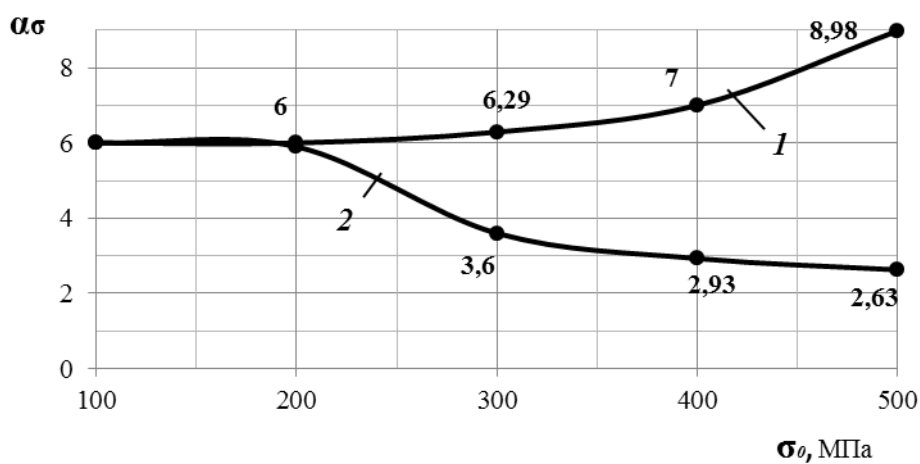


Рисунок 3.26 – Зависимость глубины распространения пластических деформаций t в пластинах с наноструктурным слоем от величины нагружения σ_0

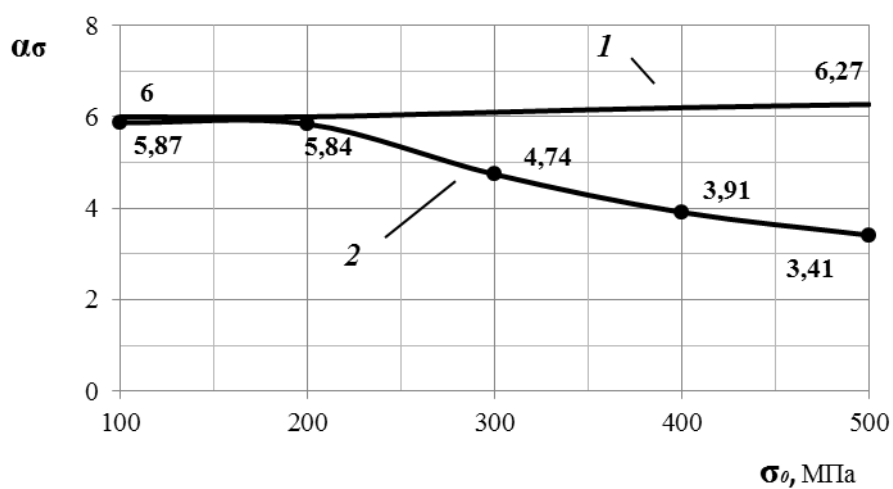
Зависимости концентрации напряжений K_σ и деформаций K_ε от величины нагрузки σ_0 проиллюстрированы на рис 3.33, а, б, в.

Из рисунка 3.27, а видно, что упругое деформирование стержня из крупнозернистого материала происходит при значениях внешней нагрузки σ_0 от 0 до 200 МПа. Дальнейшее увеличение приводит к развитию пластических деформаций, а значение коэффициента концентрации напряжений K_σ (кривая 2) уменьшаются от 6 до 2,63, в то время как K_ε (кривая 1) непрерывно увеличивается от 6 до 8,98.

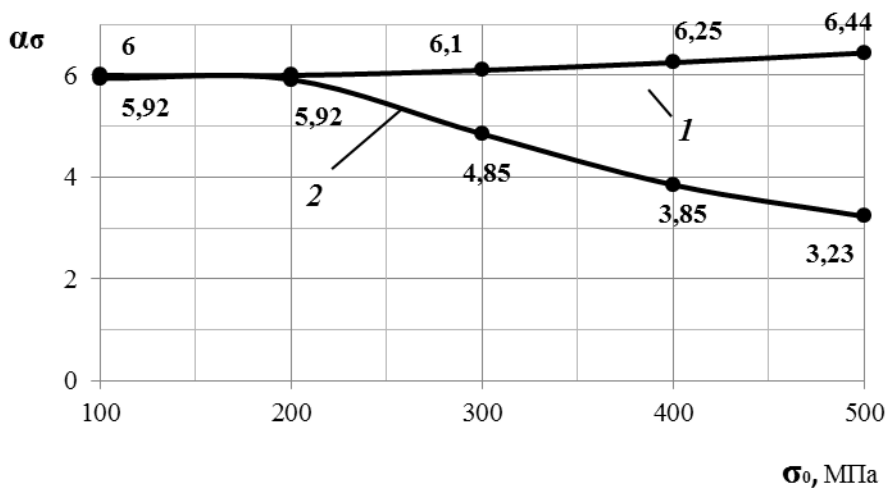
Отметим, что подобный характер зависимостей K_ε (кривая 1) и K_σ (кривая 2) наблюдается и в стержнях из наноструктурного титанового сплава и крупнозернистого при наличии наноструктурного слоя возле выточки (рисунок 3.27, б, в), но с меньшим уровнем значений.



a



б

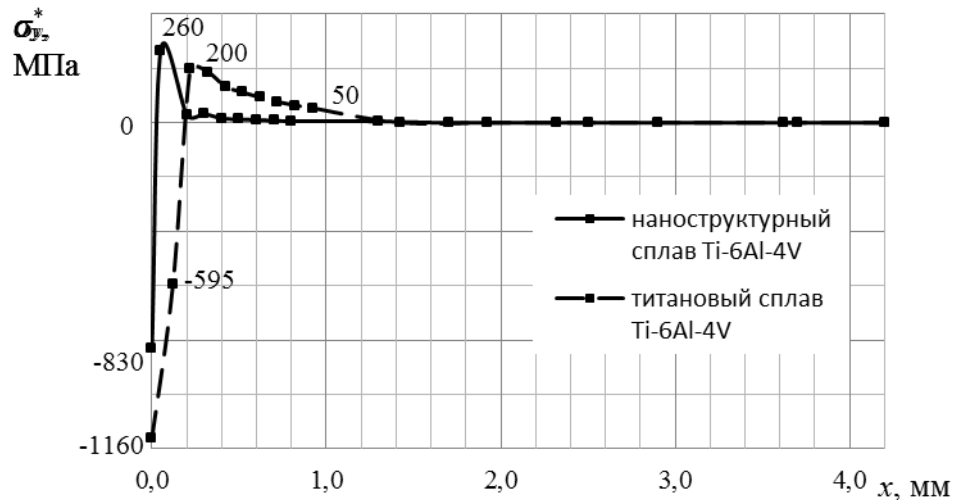


в

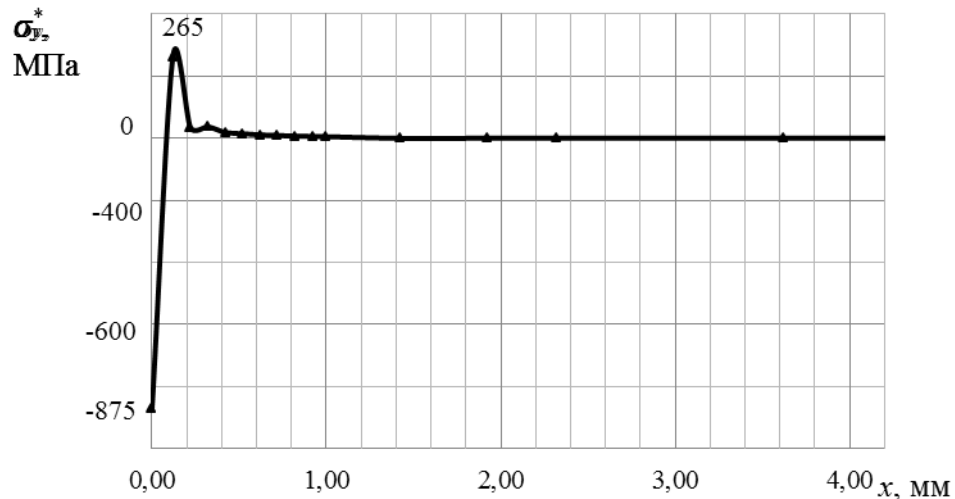
Рисунок 3.27 – Зависимость α_σ , α_ε от растягивающего напряжения на невозмущенной границе σ_0 в стержне из Ti-6Al-4V (a), наноструктурного Ti-6Al-4V (б) и при наличии наноструктурного слоя

3.4.2 Анализ остаточного напряженного и деформированного состояния в стержнях с выточкой из обычного и наноструктурного материала после разгрузки

По окончании нагружения и разгрузки в теле стержня, вследствие неоднородности деформаций, возникают остаточные напряжения и деформации [58]. На рисунке 3.28, *а*, *б* показаны поля распределения остаточных напряжений в теле стержня с выточкой из титанового сплава Ti-6Al-4V различного структурного состояния.



а



б

Рисунок 3.28 – Распределение остаточных осевых напряжений σ_y^* в стержне:

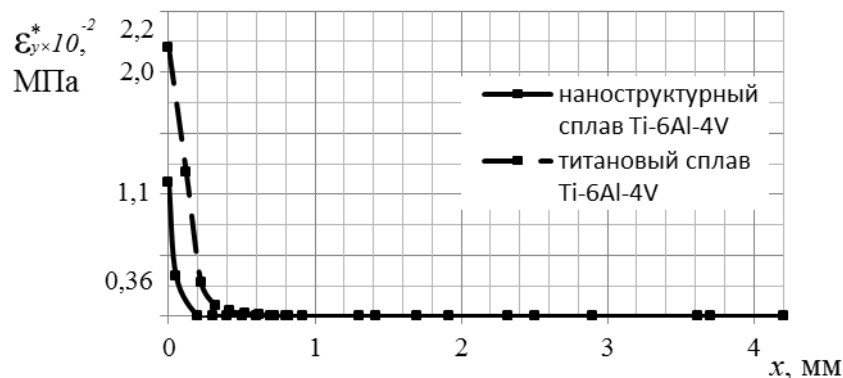
а – из титанового сплава Ti-6Al-4V и наноструктурного Ti-6Al-4V, *б* – с наноструктурным слоем толщиной $s = 1$ мм

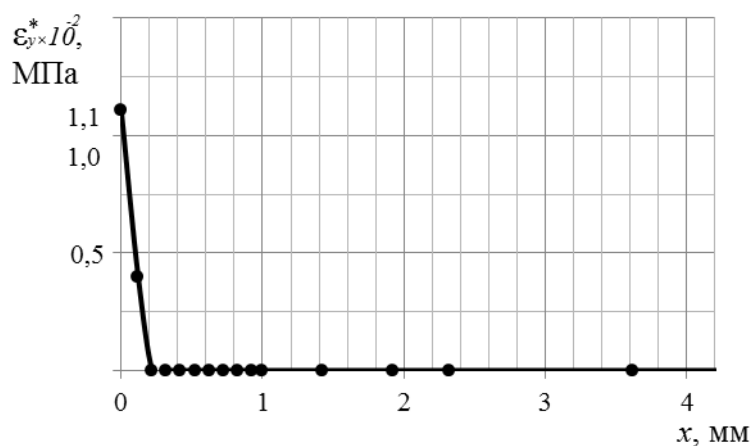
Видно, что в стержне из крупнозернистого титанового сплава на дне выточки образуются максимальные сжимающие остаточные напряжения $\sigma_{y_{\max}}^* = 1100$ МПа, а максимальные растягивающие напряжения составляют $\sigma_{y_{\max}}^* = 282$ МПа и возникают на глубине 0,2 мм от кромки выточки (рисунок 3.28, *a*).

Подобный характер распределения полей остаточных напряжений наблюдается в стержнях из наноструктурного материала (рисунок 3.28, *a*) и из крупнозернистого с наличием наноструктурного слоя толщиной 1 мм (рисунок 3.28, *б*). При этом в первом случае остаточные растягивающие и сжимающие напряжения составляют 831 МПа и 265 МПа соответственно. Во втором случае остаточные растягивающие и сжимающие напряжения достигают значений 873 МПа и 263 МПа.

На рисунке 3.29, *a*, *б* приведены поля распределения остаточных деформаций $\varepsilon_{y_{\max}}^*$, сформированных в результате одноосного растяжения нагрузкой $\sigma_0 = 500$ МПа стержней с выточкой, выполненных из обычного титанового сплава, наноструктурного Ti-6Al-4V и обычного сплава с наличием наноструктурного слоя толщиной $s = 1$ мм соответственно.

Видно, что характер распределения остаточных деформаций во всех трех случаях одинаковый. В стержне из титанового сплава $\varepsilon_{y_{\max}}^* = 2,2$, в стержне из наноструктурного и обычного сплава с наличием наноструктурного слоя максимальные остаточные деформации по уровню одинаковы и равны $\varepsilon_{y_{\max}}^* = 1,1$.





б

Рисунок 3.29 – Распределение остаточных осевых деформаций ϵ_y^* в стержне:

a – из обычного и наноструктурного Ti-6Al-4V, *b* – с наноструктурным слоем толщиной

$$s = 1 \text{ мм}$$

Для наглядности, в таблице 3.3 приведены сводные данные по результатам исследования остаточного напряженного и деформированного состояния в стержне с выточкой при одноосном растяжении.

Анализ полученных результатов показывает, что уровень остаточных напряжений $\sigma_{y\max}^*$ в стержне из наноструктурного материала на 25% ниже, чем в стержне из крупнозернистого титанового сплава, а уровень максимальных остаточных деформаций $\epsilon_{y\max}^*$ – в 2 раза.

Также отметим, что в стержне из крупнозернистого материала с наличием наноструктурного слоя уровень $\sigma_{y\max}^*$ и $\epsilon_{y\max}^*$ незначительно превышает уровень $\sigma_{y\max}^*$ и $\epsilon_{y\max}^*$ в стержне из наноструктурного сплава. При этом с увеличением толщины наноструктурного слоя уровень НДС приближается к уровню НДС в стержне из наноструктурного материала.

Таблица 3.3 – Максимальные остаточные осевые напряжения σ_{ymax}^* и деформации $\varepsilon_{\text{ymax}}^*$ в стержне после разгрузки

σ_0 , МПа		100	200	300	400	500
Титановый сплав ВТ6						
σ_{ymax}^* , МПа	Сжимающие	0	0	450	944	1100
	Растягивающие	0	0	145	130	292
$\varepsilon_{\text{ymax}}^*$		0	0	0,63	1,15	2,2
Наноструктурный титановый сплав ВТ6						
σ_{ymax}^* , МПа	Сжимающие	0	0	28	384	831
	Растягивающие	0	0	10	128	265
$\varepsilon_{\text{ymax}}^*$		0	0	0,04	0,6	1,1
Титановый сплав ВТ6 с наличием наноструктурного слоя $s = 0.5$ мм						
σ_{ymax}^* , МПа	Сжимающие	0	0	38	468	929
	Растягивающие	0	0	14	152	256
$\varepsilon_{\text{ymax}}^*$		0	0	0,04	0,6	1,14
Титановый сплав ВТ6 с наличием наноструктурного слоя $s = 1$ мм						
σ_{ymax}^* , МПа	Сжимающие	0	0	14	420	873
	Растягивающие	0	0	5	138	263
$\varepsilon_{\text{ymax}}^*$		0	0	0,01	0,6	1,11

3.5 Расчет напряженно-деформированного состояния в стержнях из наноструктурного материала при одноосном нагружении с учетом технологической наследственности после РКУП и накатки кольцевой канавки

В данном разделе приведены результаты исследования характера распределения напряжений и деформаций в стержнях с кольцевой канавкой при одноосном растяжении. Расчеты проводились с учетом технологической наследственности, сформированной в процессе получения наноструктуры в титановом сплаве и последующей операции накатки кольцевой канавки.

Физико-механические свойства материалов и геометрические размеры приведены в параграфе 2.1 и 3.2 (рисунок 3.3; таблица 2.1).

Численное решение выполнено методом конечных элементов с применением программно-вычислительного комплекса DEFORM 3D.

Для учета технологической наследственности поля напряжений, полученные после каждой технологической операции переносились на последующую и являлись начальным состоянием при моделировании технологической операции.

На рисунке 3.30 показаны сеточные аналоги детали на каждой операции

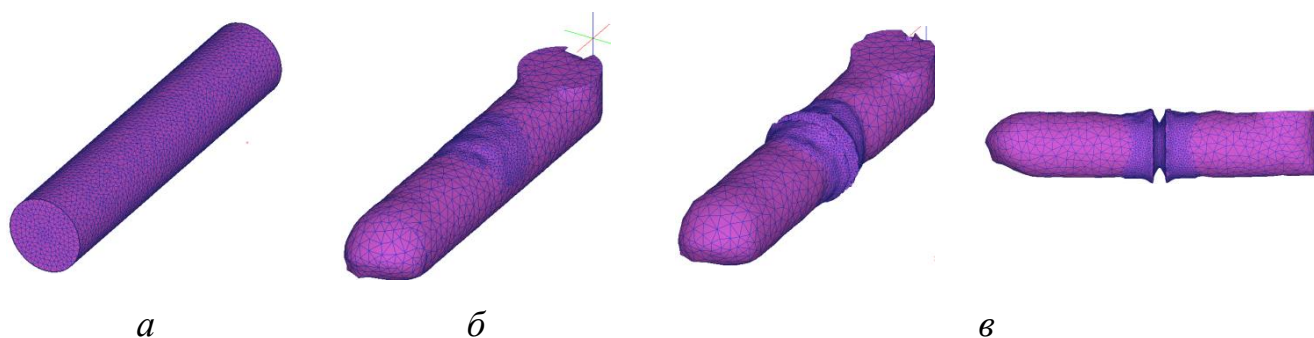


Рисунок 3.30– Сеточный аналог заготовки: *a* – перед моделированием РКУП,

б – перед моделированием накатки кольцевой канавки,

в – перед моделированием одноосного растяжения

3.5.1 Моделирование процесса накатки кольцевой канавки на стержнях из наноструктурного материала с учетом технологической наследственности после РКУП

В данном разделе приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния в заготовках круглого сечения в процессе накатки кольцевой канавки с учетом технологической наследственности после РКУП и остаточных напряжений после разгрузки.

Процесс накатки кольцевой канавки проводился следующим образом. Заготовка, полученная РКУП, жестко крепилась по торцам, затем по срединному сечению стержня роликом осуществлялась накатка канавки, путем его внедрения и вращения вокруг стержня. Операция проводилась за один проход. На рисунке 3.31 *а, б* представлена математическая модель операции.

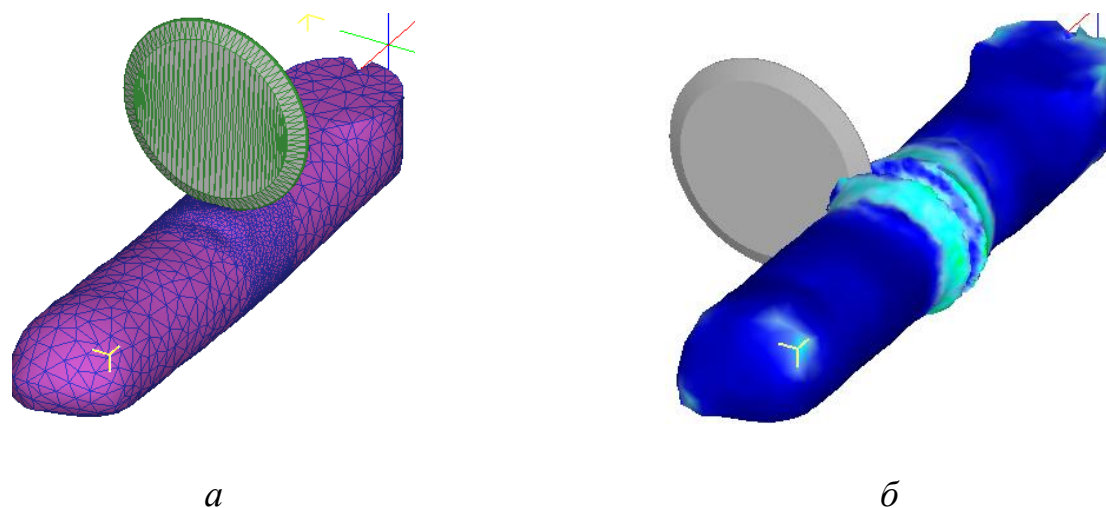


Рисунок 3.31 – Моделирование операции накатки на стержне кольцевой канавки

3.5.2 Анализ напряженно-деформированного состояния и технологической наследственности после накатки кольцевой канавки

Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния в стержнях диаметром $d = 6$ мм при накатке кольцевой канавки размеров $r/f = 0,1-0,2$, угол раствора $\alpha=60^\circ$.

На рисунке 3.32 в качестве примера приведены поля распределения нормальных напряжений σ_y при накатке канавки размеров $r/f = 0,1$.

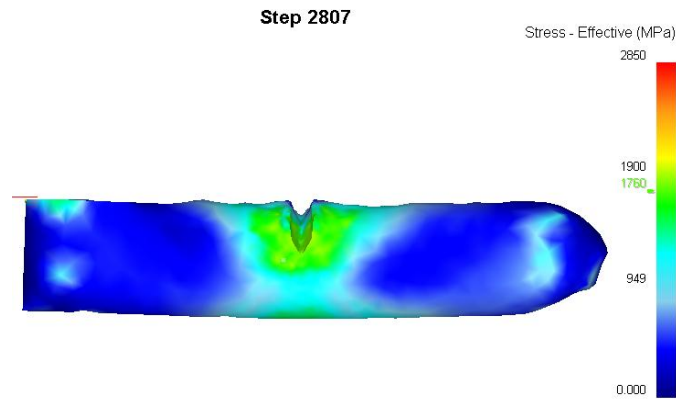


Рисунок 3.32 – Напряженное состояние при накатке кольцевой канавки

Видно, что при внедрении ролика в заготовку происходит выдавливание материала. При дальнейшем движении ролика вокруг стержня происходит формирование геометрических размеров канавки. Отметим, что максимальное напряженное состояние достигается на дне канавки и на поверхности выдавленного материала. При этом неоднородность распределения напряжений на дне канавки по диаметру стержня после первого прохода ролика достигает уровня в 25-35%, после второго – 15-20%, а после третьего 10-17%.

По окончании нагружения и разгрузки в теле стержня, вследствие неоднородности деформаций, возникают остаточные напряжения и деформации [58]. На рисунке показаны поля распределения остаточных напряжений в заготовке после накатки канавки размеров $r/f = 0,1$.

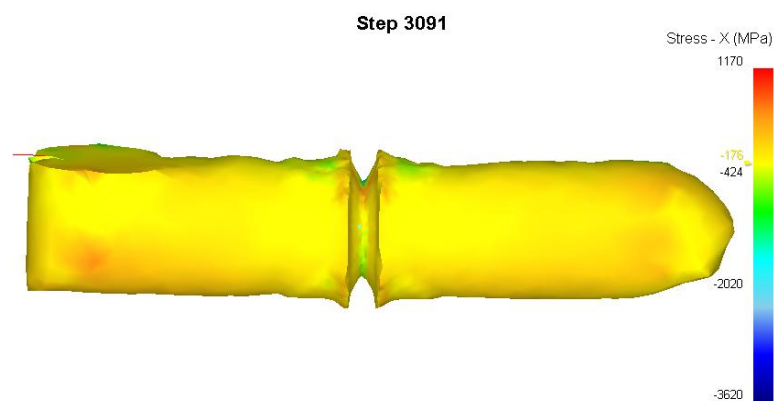


Рисунок 3.32 – Поля распределения напряжений σ_z^* после окончания обработки

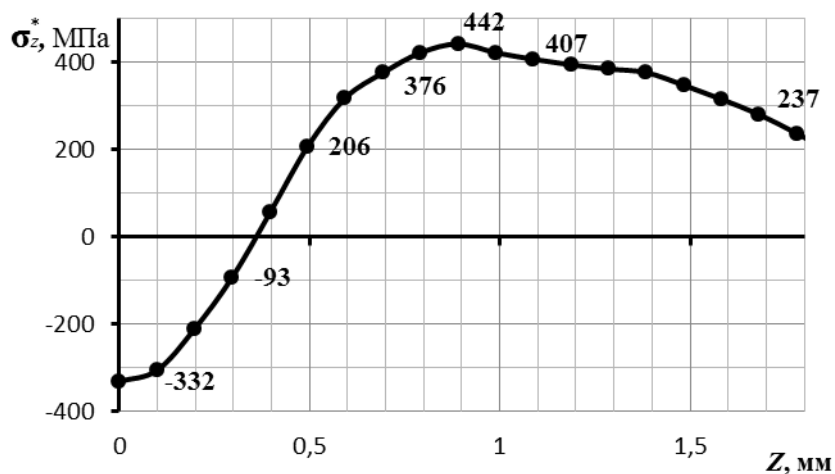
На рисунке 3.32 представлены поля распределения остаточных напряжений в характерном сечении. Видно, что по окончании нагружения в теле стержня

формируются остаточные напряжения по всему объему и представляют собой самоуравновешенную систему.

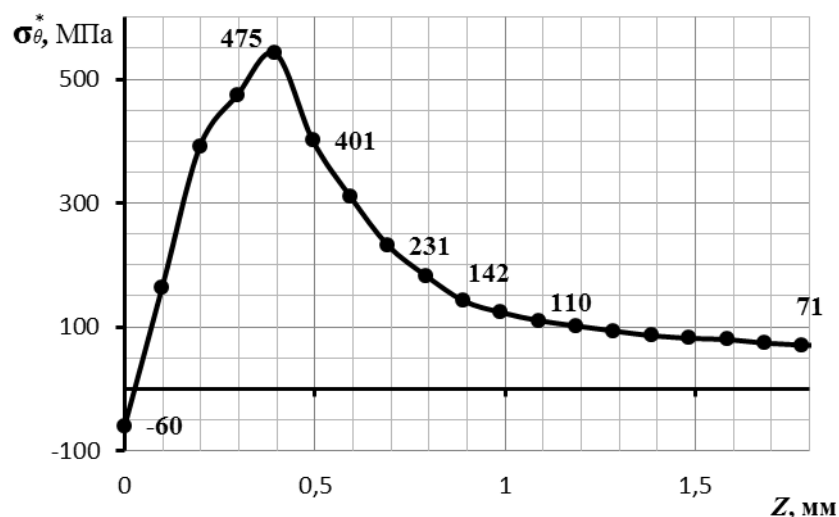
На рисунке 3.33 *а, б, в* показано распределение остаточных осевых σ_z^* , тангенциальных σ_θ^* и радиальных σ_r^* напряжений в теле заготовки.

При этом максимальные сжимающие остаточные осевые напряжения возникают на кромке кольцевой канавки и достигают значения $\sigma_z^* = 220$ МПа. На глубине 1 мм от кромки выточки напряжения наблюдаются растягивающие напряжения, максимум которых составляет 50 МПа.

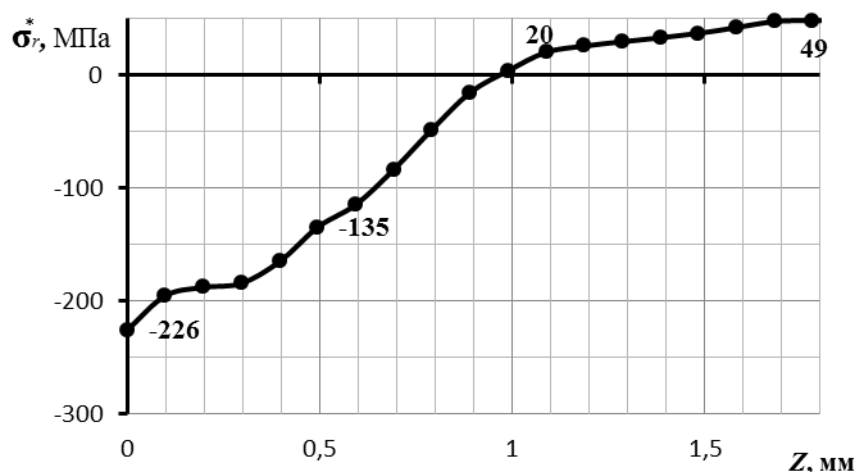
Подобный характер наблюдается и в отношении остаточных радиальных и тангенциальных напряжений. При этом максимальные сжимающие остаточные напряжения достигают уровня 330 МПа и 60 МПа, а зона однородного напряженного состояния возникает уже на глубине 0,35 мм и 0,05 мм соответственно. Отметим, что максимальные растягивающие напряжения превышают сжимающие и принимают значение 440 МПа и 475 МПа на глубине 0,8 мм и 0,4 мм.



а



б



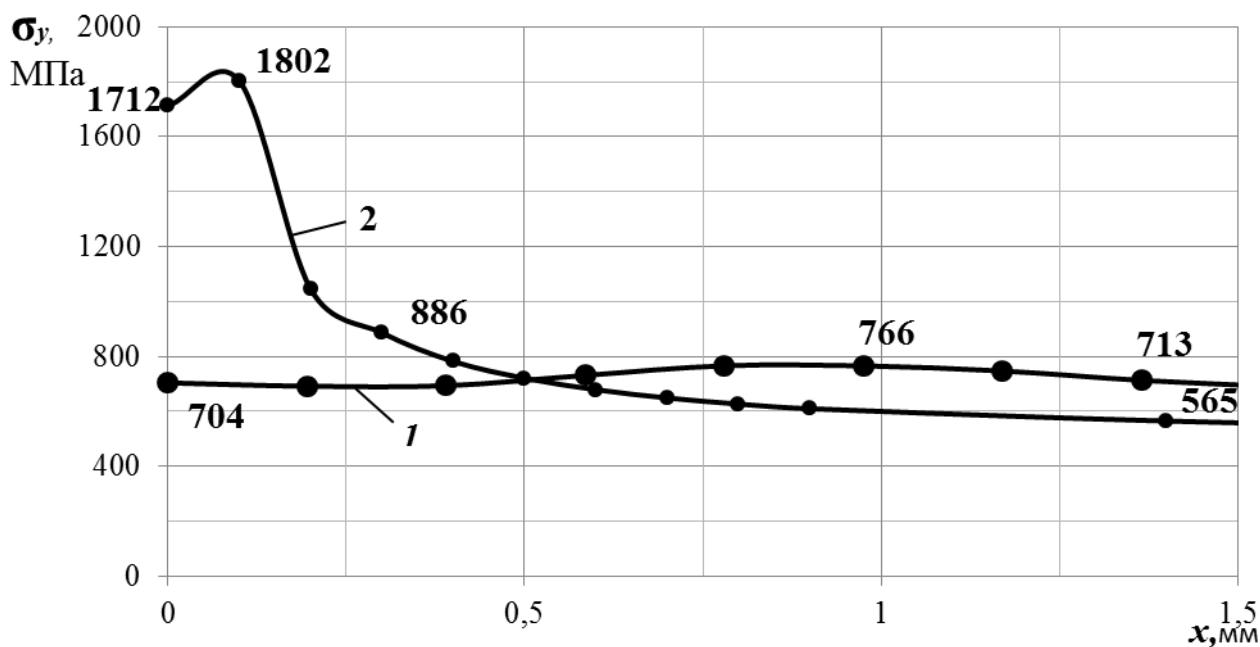
в

Рисунок 3.33 – Распределение остаточных осевых (а), тангенциальных (б) и радиальных (в) напряжений σ_z^* в теле заготовки

3.5.3 Анализ напряженно-деформированного состояния в стержне с кольцевой канавкой при одноосном нагружении с учетом технологической наследственности

Выполнен расчет НДС и определены теоретические коэффициенты концентрации напряжений в стержнях с кольцевой канавкой при одноосном растяжении интенсивностью σ_0 , меняющейся в диапазоне от 200 до 500 МПа. Исследование проводилось с учетом технологической наследственности после РКУП и накатки кольцевой канавки.

На рисунке 3.34 в качестве примера приведены графики распределения осевых напряжений σ_y при одноосном растяжении нагрузкой $\sigma_0 = 500$ МПа стержней с кольцевой канавкой, рассчитанные с учетом технологической наследственности (кривая 1) и без нее (кривая 2).



Р

Рисунок 3.34 – Распределение осевых напряжений σ_y в стержне с кольцевой канавкой

Видно, что наличие технологической наследственности приводит к уменьшению уровня осевых напряжений σ_y на кромке канавки и увеличению в центре тела. При этом максимум напряжений возникает на глубине 0,98 мм от канавки и достигает значения $\sigma_y^{max} = 766$ МПа. Исследования показали, что уровень напряжений, рассчитанный с учетом технологической наследственности в 2,6 раза меньше, чем без нее.

В таблице 3.4 приведены результаты расчета коэффициента уровня напряжений K при одноосном растяжении стержней с интенсивностью σ_0 , меняющейся в диапазоне от 200 до 500 МПа. Расчеты проводились с учетом технологической наследственности.

Таблица 3.4 – Результаты расчета коэффициента уровня напряжений K при одноосном растяжении стержней с интенсивностью σ_0 .

σ_0 , МПа	200	300	400	500
K	1,29	1,5	1,65	1,7

Основные выводы по главе 3

Разработана методика расчета НДС в типичных 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 отверстием $d = 10$ 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 кольцо из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V.
2. Стержни круглого поперечного сечения диаметром d с выточкой глубиной t , радиусом 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 σ_0 ($\sigma_0 = 200-500$ 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 одинаков. 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 $\sigma_0 = 500 \text{ МПа}$ 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 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 σ_0 . Исследование проводилось на пластинах с отверстием с наноструктурным слоем по контуру концентратора напряжений, 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 σ_y с двумя участками сжимающих и растягивающих напряжений. Один, из которых возникает на контуре отверстия, 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 из обычного или наноструктурного материала.

Выполнен расчет НДС в пластинах из обычных материалов с запрессованными в отверстия кольцами из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V при одноосном нагружении интенсивностью σ_0 . Толщина кольца t варьировалась в пределах $t = 2-10$ мм. Расчет проводился как с учетом технологической наследственности в кольце после РКУП, так и без нее. 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 без учета технологической наследственности на втором этапе исследования установил, что после запрессовки в кольцо возникают сжимающие напряжения. При этом минимальные напряжения формируются в зоне стыка кольца с пластиной, а максимальные – по внутреннему диаметру кольца. Выявлено, что при увеличении толщины кольца t происходит снижение уровня напряженного состояния. Например, при толщине кольца $t = 5$ мм уровень максимальных напряжений σ_y по сравнению с кольцом толщиной $t = 2$ 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, по мере удаления от области стыка деталей происходит плавное снижение уровня напряжений. 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%.

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 $t = 6$ мм (рисунок 3).

При дальнейшем увеличении толщины кольца уровень критической растягивающей нагрузки существенно снижается.

Выявлено, что наличие технологической наследственности в кольце из наноструктурного сплава оказывает существенное влияние на характер и уровень напряженного состояния. Установлено, что в кольце на глубине t от кромки внутреннего диаметра кольца наблюдается скачок напряжений, и происходит снижение уровня сжимающих напряжений. Однако у стыка кольца с пластиной σ_y^* достигают максимального значения. При этом происходит снижение уровня σ_y^* на кромке кольца по внутреннему диаметру на 28% по сравнению с расчетами аналогичного соединения без учета технологической наследственности. Данное различие напряженного состояния в соединениях объясняется наличием значительных технологических напряжений в заготовке кольца после РКУП.

Расчет полей напряжений показал, что в случае учета технологической наследственности в заготовке после РКУП, уровень НДС в кольце несколько ниже, чем напряженное состояние, рассчитанное без учета технологической наследственности. Так уровень минимальных сжимающих напряжений снижается на 35%, а максимальных остается на прежнем уровне. При этом изменение напряженного состояния в кольце при одноосном нагружении не оказывает влияние на НДС в пластине.

Интересно отметить, что наличие технологической наследственности в заготовке кольца также 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 с выточкой 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 1,4мм от кромки канавки. При этом характер остаточных напряжений соответствует сжимающим напряжениям. Зона растягивающих напряжений возникает на глубине более 2,1мм. Выявлено, что при упругом одноосном нагружении наличие технологических напряжений существенно снижает негативное влияние концентратора напряжений. Так, например, для стержня с выточкой ($d = 10\text{мм}$, $r/f = 0.1$, угол раствора $\alpha = 60^\circ$, где d – диаметр стержня, r и f – радиус и глубина впадины канавки соответственно) из наноструктурного материала k_σ при упругом одноосном нагружении в 2,6 раза больше, чем коэффициент концентрации напряжений, рассчитанный с учетом технологической наследственности для наноматериалов.

Выполнен расчет НДС и определены остаточные напряжения в стержнях с выточкой при одноосном растяжении интенсивностью σ_0 , меняющаяся в диапазоне от 200 до 500 МПа. При исследовании стержня с наноструктурным слоем, толщина слоя s варьировалась от 0,5 мм до 1 мм. Расчет проводился без

учета технологической наследственности. Установлено, что характер распределения напряжений подобен возникающему в пластинах с отверстиями. Также выявлено, что наличие наноструктурного слоя не оказывает существенного влияния на характер напряженного состояния. Характер распределения напряжений подобен возникающему в аналогичных деталях из обычного и наноструктурного материала.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ОБЪЕКТАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ В ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

4.1 Введение

В данной главе поставлена задача исследования возможности применения наноструктурного материала в элементах конструкции гибкого трубопровода на примере законцовки. В качестве объекта исследования принимался гибкий трубопровод, используемый в воздушной системе самолетов (рисунок 4.1, *а*, *б*).



а



б

Рисунок 4.1 – Внешний вид гибкого трубопровода

В таблице 4.1 указаны воздействующие факторы на изделие. Вероятность безотказной работы гибкого трубопровода в условиях эксплуатации за ресурс 2000 часов при доверительной вероятности не менее 0,9 (по отказу, приводящему к отказу системы), должна составлять 0,999. Назначенный ресурс составляет

20000 часов, назначенный срок службы 35 лет. Статическая прочность составляет $3 p_{\text{раб.}}$, где $p_{\text{раб.}}$ – рабочее давление в системе равно 5 МПа.

Таблица 4.1 – Воздействующие факторы на гибкий трубопровод

№	Наименование воздействующего фактора	Величина воздействующего фактора
Динамическое высокочастотное нагружение:		
1	частота пульсации давления, Гц	до 800
	диапазон пульсации давления	$0 \div 0,2(2) \dots 0,5 \pm 0,05(5 \pm 0,5)$
Кратковременное динамическое высокочастотное нагружение:		
2	частота пульсации давления, Гц	до 800
	диапазон пульсации давления	$0 \div 0,2(2) \dots 1 \pm 0,1(10 \pm 1)$
	Количество импульсов за 1000 часов работы	5×10^6
Гидроударное нагружение:		
3	заброс давления, МПа	$0 \div 0,2(2) \dots 1,5 \pm 0,15(15 \pm 1,5)$
	скорость нарастания и падения давления, МПа/сек	$10(10^2)$
	Количество гидроударов за 1000 часов работы	5×10^3
Динамическое низкочастотное нагружение:		
4	частота пульсации давления, Гц	0,5...5
	диапазон пульсации давления	$0 \div 0,2(2) \dots 0,5 \pm 0,05(5 \pm 0,5)$
	Количество импульсов за 1000 часов работы	5×10^2 в диапазоне пульсации давления от $0,2 \pm 0,02$ до $0,5 \pm 0,05$ МПа; 10^6 при диапазоне пульсации давления от $0,2 \pm 0,02$ до $0,4 \pm 0,04$ МПа

На рисунке 4.2 приведен эскиз законцовки трубопровода и ее комплектующих деталей.

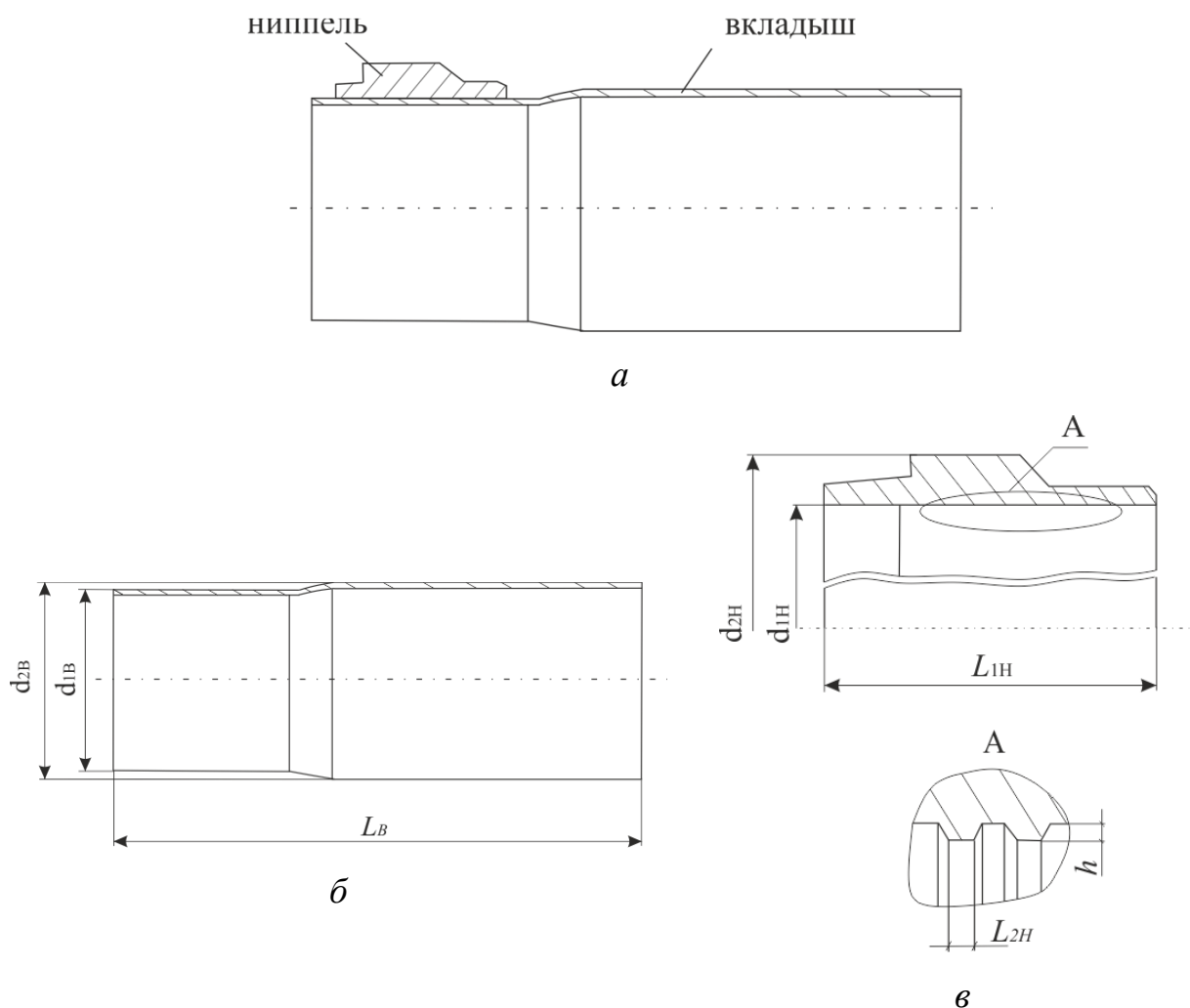


Рисунок 4.2 – Геометрические размеры законцовки гибкого трубопровода (а) и его комплектующих: вкладыш (б) и ниппель (в)

Данное соединение (рисунок 4.2, а) состоит из двух деталей:

- вкладыш ($d_{1B} = 42$ мм, $d_{2B} = 45$ мм, $L_B = 107$ мм, $L_{B1} = 27$ мм), изготовленный из нержавеющей стали 12X18H10T ($\sigma_T = 210$ МПа, $\sigma_{ПЧ} = 670$ МПа) (рисунок 4.2, б).
- ниппель ($d_{1H} = 42,3$ мм, $d_{2H} = 42,3$ мм, $L_{1H} = 23$ мм), выполненный из титанового сплава ВТ6 ($\sigma_T = 520$ МПа, $\sigma_{ПЧ} = 1180$ МПа). Деталь типа ниппель на внутреннем диаметре имеет кольцевые зубчики длиной $L_{2H} = 0,3$ мм и высотой $h = 0,2$ мм (рисунок 4.2, в).

По данным экспериментальных исследований при статическом и циклическом изменении нагрузок разрушение гибкого трубопровода происходит в законцовке. Данный элемент конструкции является соединением двух деталей: вкладыша, изготовленного из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, и ниппеля, выполненного из титанового сплава ВТ6.

С целью повышения прочности законцовки трубопровода предлагается использовать при изготовлении ниппеля наноструктурный титановый сплав ВТ6 без изменения его конструкции.

Таким образом, задачей исследования является определение НДС и остаточных напряжений в деталях соединения, с целью прогнозирования прочности законцовки трубопровода при использовании наноструктурного материала с учетом «истории» нагружения.

Этапы исследования:

- анализ технологического процесса;
- моделирование технологического процесса;
- оценка и сравнение прочности законцовки трубопровода, изготовленного из материала согласно ОСТу 1.12923-77 [73] и наноструктурного титанового сплава ВТ6.

4.1.1 Анализ технологического процесса

Серийный технологический процесс изготовления законцовки трубопровода и его комплектующих включает в себя: механическую обработку ниппеля, гидравлическую штамповку вкладыша и развальцовку собранного узла. На рисунке 4.3 показана структурная схема технологического процесса.

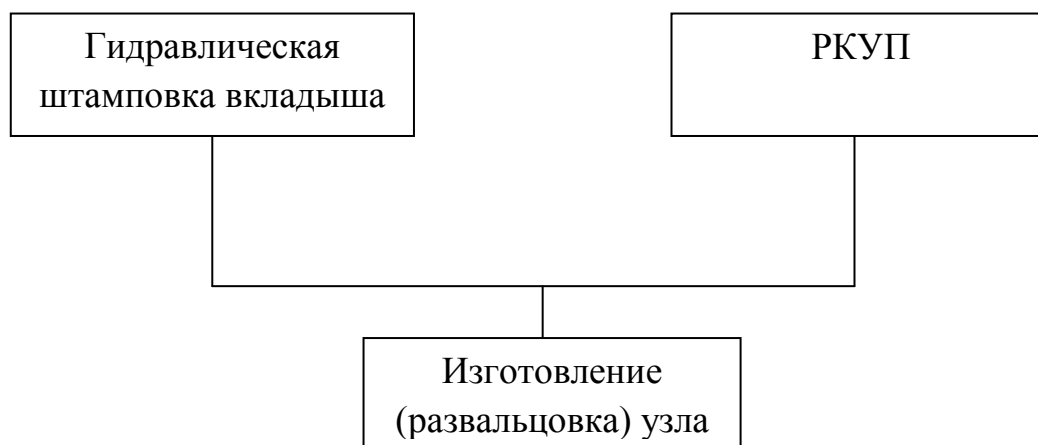


Рисунок 4.3 – Структурная схема технологического процесса

Как видно из схемы технологического процесса изготовления неразъемного соединения, детали узла изготавливаются путем пластической деформации и механической обработки. При изготовлении деталей данными методами неизбежно формирование остаточных напряжений. Таким образом, важно при расчетах учитывать технологическую наследственность на каждой операции. Деталь ниппель была изготовлена путем механической обработки. В данном примере технологическая наследственность сформированная при механической обработке не учитывалась.

Гидравлическая штамповка вкладыша обусловлена пластической деформацией трубчатых заготовок, что приводит к формированию остаточных напряжений.

На основании вышеизложенного, исследование технологического процесса было осуществлено в два этапа. На первом этапе исследовалось НДС, определялись значения остаточных напряжений в детали типа вкладыш при гидравлической штамповке. На втором – проанализировано НДС в деталях узла при формировании соединения и определены остаточные напряжения с учетом технологической наследственности.

Численное решение задачи моделирования процесса изготовления вкладыша и узла было осуществлено с помощью метода конечных элементов, реализованного в осесимметричной [35] постановке с использованием программно-вычислительного комплекса DEFORM 3D [86].

4.2 Моделирование гидропластической штамповки детали типа вкладыш

На сегодняшний день существует большое количество деталей различной формы, получаемых из труб путем гидропластической штамповки. Детали, изготавливаемые этим методом, отличает выгодный показатель прочности, материалоемкости, высокой точности размеров и минимальной потребности в последующей механической обработке. Одним из важнейших преимуществ является возможность создания оптимального напряженно-деформированного состояния в заготовках и деталях [21].

На основании вышеизложенного и целей исследования, были поставлены следующие задачи:

1. Разработка методики расчета НДС и остаточных напряжений, сформированных после гидравлической штамповки в тонкостенных трубчатых заготовках.
2. Исследование НДС в процессе гидропластической штамповки.
3. Исследование характера распределения остаточных напряжений в деталях, полученных гидравлической штамповкой.
4. Экспериментальное исследование деформированного состояния вкладыша после гидравлической штамповки.
5. Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов исследования.

4.2.1 Методика расчета НДС и остаточных напряжений, сформированных после гидропластической штамповки в тонкостенных трубчатых заготовках из нержавеющей стали 12X18H10T

Процесс гидравлической штамповки осуществляется следующим образом (рисунок 4.4). Вкладыш помещают в разъемную матрицу. Далее к ее торцам в соответствующие пазы матрицы устанавливают заглушку и фланец, герметизирующие полость заготовки. После этого, матрица закрывается и через штуцер, гидравлически связанный с компрессором, путем подачи рабочей жидкости в полость заготовки, создают высокое внутреннее давление p .

Под действием давления p деталь переходит в пластическое состояние и принимает форму матрицы [8].

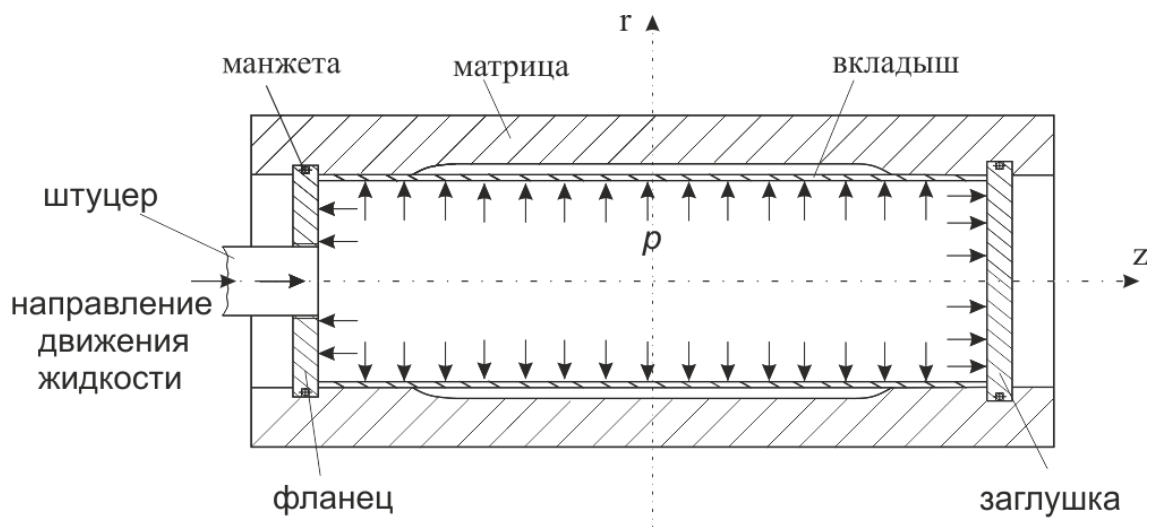


Рисунок 4.4 – Схема гидравлической штамповки

Силовые параметры гидравлической штамповки деталей различной формы из полых трубных заготовок зависят от ряда факторов:

1. геометрических размеров трубы;
2. величины внутреннего давления;
3. коэффициента трения между заготовкой и разъемной матрицей;
4. механических свойств материала трубной заготовки и интенсивности ее упрочнения.

В процессе гидравлической штамповки все участки заготовки находятся под действием значительных нагрузок. На том или ином этапе каждый участок заготовки переходит в пластическое состояние, однако, характер распределения напряжений, действующих на разных участках, различен. Таким образом, при проведении расчета очень важно было составить расчетную схему максимально соответствующую реальным условиям.

В процессе операции гидравлической штамповки было выделено два основных этапа. На первом происходило нагружение внутренним давлением p (активное нагружение). На втором – разгрузка (пассивное нагружение).

Моделирование технологической операции в силу симметрии по осям OX и OY проводилось на $1/4$ части детали.

Разъемная матрица, фланец и заглушка были выполнены из инструментальной стали 6ХВГ ($\sigma_T = 1450$ МПа, $\sigma_{ПЧ} = 1570$ МПа). Модуль упругости которых соответствовал значению $E = 300$ ГПа. Учитывая, что модуль упругости оснастки много больше модуля упругости вкладыша ($E_6 = 1,96$ ГПа), при моделировании детали оснастки были приняты как абсолютно жесткие тела. Геометрические размеры разъемной матрицы для гидравлической штамповки трубчатых заготовок диаметром $d = 42$ мм представлены на рисунке 4.5 и равны $d_{1M} = 42$ мм, $d_{2M} = 45$ мм, $L_{1M} = 30$ мм, $L_{2M} = 8$ мм, $L_{3M} = 82$ мм.

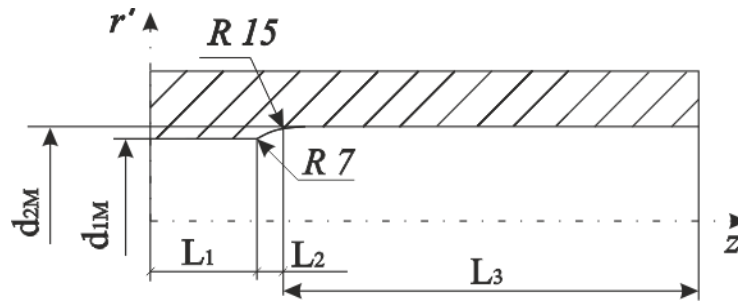


Рисунок 4.5 – Геометрические размеры разъемной матрицы

Вкладыш был выполнен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т ($\sigma_{0.2} = 210$ МПа, $\sigma_{ПЧ} = 670$ МПа, $E = 2,1$ ГПа). При расчете принимали его как упругопластическое тело. При создании модели материала величиной упругой деформации пренебрегали, т.е. модуль упругости приняли равным бесконечности.

На рисунке 4.6, а, б приведены расчетные схемы для первого и второго этапов нагружения [43].

На первом этапе внутренняя поверхность заготовки нагружалась давлением p , которое изменялось по алгебраической прогрессии 1 МПа/сек (рисунок 4.6, а).

При составлении расчетной схемы для первого этапа нагружения были приняты следующие граничные условия:

- в сечении $z = 0$ мм точки, лежащие на линии 1-2, могли перемещаться только по оси z в положительном направлении $\omega(z = 0 \text{ мм}) \geq 0$, $\sigma_z = 0$.
- в сечении $z = 110$ мм точки, лежащие на линии 5-6, ввиду симметрии заготовки ограничены в перемещении $\omega(z = 110 \text{ мм}) = 0$.

- перемещение в радиальном направлении u точек, лежащих на наружном диаметре трубы d_{2T} , ограничено геометрической формой матрицы, т.е.

$$0 \leq z \leq L_1; u(z) = 0,$$

$L_1 \leq z \leq L_2; 0 \leq u(z) \leq f(r,z)$, где $f(r,z)$ – функция, описывающая криволинейный участок матрицы.

$$L_2 \leq z \leq L_3; 0 \leq u(z) \leq d_{2M}.$$

На втором этапе менялось направление воздействия силового фактора p на обратное (рисунок 4.6, б). Значение внутреннего давления изменялось от 70 МПа до 0, по алгебраической прогрессии с шагом 1 МПа/сек.

Граничным условием второго этапа являлось следующее ограничение: перемещение точек на линии 5-6 в сечении $z = L_3$, $\omega(z = L_3) = 0$. В остальных сечениях перемещения точек не ограничивалось.

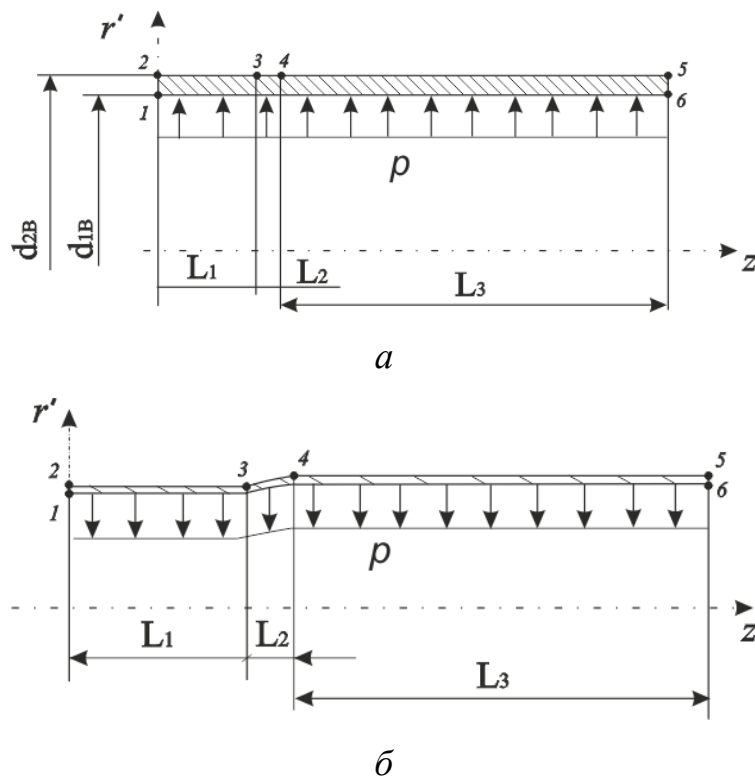


Рисунок 4.6 – Расчетная схема процесса гидравлической штамповки:

a – первый этап, *б* – второй этап

Отметим, что для всех форм гидравлической штамповки, характер напряженно-деформированного состояния в определенных участках заготовки

приблизительно одинаков. Участки заготовки, характеризующиеся одинаковым или сходным НДС, можно разделить на следующие группы:

Группа 1. Цилиндрические торцевые участки, находящиеся в жестком инструменте. Диаметр этих участков не изменяется в процессе деформирования.

Группа 2. Участки перехода от цилиндрических торцев к участкам пластического формоизменения.

Группа 3. Участки формоизменения трубчатой заготовки, наружная поверхность которых может быть свободной или подвергаться воздействию внешних нагрузок.

Данному разделению заготовки на участки соответствуют зоны L_1 , L_2 , L_3 (рисунок 4.6, а, б).

Твердотельные модели оснастки и заготовки получены при помощи CAD пакета SolidWorks [71].

Численное решение выполнено методом конечных элементов [83] с применением программно-вычислительного комплекса DEFORM 3D [101], с учетом нелинейного поведения материала [76]. Сеточный аналог тонкостенной заготовки представлен на рисунке 4.7. Количество элементов составляло 500000 шт., количество элементов по толщине детали – 6 шт.

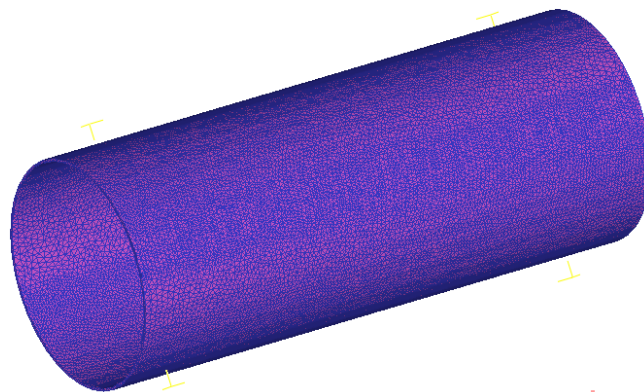


Рисунок 4.7 – Сеточный аналог трубчатой заготовки

При численном расчете принимался итерационный метод Ньютона-Рафсона [48], для решения систем уравнения использовался метод сопряженных градиентов. Для снижения влияния на результаты вычислений, искажения

сеточного аналога и получения достоверных данных, в расчете использовался алгоритм перестроения конечных элементов, в ходе которого данные из «старой» сетки интерполировались в «новую». Критерием перестроения являлось максимальное искажение формы элементов [35].

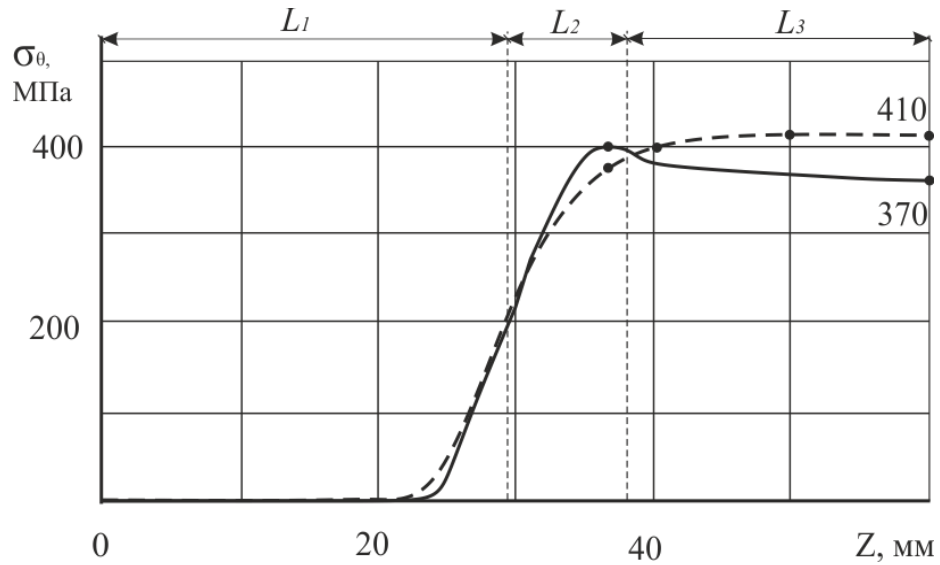
4.2.2 Анализ напряженно-деформированного состояния и остаточных напряжений

Выполнен расчет напряженного состояния в тонкостенных трубчатых заготовках диаметром d и длиной L из нержавеющей стали 12X18H10T при гидравлической штамповке при внутреннем давлении p .

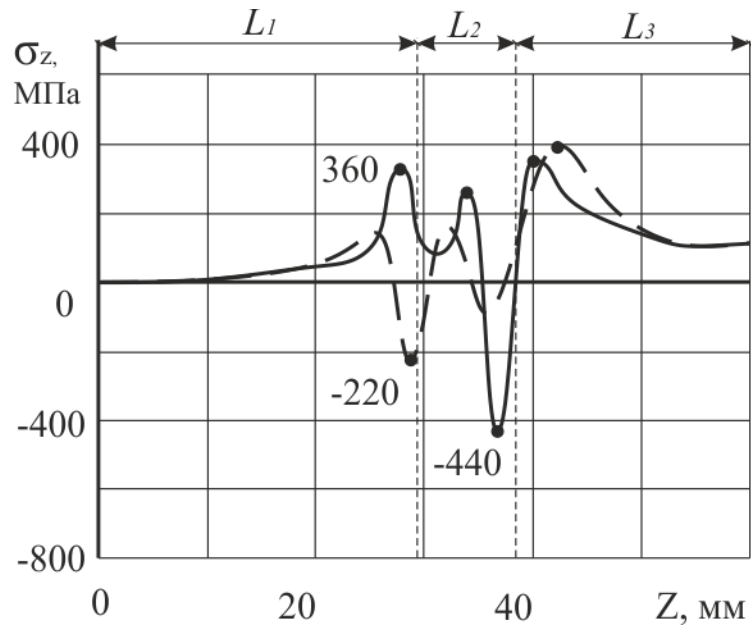
В качестве примера на рисунке 4.8, *а*, *б* приведены поля распределения тангенциальных σ_θ и осевых σ_z напряжений соответственно по длине заготовки, возникающие при гидравлической штамповке трубчатой заготовки диаметром $d = 42$ мм и длиной $L = 214$ мм. Сплошными линиями показаны поля распределения тангенциальных σ_θ и осевых σ_z напряжений соответственно по длине заготовки при внутреннем давлении $p = 30$ МПа. Видно, что максимальные растягивающие напряжения возникают на участке L_2 и достигают значения $\sigma_\theta = 400$ МПа. Наибольшие осевые напряжения σ_z прослеживаются на границах участков $L_1 - L_2$, $L_2 - L_3$ и равны соответственно 360 и 380 МПа. Значение максимальных сжимающих осевых напряжений достигает 440 МПа в середине участка L_2 . При значении внутреннего давления $p = 30$ МПа, наружная поверхность заготовки входит в контакт с прямолинейным участком матрицы L_3 . Дальнейшее увеличение внутреннего давления p приводит к полному принятию трубой формы матрицы на криволинейном участке L_2 .

Распределение полей σ_θ и σ_z по длине заготовки при давлении $p = 60$ МПа показано штриховыми линиями на рисунке 4.8, *а*, *б*. Видно, что характер распределения напряжений σ_θ и σ_z значительно не изменился. Однако, уровень напряжений в характерных сечениях меняется. Наибольшие растягивающие напряжения σ_θ составляют 410 МПа; $\sigma_z - 400$ МПа. Наибольшие

сжимающие напряжения σ_z уменьшаются почти в 2 раза и достигают значения 220 МПа.



a



б

Рисунок 4.8 – Поля распределения тангенциальных σ_θ и осевых σ_z напряжений по длине заготовки при внутреннем давлении $p = 30$ МПа и $p = 60$ МПа.

На втором этапе технологического процесса (пассивное нагружение), вследствие неоднородности распределения напряжений возникают остаточные напряжения и деформации [58]. На рисунке 4.9, *a*, *б* показаны поля распределения

остаточных тангенциальных σ_{θ}^* и осевых σ_z^* напряжений по длине заготовки. Установлено, что наибольшие остаточные тангенциальные напряжения сосредоточены на участке L_2 и в его окрестности. Максимальные растягивающие тангенциальные напряжения составляют 140 МПа, а сжимающие – 350 МПа. Максимальные значения сжимающих осевых остаточных напряжений σ_z^* наблюдаются на участке L_2 и равны 410 МПа, максимальные растягивающие на границе $L_1 - L_2$ и достигают значения 30 МПа.

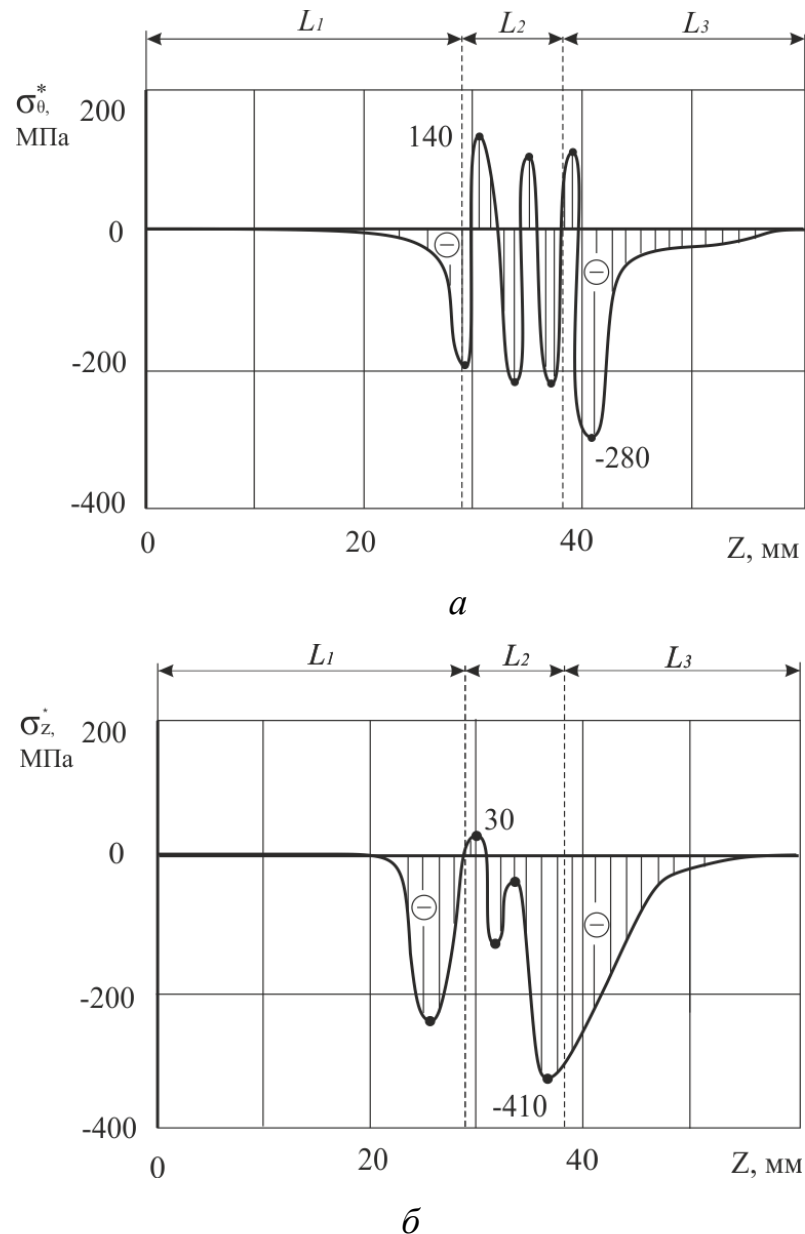


Рисунок 4.9 – Поля распределения остаточных тангенциальных σ_{θ}^* (а) и осевых σ_z^* (б) напряжений по длине заготовки

4.2.3 Влияние конструктивных факторов на напряженно-деформированное состояние в детали типа вкладыш

Исследование влияния конструктивных факторов на НДС и остаточные напряжения в заготовках, изготовленных из материала 12Х18Н10Т, проводилось на трубах, диаметр которых составлял $d = (22, 32, 42, 52, 62)$ мм [10]. Методика построения сеточного аналога и расчета, изложены в предыдущем разделе. Результаты исследований приведены на рисунке 4.10.

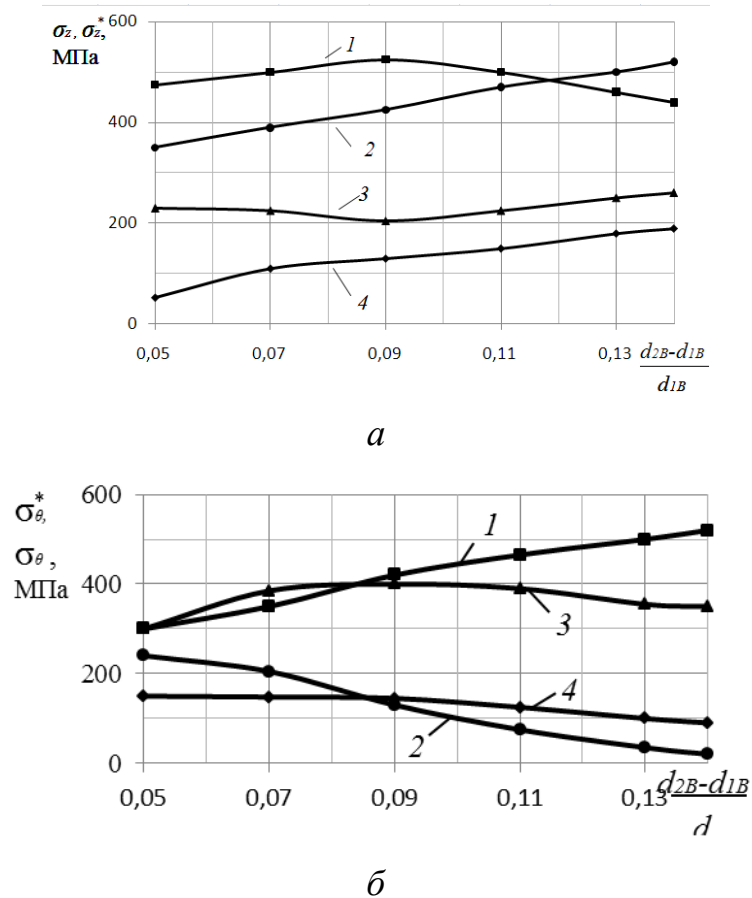


Рисунок 4.10. Изменение максимальных осевых σ_θ (а) и тангенциальных σ_z (б) напряжений при гидравлической штамповке и последующей разгрузке в зависимости от геометрических размеров трубчатых заготовок: 1 – максимальные растягивающие напряжения, 2 – максимальные сжимающие напряжения, 3 – максимальные остаточные растягивающие напряжения, 4 – максимальные остаточные сжимающие напряжения.

Анализ результатов исследований показал, что с увеличением диаметра заготовки уровень осевых напряжений снижается. Так, при формовке вкладыша диаметром $d = 32$ мм, значение максимальных растягивающих и сжимающих

осевых напряжений составляет соответственно 524 и 437 МПа, а для трубы диаметром $d = 62$ мм – 471 и 337 МПа. Подобная зависимость характерна и для остаточных осевых напряжений. В случае тангенциальных напряжений, необходимо отметить, что наибольшие напряжения возникают при штамповке труб диаметром $d = 22$ мм, а наибольшие остаточные напряжения формируются в трубе $d = 62$ мм.

Для расчета и проектирования процесса гидропластической штамповки важно располагать сведениями по величине усадки вкладыша после завершения операции. В таблице 4.2 приведены данные по фактическим геометрическим размерам и величине деформаций.

Таблица № 4.2 – Изменение геометрических размеров тонкостенных труб после гидравлической штамповки

№	d , мм	L , мм	d_1 , мм	ε_1	ε_2
1	22	217,06	24,94	0,0024	0,013364
2	32	217,08	34,92	0,002286	0,013273
3	42	217,08	44,92	0,001778	0,013273
4	52	217,08	54,92	0,001455	0,013273
5	62	217,1	64,9	0,001538	0,013182

где d – диаметр трубы до гидропластической штамповки, d_1 – диаметр трубы после гидравлической штамповки, ε_1 – радиальные деформации, ε_2 – осевые деформации.

4.2.4 Экспериментальное исследование деформированного состояния вкладыша

Экспериментальные работы проводились на производственной базе УАП «ОАО «Гидравлика» ГК «Ростехнологии» (г. Уфа). Объектом исследования являлись трубчатые заготовки размерами $d = 42$ мм, $L = 220$ мм, $t = 1$ мм (рисунок 4.11, а, б), изготовленные из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Количество заготовок составляло 25 шт.

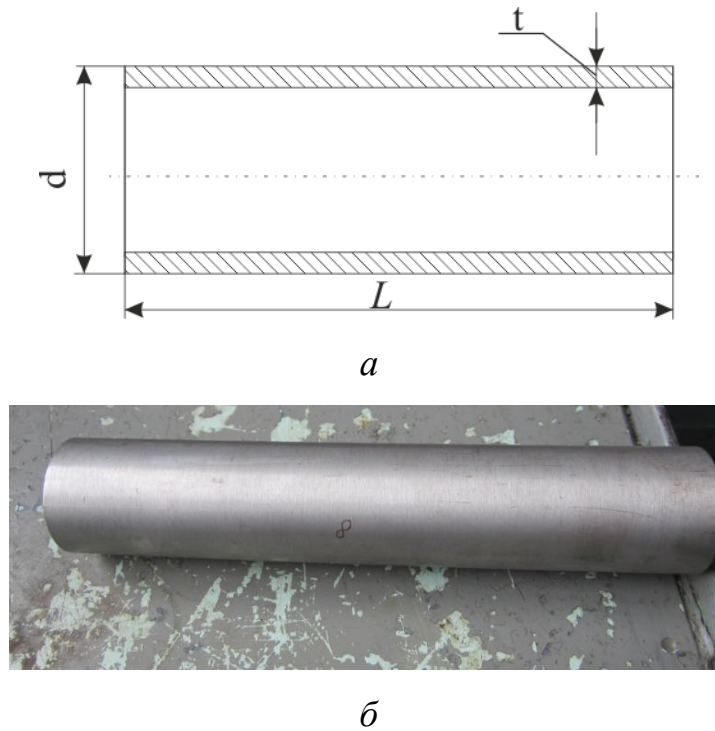
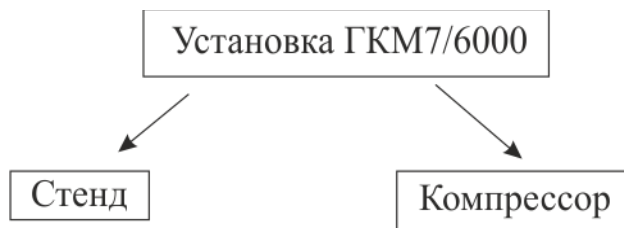


Рисунок 4.11 – Заготовка для вкладыша:

a – геометрические размеры заготовки, *б* – внешний вид заготовки

Для проведения экспериментальных работ использовалась формующая установка ГКМ 7/6000, спецприспособление, штангенциркуль, разъемная матрица.

На рисунке 4.12, *a*, *б*, *в* приведены схема и внешний вид установки ГКМ 7/6000. Как видно из схемы (рисунок 4.12, *a*), установка состоит из компрессора (рисунок 4.11, *в*), осуществляющего подвод рабочей жидкости, и станда (рисунок 4.11, *б*), в котором проводится гидравлическая штамповка.



а



в

б

Рисунок 4.12 – Установка ГKM 7/6000:

а – схема установки, *б* – рабочий стенд, *в* – компрессор

Процесс формообразования осуществлялся следующим образом. Первоначально заготовка устанавливалась в разъемную матрицу (рисунок 4.13, *а*), после чего матрица фиксировалась в специальном приспособлении (рисунок 4.13, *б*), которое помещалось в стенд установки ГKM 7/6000. Далее, к штуцеру приспособления подсоединялся компрессор. По завершению подготовительных операций, осуществлялась подача рабочей жидкости в полость заготовки до достижения давления 70-75 МПа, время подачи составляло одну минуту. После этого, давление в системе сбавлялось до нуля. Измерение давления осуществлялось с помощью манометра (рисунок 4.13, *в*).

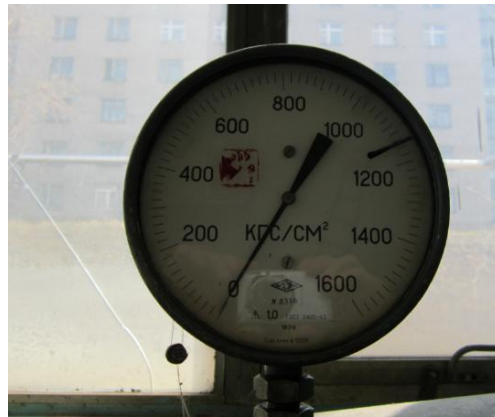
*a**б**в*

Рисунок 4.13 – Внешний вид измерительного прибора и технологического оснащения: *a* – разъемная матрица, *б* – специальное приспособление, *в* – манометр

Объектом исследования являлись геометрические размеры заготовки и готовой детали (рисунок 4.14).

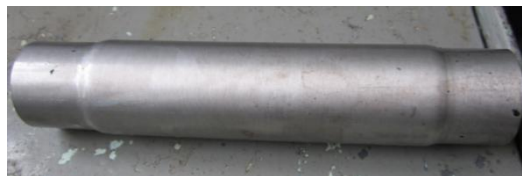
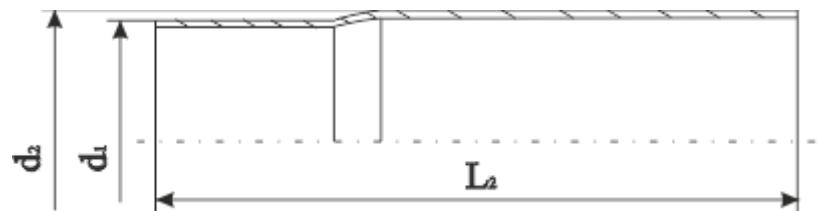
*a**б*

Рисунок 4.14 – Вкладыш: *a* – внешний вид, *б* – геометрические размеры

В таблице 4.3 приводятся фактические размеры до и после формообразования [92]. Значения ε_1 , ε_2 , ε_3 соответствуют относительной осевой, тангенциальной и радиальной деформации.

Таблица 4.3 – Геометрические размеры и деформации вкладыша

№	L , мм	d , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	L_1 , мм	ε_1	ε_2	ε_3
1	219,5	42,26	42,1	44,91	218,6	0,0038	0,0627	0,0041
2	219,5	42,3	42,1	44,92	219,3	0,0047	0,0619	0,0009
3	219,5	42,27	42,05	44,91	218,5	0,0052	0,0625	0,0046
4	219	42,26	42,05	44,91	218,5	0,005	0,0627	0,0023
5	219,5	42,29	42,1	44,91	218,5	0,0045	0,062	0,0046
6	221	42,3	42,1	44,9	218,5	0,0047	0,0615	0,0113
7	219,5	42,31	42,1	44,92	219	0,005	0,0617	0,0023
8	219,5	42,26	42,05	44,91	218,5	0,005	0,0627	0,0046
9	219,5	42,31	42,1	44,95	218,7	0,005	0,0624	0,0036
10	219,5	42,28	42,05	44,91	218,5	0,0054	0,0622	0,0046
11	219,5	42,3	42,05	44,92	218,7	0,0059	0,0619	0,0036
12	219,5	42,26	42,1	44,93	219	0,0038	0,0632	0,0023
13	219,5	42,26	42,05	44,92	218,5	0,005	0,0629	0,0046
14	219,5	42,3	42,05	44,93	218,5	0,0059	0,0622	0,0046
15	219,5	42,26	42,05	44,92	218,5	0,005	0,0629	0,0046
16	219,5	42,27	42,05	44,89	219	0,0052	0,062	0,0023
17	219,5	42,29	42,05	44,92	218,5	0,0057	0,0622	0,0046
18	221	42,32	42	44,91	218,5	0,0076	0,0612	0,0113
19	219,5	42,26	42,1	44,91	218,5	0,0038	0,0627	0,0046
20	219,5	42,27	42,05	44,92	218,5	0,0052	0,0627	0,0046
21	219,5	42,3	42,05	44,91	218,3	0,0059	0,0617	0,0055
22	219,5	42,3	42	44,9	218,5	0,0071	0,0615	0,0046
23	219,5	42,29	42,1	44,91	218,5	0,0045	0,062	0,0046
24	219	42,26	42,05	44,94	218,5	0,005	0,0634	0,0023
25	219,5	42,26	42,1	44,9	218,7	0,0038	0,0625	0,0036
ср.значение	219,58	42,282	42,066	44,915	218,61	0,0051	0,0623	0,0044

4.2.5 Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численного решения

В таблице 4.4 приведены данные по сравнению результатов численного и экспериментального исследования.

Таблица 4.4 – Сопоставление результатов численного расчета и эксперимента

	Результаты эксперимента			Результаты численного решения		
	d_1 , мм	d_2 , мм	L_1 , мм	d , мм	L , мм	d_1 , мм
		42,066	44,915	218,61	42	217,08
Погрешность расчета, %	-	-	-	0,157	0,7	0,011

Отклонение значений деформаций, полученных при численном решении задачи от экспериментальных данных, не превышает 0,2%. Таким образом, можно сделать вывод, что разработанная методика расчета напряженно-деформированного состояния во вкладыше в процессе гидравлической штамповки является приемлемой.

4.3 Моделирование технологического процесса изготовления неразъемного соединения в законцовке трубопровода с применением материалов с обычным структурным состоянием

Процесс изготовления неразъемного соединения между вкладышем и ниппелем достигается путем пластической деформации деталей. Изготовление узлов и деталей методом пластической деформации является широко известным и часто применяемым в практике. В зависимости от схемы нагружения этот метод называется волочением, обжатием, протяжкой, раскаткой и т.д. [61].

Задачей данного раздела являлась разработка методики определения НДС и уровня остаточных напряжений и деформаций в деталях законцовки трубопровода, изготовленного методом пластической деформации. Этапы исследований данного раздела приведены ниже:

1. Разработка методики определения расчета НДС и остаточных напряжений в деталях законцовки трубопровода, изготовленного методом пластической деформации.
2. Анализ НДС и остаточных напряжений в деталях законцовки трубопровода, изготовленного методом пластической деформации.
3. Экспериментальное исследование технологического процесса изготовления неразъемного соединения в законцовках трубопроводов.
4. Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов исследования.
5. Разработка методики определения расчета НДС и остаточных напряжений в деталях законцовки трубопровода, изготовленного методом пластической деформации, с применением наноструктурного титанового сплава ВТ6.
6. Анализ НДС и остаточных напряжений в деталях законцовки трубопровода, изготовленного методом пластической деформации, с применением наноструктурного титанового сплава ВТ6.

В данном разделе приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния и остаточных напряжений в деталях законцовки трубопровода, изготовленного методом пластической деформации. Материал детали типа ниппель – титановый сплав ВТ6 ($\sigma_T = 700$ МПа, $\sigma_{ДЧ} = 1150$ МПа, $E = 1,15$ ГПа [93, 94]).

4.3.1 Методика численного расчета НДС и остаточных напряжений в деталях законцовки трубопровода, изготовленного методом пластической деформации

Эскиз рабочей схемы технологической операции «раскатки» (рисунок 4.15).

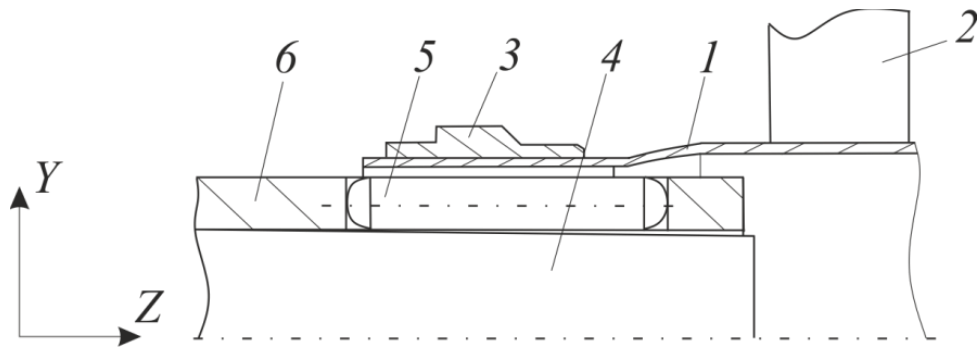


Рисунок 4.15 – Эскиз технологического процесса: 1 – вкладыш, 2 – ниппель, 3 – сепаратор, 4 – ролик, 5 – конус, 6 – шпиндель установки

Процесс формирования неразъемного соединения законцовки трубопровода осуществлялся в два этапа.

На первом этапе вкладыш 1 зафиксировали в шпинделе станка 6 и на поверхность L_1 установили ниппель 2. Далее, во внутреннюю полость втулки вводили специальное приспособление. При поступательном движении конуса 5 вдоль оси Z , осуществлялось движение роликов 4 в радиальном направлении. Это привело к нагружению втулки внутренним давлением p . Вследствие нагружения, производилась раздача внутреннего диаметра до необходимого размера. Интенсивность раздачи зависела от скорости движения и угла конуса.

Следующим шагом в технологической операции являлся вывод приспособления из узла. При обратном движении конуса 5 осуществлялся возврат роликов 4, т.е. менялась зона их контактного взаимодействия с заготовкой, и на участках, вышедших из взаимодействия, происходила разгрузка. По завершению вывода роликов 4, по всему объему деталей формировались поля остаточных напряжений и деформаций [6].

Детали спецприспособления выполнены из инструментальной стали 6ХВГ ($\sigma_T = 1450$ МПа, $\sigma_{ПЧ} = 1570$ МПа, $E = 300$ ГПа [94]). Учитывая, что модуль упругости оснастки много больше модуля упругости вкладыша и ниппеля, при моделировании, детали оснастки были приняты как абсолютно жесткие тела.

На первом этапе перемещение точек, лежащих на линии 1-2, ограничено в осевом и радиальном направлениях: $u(z) = 0$, $\omega(z = L3) = 0$.

На втором этапе меняется направление силового фактора p на обратное. Точки, лежащие на линии 1-2, ограничены в осевом и радиальном направлениях: $u(z) \leq 0, \omega(z = L_3) \leq 0$.

Расчетные схемы первого и второго этапов технологической операции проиллюстрированы на рисунке 4.16, а, б.

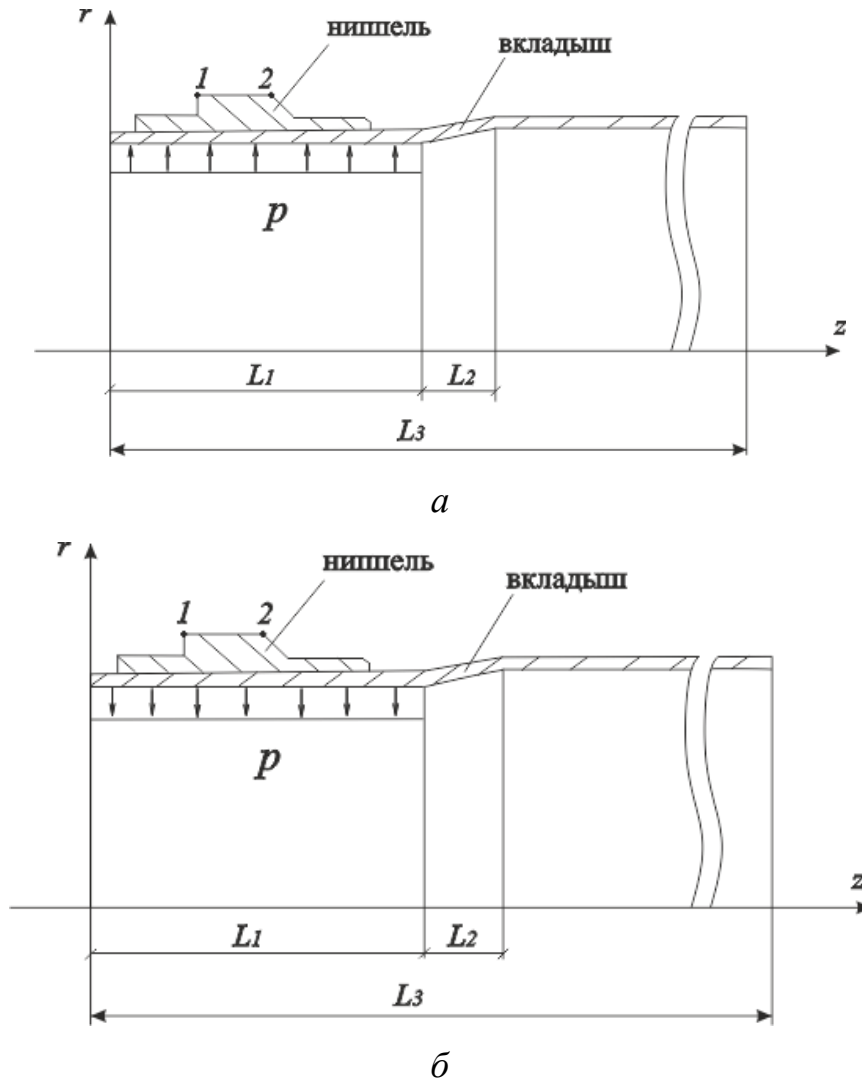


Рисунок 4.16 – Расчетная схема технологического процесса изготовления узла:

а – первый этап; б – второй этап

Твердотельная модель ниппеля получена при помощи CAD пакета SolidWorks [21].

Сеточный аналог ниппеля представлен на рисунке 4.17, а. Количество элементов составляло 490000 шт.

Сеточный аналог вкладыша (рисунок 4.17, б) импортирован из решения предыдущей задачи по моделированию гидравлической штамповки с учетом «технологической» наследственности.

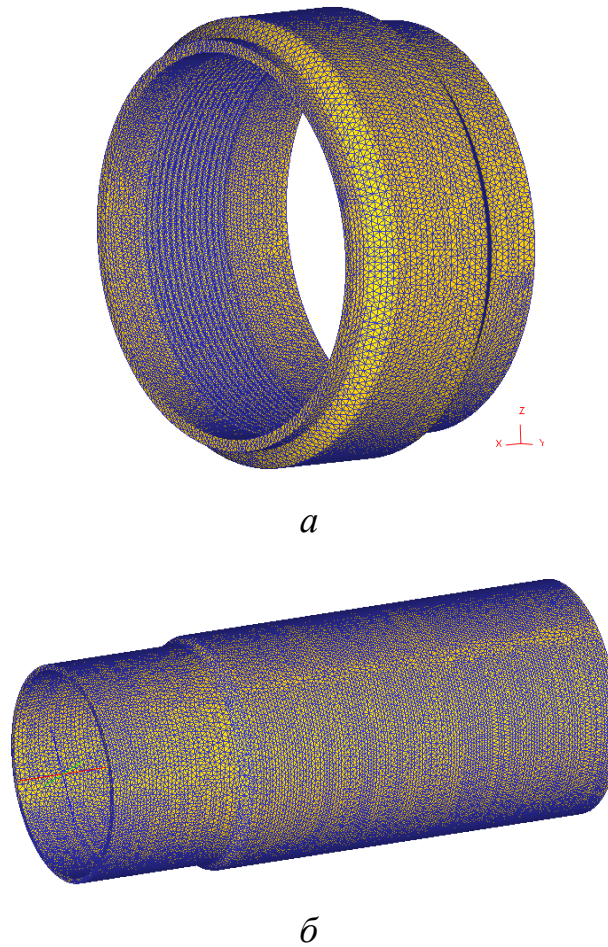


Рисунок 4.17 – Сеточные аналоги ниппеля (а) и вкладыша (б)

4.3.2 Анализ напряженно-деформированного состояния в деталях неразъемного соединения

Выполнен расчет напряженного состояния в деталях узла, сформированного во время технологической операции «раскатки» и после разгрузки. На рисунке 4.18, а, б показаны поля распределения средних осевых σ_z и тангенциальных σ_θ напряжений на поверхности L_1 детали типа «вкладыш» во время нагружения (сплошная линия) и после разгрузки (пунктирная линия). Видно, что максимальные осевые сжимающие напряжения возникают в зоне контакта гребешков ниппеля и поверхности трубы и достигают значения $\sigma_z = 585$ МПа. Максимальные осевые растягивающие напряжения наблюдаются на границе

участка L_1 . Ближе к торцу заготовки растягивающие напряжения стремятся к нулю, а на границе поверхностей L_1-L_2 ($z = 27$ мм) наблюдается увеличение, и достигают значения $\sigma_\theta = 70$ МПа. Подобный характер наблюдается в отношении тангенциальных напряжений, но с другим уровнем. Максимальные тангенциальные сжимающие напряжения равны 710 МПа, а максимальные растягивающие – 360 МПа.

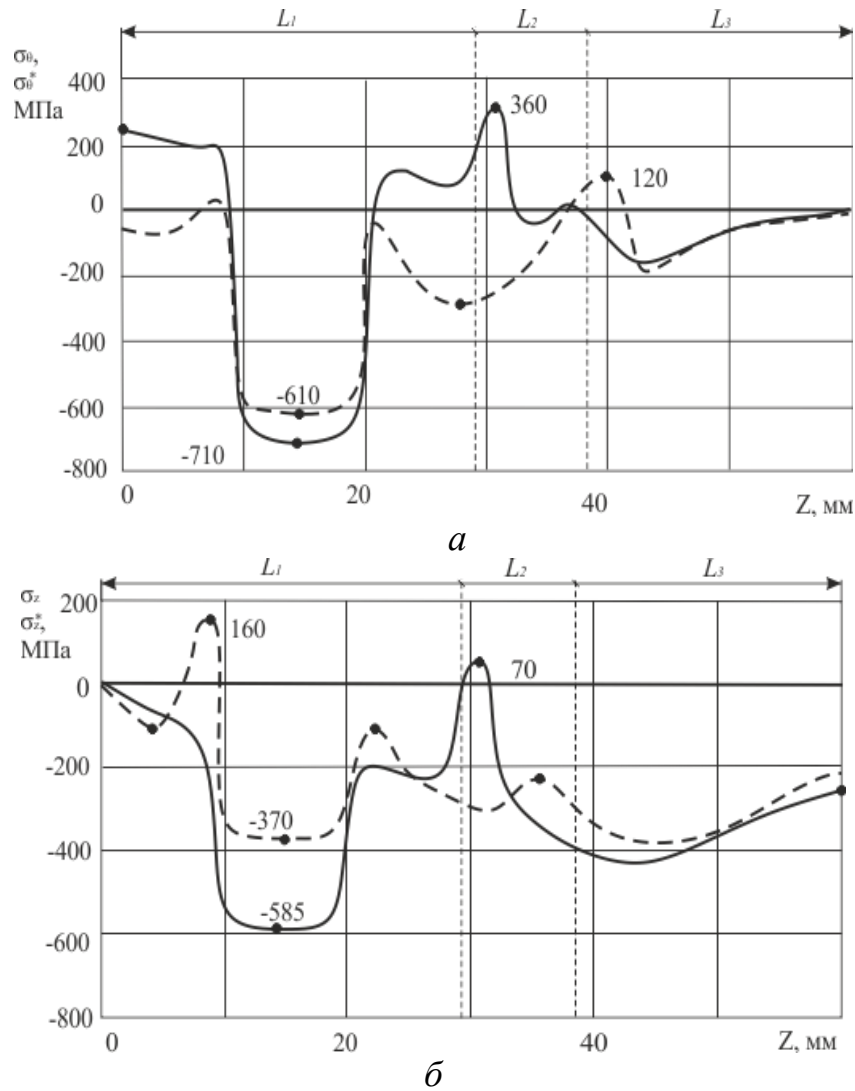


Рисунок 4.18 – Поля распределения напряжений после раздачи внутреннего диаметра трубы: *а* – осевые напряжения, *б* – тангенциальные напряжения

По окончанию процесса изготовления неразъемного соединения, в трубе, вследствие неоднородности деформаций, возникли остаточные напряжения и деформации [58]. На рисунке 4.19, *а*, *б* показаны поля распределения остаточных напряжений (пунктирная линия) после вывода специального

приспособления из трубы. Отметим, что вывод приспособления не приводит к изменению характера распределения напряжений, а происходит лишь падение уровня их значений. Максимальные растягивающие тангенциальные напряжения составляют 360 МПа, а сжимающие – 610 МПа. Максимальные значения растягивающих осевых остаточных напряжений равны 160 МПа, сжимающих – 370 МПа. Наибольшее снижение уровня соответствует осевым напряжениям и составляет 215 МПа. На рисунке 4.19, *а*, *б* представлены поля распределения тангенциальных и осевых остаточных напряжений в ниппеле из титанового сплава ВТ6 во время нагружения и после разгрузки.

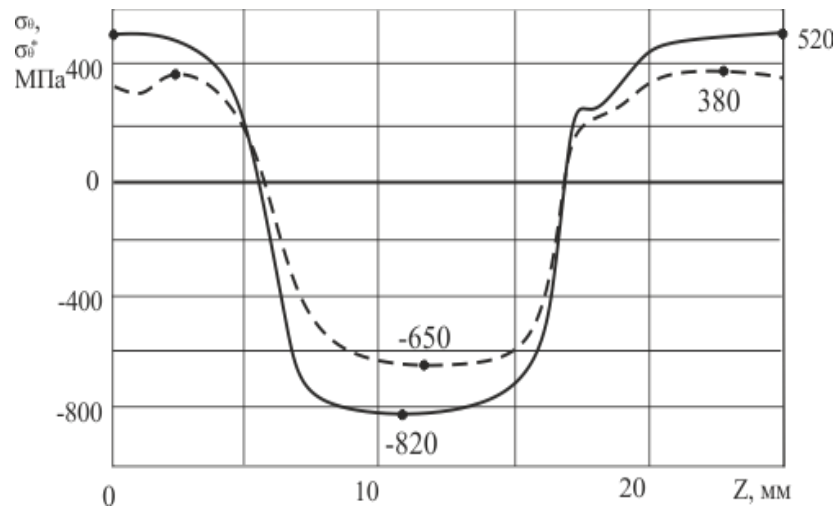
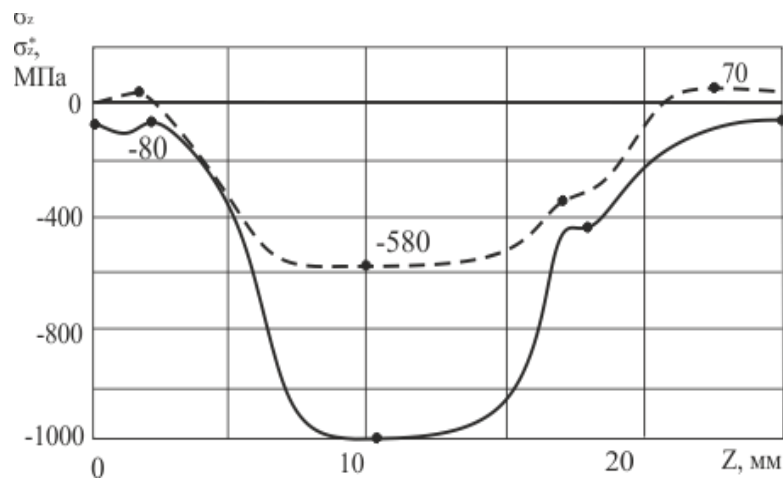
*а**б*

Рисунок 4.19 – Поля распределения остаточных напряжений:

а – осевые напряжения σ_z ; *б* – тангенциальные напряжения σ_θ

Установлено, что в зоне контакта кольцевых канавок ниппеля и наружной поверхности трубы, сжимающие напряжения достигают максимального значения и равны $\sigma_z = 1000$ МПа, $\sigma_\theta = 820$ МПа. По окончании обработки, после разгрузки в ниппеле формируются поля остаточных напряжений. При этом характер распределения напряжений остается неизменным, происходит лишь изменение уровня напряжений. Наибольшее снижение наблюдается в значениях остаточных сжимающих напряжений, их уровень соответственно составляет $\sigma_z^* = 580$ МПа, $\sigma_\theta^* = 650$ МПа.

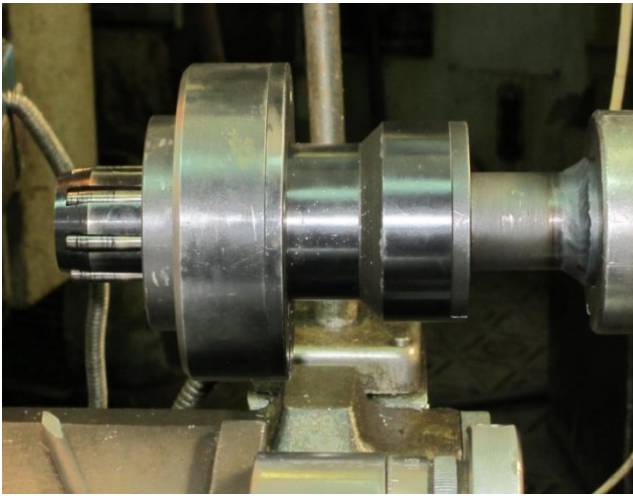
4.3.3 Экспериментальное исследование деформированного состояния в законцовки трубопровода

Исследования проводились на производственной базе УАП «ОАО «Гидравлика» ГК «Ростехнологии» (г. Уфа). Объектом исследования являлась законцовка трубопровода, состоящая из ниппеля и вкладыша. Количество заготовок составляло 35 шт.

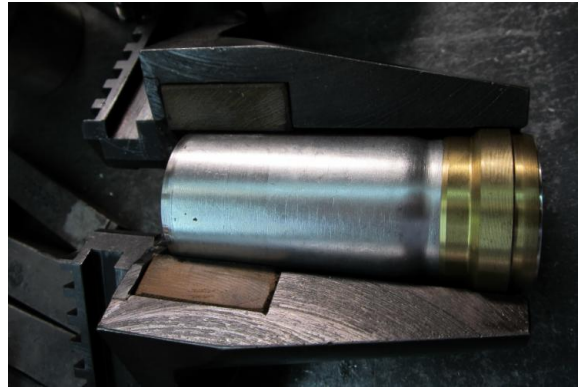
Для проведения экспериментальных работ использовалось следующее оборудование: токарный станок, спецприспособление («раскатник»; рисунок 4.20, а), специальное оснащение (кулачки) и штангенциркуль.

Процесс изготовления законцовки трубопровода осуществлялся следующим образом. Первоначально производилось измерение фактических геометрических размеров деталей. Далее, для подготовки контактирующих поверхностей, наружную поверхность вкладыша и внутреннюю ниппеля протирали салфеткой, смоченной синтетическим спиртом. После этого, производилась сборка узла (рисунок 4.20, б). Следующим этапом являлась установка законцовки трубопровода в специальных кулачках и их фиксация в шпинделе станка. На задней бабке станка производилась сборка «раскатника» (рисунок 4.20, в). По завершению подготовительных операций, осуществляли раздачу внутреннего диаметра вкладыша до размера $d_1 = 40.8 \text{ max}$. Далее приспособление выводилось из узла и разбиралось специальное оснащение. На рисунке 4.20, г

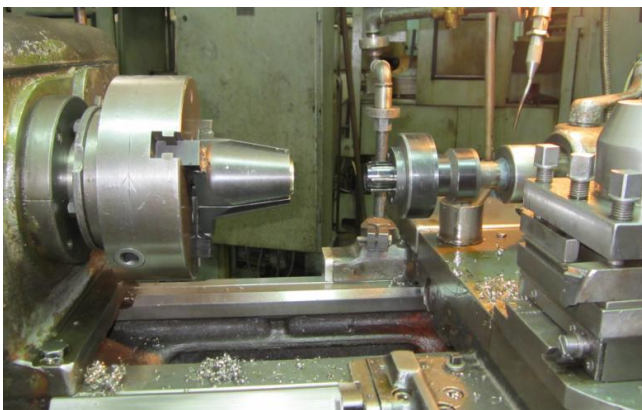
проиллюстрированы законцовки трубопровода на окончательном этапе изготовления.



а



б



в



г

Рисунок 4.20 – Внешний вид технологического оборудования:

а – спецприспособление (раскатник), *б* – кулачки для фиксации вкладыша,
в – внешний вид оборудования и технологического оснащения перед операцией,
г – законцовка трубопровода

В таблице 4.5 приведены размеры соединения до и после операции развальцовки [92].

Таблица 4.5 – Геометрические размеры законцовки до и после развальцовки

№	d , мм	d_1 , мм	L , мм	L_1 , мм
1	42	42,7	100,8	108
2	42	42,5	100,7	106,5
3	42	42,5	100,8	105,5
4	42	42,3	100,9	104,5
5	42	42,5	100,9	104,7
6	42	42,5	100,8	104,7
7	42	42,8	100,8	104,5
8	42	42,1	100,8	104,8
9	42	42,6	100,9	104,9
10	42	42,2	100,7	104,7
11	42	42,2	100,8	104,3
12	42	42,3	100,8	104,5
13	42	42,4	100,8	103,9
14	42	42,4	100,8	104,2
15	42	42,6	100,9	105
16	42	42,5	100,9	104,6
17	42	42,4	100,8	104,7
18	42	42,4	100,9	104,7
19	42	42,6	100,9	105
20	42	42,3	100,8	104,6
21	42	42,5	100,8	104,5
22	42	42,7	100,7	104,5
23	42	42,6	100,9	104,5
24	42	42,5	100,8	104,3
25	42	42,6	100,9	104,4
26	42	42,6	100,7	104,5
27	42	42,3	100,7	104,6
28	42	42,4	100,8	104,3
29	42	42,3	100,8	104,5
30	42	42,4	100,9	104,5
31	42	42,6	100,7	104,4
32	42	42,6	100,7	104,6
33	42	42,5	100,8	104,2

№	d , мм	d_I , мм	L , мм	L_I , мм
34	42	42,6	100,8	104,4
35	42	42,4	100,9	104,5
ср.значение	42	42,45	100,8	104,7

4.3.4 Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численного решения

В таблице 4.6 приведены данные по сравнению результатов численного и экспериментального исследования.

Таблица 4.6 – Сопоставление результатов численного расчета и эксперимента

	Результаты численного расчета		Результаты эксперимента	
	d_I , мм	L_I , мм	d_I , мм	L_I , мм
	42,05	104,0	42,45	104,7
Погрешность расчета, %	–	–	0,94	0,66

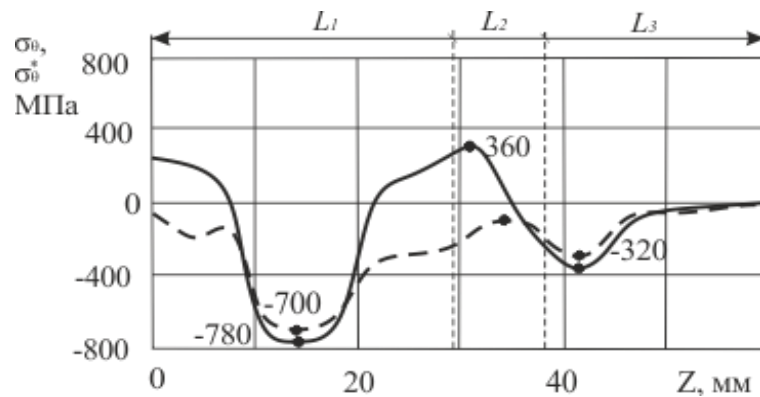
Отклонение значений деформаций, полученных при численном решении задачи от экспериментальных данных, не превышает 0,2 %. Таким образом можно заключить, что разработанная методика расчета напряженно-деформированного состояния во вкладыше в процессе гидравлической штамповки является приемлемой.

4.4 Моделирование технологического процесса изготовления неразъемного соединения в законцовке трубопровода с применением объемных наноструктурных материалов

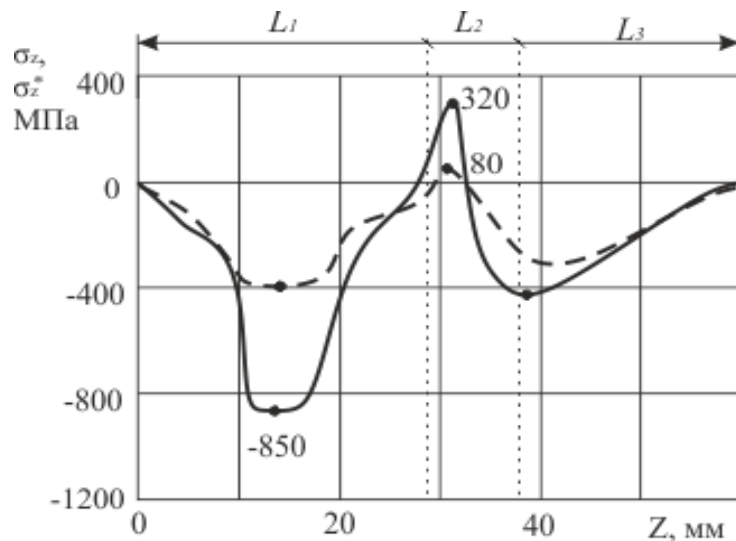
В данном разделе приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния и уровня остаточных напряжений и деформаций в деталях законцовки трубопровода, изготовленного методом пластической деформации. В качестве материала детали типа ниппель принимался наноструктурный титановый сплав ВТ6 ($\sigma_T = 900$ МПа, $\sigma_{ПЧ} = 1620$ МПа [2, 3]). Расчет проводился в соответствии с методикой, изложенной в разделе 4.3.

4.4.1 Анализ напряженно-деформированного состояния в деталях неразъемного соединения

На основании методики описанной в разделе 4.3 выполнен расчет напряженного состояния в деталях узла, сформированного во время технологической операции «раскатки» и после разгрузки. На рисунке 4.21, *а*, *б* показаны поля распределения средних (сплошная линия) и остаточных (пунктирная линия) осевых, тангенциальных σ_{θ}^* напряжений во вкладыше.



а



б

Рисунок 4.21 – Поля распределения средних и остаточных напряжений после раздачи внутреннего диаметра трубы; *а* – осевые напряжения σ_z , σ_z^* ;

б – тангенциальные напряжения σ_{θ} , σ_{θ}^*

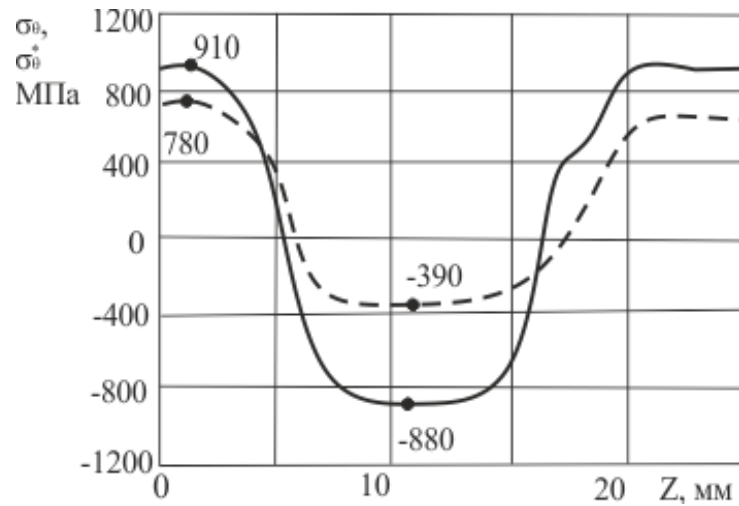
Видно, что максимальные осевые напряжения возникают в зоне контакта гребешков ниппеля и поверхности трубы и достигают значения $\sigma_z = 850$ МПа.

Ближе к торцу заготовки, осевые напряжения стремятся к нулю, на границе участка L_1-L_2 наблюдается рост растягивающих напряжений и их значения достигают максимума – 320 МПа. Подобный характер наблюдается в отношении тангенциальных напряжений. Максимальные тангенциальные сжимающие напряжения равны 780 МПа, а максимальные растягивающие – 360 МПа.

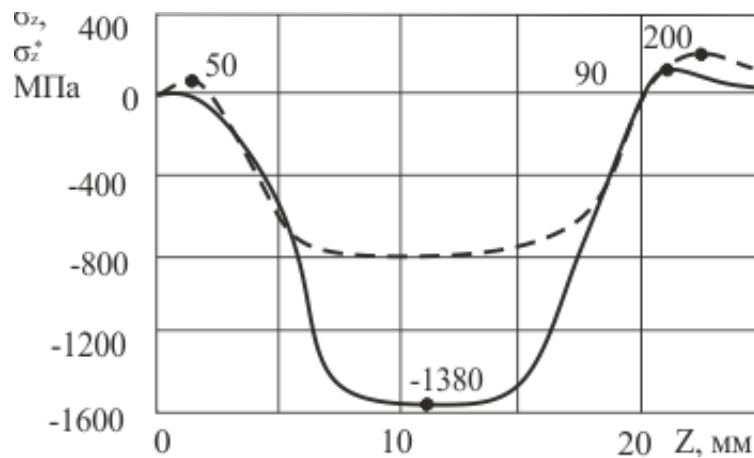
По окончании процесса изготовления неразъемного соединения, во вкладыше, вследствие неоднородности деформаций, возникли остаточные напряжения и деформации [58]. На рисунке 4.21, *а, б* штриховыми линиями проиллюстрированы поля распределения остаточных напряжений после вывода «раскатника» из трубы. Характер остаточных тангенциальных напряжений сжимающий и их максимальное значение составляет 700 МПа. Значения максимальных растягивающих осевых остаточных напряжений составляют 80 МПа, сжимающих – 400 МПа.

На рисунке 4.22, *а, б* приведены графики распределения напряжений в детали типа ниппель в процессе раздачи и по окончании технологического процесса.

Заметим, что в зоне контакта гребешков ниппеля и наружной поверхности вкладыша, сжимающие напряжения достигают максимального значения и равны $\sigma_z = 1380$ МПа, $\sigma_\theta = 880$ МПа. По окончании обработки, в ниппеле формируются поля остаточных напряжений. Как видно из графиков, характер остается неизменным, происходит лишь уменьшение уровня напряжений. Наибольший спад наблюдается в отношении сжимающих напряжений, их значения равны $\sigma_z^* = 800$ МПа, $\sigma_\theta^* = 390$ МПа.



a



б

Рисунок 4.20 – Поля распределения остаточных напряжений:

a – осевые напряжения σ_z ; *б* – тангенциальные напряжения σ_θ

Таким образом, в результате проведенного исследования были получены характер распределения НДС и остаточных напряжений в деталях законцовки трубопровода.

4.5 Сопоставление напряженного состояния и остаточных напряжений в деталях законцовки трубопровода, изготовленных из крупнозернистых и наноструктурных материалов

В таблице 4.7 приведены сравнительные данные напряжений, возникающих в процессе нагружения и последующей разгрузки при использовании обычного материала и наноструктурного титанового сплава.

Таблица 4.7 – Максимальные напряжения, возникающие в процессе развальцовки и по ее завершению

Наименование детали/материал		$\sigma_{\theta_{\max}}$, МПа	$\sigma_{z_{\max}}$, МПа	$\Delta\sigma_{\theta_{\max}}$, МПа	$\Delta\sigma_{z_{\max}}$, МПа	$\sigma_{\theta_{\max}}^*$, МПа	$\sigma_{z_{\max}}^*$, МПа	$\Delta\sigma_{\theta_{\max}}^*$, МПа	$\Delta\sigma_{z_{\max}}^*$, МПа
Ниппель ВТ6		-820	-1000	0	0	-650	-580	240	0
Вкладыш 12Х18Н10Т	Участок L_1	-710	-585	0	-610	-370	0	0	0
	Участок L_2	360	-400	0	-280	-200	180	120	80
	Участок L_3	-150	-420	0	-190	-380	0	100	220
Ниппель наноструктурный титановый сплав ВТ6		-880	-1380	60	380	-390	-800	0	220
Вкладыш 12Х18Н10Т	Участок L_1	-780	-850	70	-700	-400	90	30	265
	Участок L_2	-420	320	140	-100	-80	0	0	0
	Участок L_3	380	-400	230	-320	-280	130	0	0

Вычисления разности напряжений производились по следующей формуле:

$$\Delta\sigma = \left| \sigma_1 \right| - \left| \sigma_2 \right|, \quad (4.1)$$

где σ_1 – напряжения в деталях, изготовленных из обычного титанового сплава ВТ6, σ_2 – напряжения в ниппеле из наноструктурного сплава ВТ6 и во вкладыше, взаимодействующего с ним.

Видно, что в ниппеле, выполненном из наноструктурного материала, уровень осевых и тангенциальных напряжений при нагружении выше, чем в ниппеле, изготовленного из титанового сплава ВТ6 (таблица 4.7). Разность значений составляет 60 МПа для осевых и 240 МПа для тангенциальных напряжений. Заметим также, что при разгрузке уровень остаточных тангенциальных напряжений на порядок меньше в ниппеле, выполненного из наноструктурного титанового сплава, чем в ниппеле из крупнозернистого материала [9]. Отметим, что в отношении осевых остаточных напряжений

прослеживается обратная картина. При этом разность значений составляет 240 МПа и 220 МПа соответственно (таблица 4.7).

Как показал анализ результатов численного расчета, на обоих этапах нагружения во вкладыше на участке L_1 уровень напряжений при контакте с ниппелем из наноструктурного титанового сплава больше, чем с деталью из обычного материала. На других участках наблюдается несколько иная картина. Так, в криволинейной зоне L_2 вкладыша при контакте с ниппелем из сплава ВТ6, максимальные тангенциальные напряжения имеют растягивающий характер и сжимающий для осевых напряжений. И, наоборот, для вкладыша, взаимодействующего с наноструктурным ниппелем. Данные различия возникают ввиду изменения механических свойств материала. У наноструктурного сплава увеличен предел текучести, при этом снижена пластичность.

Основные выводы по главе 4

Проведено исследование НДС в объектах сложной формы (на примере законцовки гибкого трубопровода) с учетом технологической наследственности в отдельных элементах объектов, 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. Определенно, что прочность и надежность законцовки гибкого трубопровода с применением наноструктурного материала по сравнению аналогичными конструкциями из обычных материалов повышается практически в 2 раза

ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГО- И МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОБЪЕМНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Важным требованием для ответственных деталей в авиации и двигателестроении является высокая усталостная прочность. Современные методы аналитического расчета усталостной прочности конструкций сложной формы характеризуются высокой трудоемкостью. Одним из решений данного вопроса является применение численного расчета, что позволяет уменьшить трудоемкость и повысить производительность проектных работ [11].

В данной работе рассмотрена методика численного расчета усталостной прочности элементов конструкций. Приведены результаты исследования предела выносливости элементов конструкций при наличии концентратора напряжений (пластина с отверстием, стержень с выточкой), а также установлено влияние технологической наследственности в деталях из наноструктурных титановых сплавов после РКУП на многоцикловую усталостную прочность.

5.1 Методика расчета усталостной прочности конструкций при многоцикловом нагружении

При расчете многоцикловой усталостной прочности конструкций, процесс нагружения происходит при упругом деформировании, т.е. зависимость между напряжениями σ , деформациями ϵ , перемещениями в теле конструкции и внешними усилиями F является линейной.

Методика расчета усталостной прочности элементов конструкций при многоцикловом нагружении представляет собой ряд последовательных этапов. Схема данной последовательности представлена на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Схема алгоритма расчета многоциклового усталостной прочности конструкций

5.1.1 Решение статической задачи

На первом этапе, с целью определения полей напряжений σ_{ij} и деформаций ϵ_{ij} , в каждой точке конструкции производится решение статической задачи при максимальных значениях внешних нагрузок.

Исходными данными для расчета являются геометрические характеристики модели конструкции, сеточный аналог, упругие константы материала (E , μ), а также кривая деформирования материала.

Методика решения задач при статическом нагружении приведена в третьей главе.

5.1.2 Приведение объемного напряженного к эквивалентному одноосному состоянию

Согласно ГОСТу 25.502 – 79 [31] для определения усталостных характеристик материала, в основном, испытания проводятся в условиях одноосного напряженного состояния, изменяющегося по симметричному циклу. Т.е. современные справочные данные представляют информацию по изучению зависимостей между усталостной прочностью и внешней нагрузки при одноосном нагружении. Как было отмечено ранее (см. п. 5.1.1), результатом решения статической задачи является тензор напряжений, рассчитанный для каждой точки конструкции. Таким образом, для оценки усталостной прочности конструкции необходимо привести рассчитанное объемное напряженное состояние к эквивалентному одноосному. Такое приведение основано на критериях прочности в условиях статического нагружения [14]. Ниже представлены выражения, используемые для приведения амплитудных и средних напряжений цикла нагружения [40, 72]:

гипотеза пластичности – наибольших касательных напряжений Треска – Сен-Венана:

$$\begin{cases} \sigma_a^{pp} = \sigma_{1a} - \sigma_{3a} \\ \sigma_m^{pp} = \sigma_{1m} - \sigma_{3m} \end{cases} ; \quad (5.1)$$

гипотеза пластичности Губера – Мизеса – Генки – потенциальной энергии формоизменения:

$$\begin{cases} \sigma_a^{\text{пп}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2} \\ \sigma_m^{\text{пп}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1m} - \sigma_{2m})^2 + (\sigma_{2m} - \sigma_{3m})^2 + (\sigma_{3m} - \sigma_{1m})^2} \end{cases}, \quad (5.2)$$

где σ_{1a} , σ_{2a} , σ_{3a} и σ_{1m} , σ_{2m} , σ_{3m} – главные напряжения тензоров амплитудных и средних значений напряжений.

Отметим, что при использовании соотношений (5.1) и (5.2) приведенное среднее напряжений цикла принимает только положительные значения. В случае необходимости учета знака напряжений применяется следующее выражение:

$$\begin{cases} \sigma_a^{\text{пп}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2} \cdot \text{sign}(\sigma_{1a}) \\ \sigma_m^{\text{пп}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1m} - \sigma_{2m})^2 + (\sigma_{2m} - \sigma_{3m})^2 + (\sigma_{3m} - \sigma_{1m})^2} \cdot \text{sign}(\sigma_{1m}) \end{cases}, \quad (5.3)$$

где $\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, x > 0 \\ -1, x < 0 \end{cases}$ – функция знака числа.

5.1.3 Сведение асимметричного цикла напряжений к эквивалентному симметричному

Как было отмечено ранее, согласно ГОСТу 25.502-79 [15] определение усталостных характеристик материала, в основном, проводятся в условиях одноосного напряженного состояния, изменяющегося по симметричному циклу. Поэтому, в случае изменения напряженного состояния в теле конструкции по асимметричному циклу возникает необходимость приведения полученных характеристик к эквивалентным по повреждаемости характеристикам в условиях симметричного цикла нагружения. Для выполнения данного перехода используются соотношения для амплитуды эквивалентного симметричного цикла напряжений $\sigma_a^{\text{экв}}$ [16, 17, 56]:

на основании зависимости Гудмана:

$$\sigma_a^{\text{экв.}} = \begin{cases} \frac{\sigma_a^{\text{пр}}}{1 - \frac{\sigma_m^{\text{пр}}}{\sigma_{\text{ПЧ}}}}, & \sigma_m^{\text{пр}} \geq 0 \\ 0, & \sigma_m^{\text{пр}} < 0 \end{cases}, \quad (5.4)$$

на основании зависимости Гербера:

$$\sigma_a^{\text{экв.}} = \frac{\sigma_a^{\text{пр}}}{1 - \left(\frac{\sigma_m^{\text{пр}}}{\sigma_{\text{ПЧ}}} \right)^2}, \quad (5.5)$$

на основании зависимости Зодерберга:

$$\sigma_a^{\text{экв.}} = \begin{cases} \frac{\sigma_a^{\text{пр}}}{1 - \frac{\sigma_m^{\text{пр}}}{\sigma_{\text{T}}}}, & \sigma_m^{\text{пр}} \geq 0 \\ 0, & \sigma_m^{\text{пр}} < 0 \end{cases}, \quad (5.6)$$

где $\sigma_{\text{ПЧ}}$ – предел прочности материала, σ_{T} – предел текучести материала.

Таким образом, результатом приведения характеристик асимметричного цикла $\sigma_{\text{max}}^{\text{пр}}$, $\sigma_a^{\text{пр}}$, $\sigma_m^{\text{пр}}$, σ_{min} к симметричному являются следующие характеристики

$$\sigma_{\text{max}}^{\text{экв.}} = \left| \sigma_{\text{min}}^{\text{экв.}} \right|, \quad \sigma_a^{\text{экв.}}, \sigma_m^{\text{экв.}} = 0.$$

5.1.4 Корректировка значений эквивалентных амплитудных напряжений для учета конструктивно-технологических факторов

Известно [40], что усталостная прочность деталей может быть в 2 – 6 раз меньше усталостной прочности стандартного образца. Указанное снижение является следствием влияния конструктивно-технологических факторов:

1. концентрации напряжений;
2. абсолютных размеров поперечных сечений (масштабный фактор);
3. качества обработки поверхности;
4. эксплуатационных факторов (коррозия, повышенная или пониженная температура, радиация и т.д.);

5. технологических методов поверхностного упрочнения деталей
(наклеп поверхностного слоя роликами, дробью и т.п.)

Для учета этих факторов применяется коэффициент пересчета предела выносливости K_f . Коэффициент K_f – это отношение предела выносливости объекта $\sigma_{-1Д}$ к пределу выносливости стандартного образца σ_{-1} при одинаковой асимметрии цикла.

Таким образом, предел выносливости объекта исследований определяется следующим выражением:

$$\sigma_{-1Д} = K_f \sigma_{-1} . \quad (5.7)$$

Т.е. учет конструктивно-технологических факторов определяется корректировкой значений эквивалентных амплитудных напряжений, которая определяется следующим подходом: конструктивные особенности не снижают прочностные характеристики материала, а увеличивают уровень внешней нагрузки. Выражение для амплитуды цикла напряжений при симметричном цикле с учетом характеристик конструкции имеет вид [16, 17]:

$$\sigma_{aД} = \sigma_a / K_f . \quad (5.8)$$

При асимметричном нагружении характеристики цикла определяются по уравнениям [17]:

$$\begin{cases} \sigma_{aД} = \sigma_a / K_f \\ \sigma_{mД} = \sigma_m \end{cases} . \quad (5.9)$$

В соответствии с ГОСТ 25.504-82 [32] коэффициент снижения предела выносливости определяется по формуле:

$$K_f = K_v / \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) , \quad (5.10)$$

где K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений,

$K_{d\sigma}$ – коэффициент влияния абсолютных размеров поперечного сечения,

$K_{F\sigma}$ – коэффициент влияния шероховатости поверхности,

K_v – коэффициент влияния поверхностного упрочнения.

Результатом вышеуказанных преобразований являются следующие характеристики: $\sigma_{\max D}^{\text{экв.}} = \left| \sigma_{\min D}^{\text{экв.}} \right|$, $\sigma_{aD}^{\text{экв.}}$, $\sigma_{mD}^{\text{экв.}} = 0$, $R = -1$.

5.1.5 Расчет числа циклов N , при которых происходит усталостное разрушение конструкции

Следующим этапом расчета является вычисление в каждой точке тела значение числа циклов N , при которых происходит усталостное разрушение. При этом, значение N определяется с помощью заданной кривой усталости для симметричного цикла изменения нагружения.

Кривая усталости описывает зависимость уровня амплитудных напряжений, постоянной в ходе всего процесса нагружения от числа циклов до разрушения. Одной из характеристик цикла является коэффициент асимметрии, который определяется следующим выражением:

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (5.11)$$

Кривая задается набором точек $[\sigma_{ah}, N_h]$, $h = \overline{1, q}$, при этом $\sigma_{ah} \leq \sigma_{ah+1}$, $h = \overline{1, q-1}$. Значения σ_{ah}, N_h принимаются исходя из справочных данных, основанных на результатах проведенных экспериментов [16].

Описание кривой усталости на интервалах между указанными точками $h = \overline{1, q}$ проводится по следующим соотношениям [17]:

линейная

$$N = \frac{(N_h - N_{h+1})\sigma_a + \sigma_{ah+1}N_h - \sigma_{ah}N_{h+1}}{\sigma_{ah+1} - \sigma_{ah}}, \quad (5.12)$$

полулогарифмическая

$$\lg N = \frac{(\lg N_h - \lg N_{h+1})\sigma_a + \sigma_{ah+1} \lg N_h - \sigma_{ah} \lg N_{h+1}}{\sigma_{ah+1} - \sigma_{ah}}, \quad (5.13)$$

и двойная логарифмическая интерполяция

$$\lg N = \frac{(\lg N_h - \lg N_{h+1})\lg \sigma_a + \lg \sigma_{ah+1} \lg N_h - \lg \sigma_{ah} \lg N_{h+1}}{\lg \sigma_{ah+1} - \lg \sigma_{ah}}, \quad (5.14)$$

где σ_a – значение амплитуды напряжения, для которого надо найти долговечность N .

В том случае если $\sigma_a < \sigma_{a1}$ полагается, что долговечность $N = N_6$, где N_6 – база эксперимента [17].

При задании кривой усталости необходимо учитывать какой вид напряженного состояния возникает в теле исследуемого объекта (одноосное напряженное состояние, либо чистый сдвиг) и, исходя из этого, подбирать необходимую кривую, полученную при эксперименте с аналогичным характером напряженного состояния.

Для определения вида напряженного состояния используется параметр β , который определяется выражением:

$$\beta = \begin{cases} \sigma_1/\sigma_3, & |\sigma_1| < |\sigma_3| \\ \sigma_3/\sigma_1, & |\sigma_1| > |\sigma_3| \end{cases}, \quad (5.15)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения тензора напряжений в некоторой точке, полученного в результате статического расчета. Введенный параметр принимает значения из отрезка $[-1, 1]$. В зависимости от значения параметра β напряженное состояние соответствует одному из следующих видов [17]

- $\beta = -1$ – чистый сдвиг (используются кривые усталости, полученные при циклическом кручении);
- $\beta = 0$ – одноосное напряженное состояние (используются кривые усталости, полученные при циклическом изгибе или растяжении – сжатии в зависимости от вида распределения напряжений);
- $\beta = 1$ – чистое двухосное растяжение (сжатие) (используются кривые усталости, полученные при растяжении (сжатии)).

5.1.6 Вычисление коэффициентов запаса усталостной прочности по долговечности и амплитудным напряжениям

Основными характеристиками усталостной прочности конструкции являются коэффициент запаса n_{SF}^N по долговечности и коэффициент запаса по амплитудам напряжений n_{SF}^σ .

Согласно ГОСТ 23.207-78 [30], коэффициент запаса по долговечности определяется соотношением базовой долговечности N_6 к текущему значению параметра N [17].

$$n_{SF}^N = N_6 / N , \quad (5.17)$$

где $N_6 = 10^7$;

Коэффициент запаса по амплитудам напряжений n_{SF}^σ определяется отношением амплитуды напряжения σ_{a1} для стандартного образца, при базовом количестве циклов N_6 , к текущему значению приведенного параметра $\sigma_a^{\text{экв.}}$ [19].

$$n_{SF}^\sigma = \sigma_{a1} / \sigma_a^{\text{экв.}} . \quad (5.18)$$

Условием усталостного разрушения элементов конструкции является превышения приведенного амплитудного напряжения значения $\sigma_{a\text{экв}}$ при данном числе циклов для стандартного образца: $\sigma_a^{\text{экв.}} > \sigma_{a1}$

5.2 Расчет усталостной прочности стержня с выточкой при симметричном циклическом изгибе

В данном разделе приведены результаты расчета усталостной прочности стержней с выточкой при симметричном циклическом изгибе. Расчет проводился по методике, описанной в п.5.1 и состоял из шести этапов.

Решение статической задачи

На первом этапе проводилось решение статической задачи при максимальных значениях внешних нагрузок. Численное решение статической задачи (п. 5.1.1) было достигнуто с помощью метода конечных элементов,

реализованного с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS [98].

Материал стержней соответствовал наноструктурному титановому сплаву Ti-6Al-4V. Физико-механические характеристики Ti-6Al-4V приведены в таблице 3.1 в главе 3. Геометрические размеры стержня с выточкой представлены на рисунке 5.6.

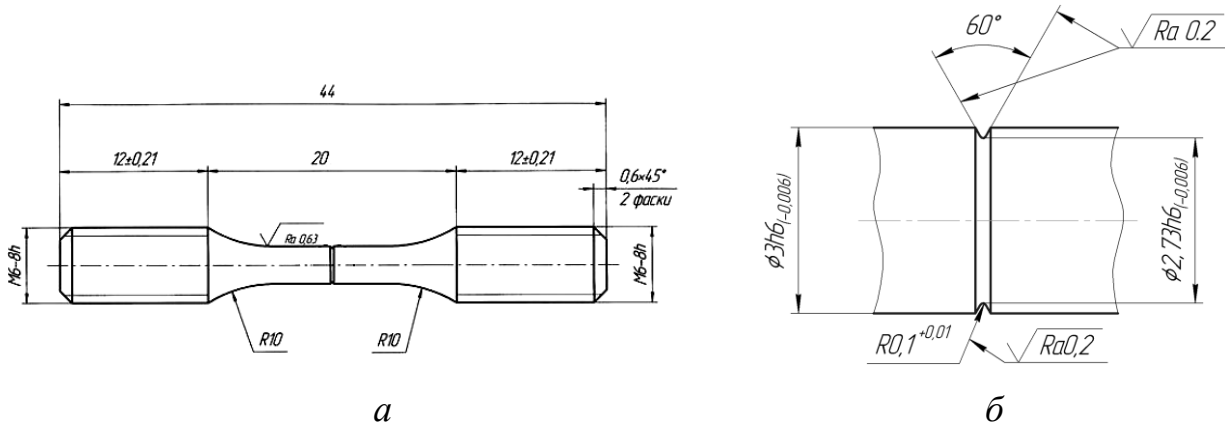


Рисунок 5.6 – Геометрические размеры стержня (а) и выточки (б)

Сеточный аналог рабочей части стержня с выточкой приведен на рисунке 5.7, а, б. Отметим, что в зоне концентратора напряжений производилось сгущение сетки (рисунок 5.7, б). Метод построения конечно-элементной модели приведен в главе 3.

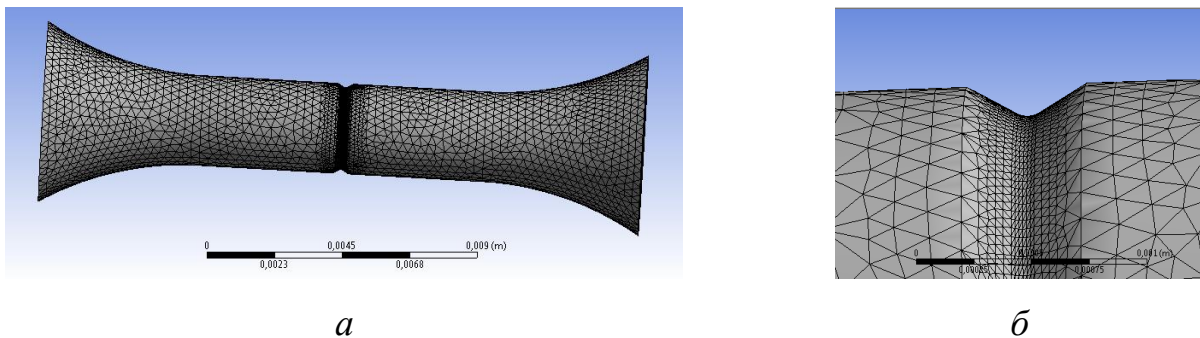


Рисунок 5.7 – Сеточный аналог рабочей части стержня с выточкой

Расчетная схема представлена на рисунке 5.8 и представляет собой жестко закрепленный с одного торца стержень. В точке A стержень имеет жесткое закрепление. В точке B прикладывалась нагрузка F , изменяющаяся по симметричному циклу $R = -1$.

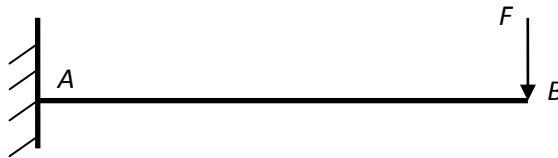


Рисунок 5.8 – Расчетная схема для стержня с выточкой при изгибе

Приведение объемного напряженного состояния к эквивалентному одноосному

Для приведения рассчитанного объемного напряженного состояния к эквивалентному одноосному, использовалась гипотеза пластичности Губера – Мизеса – Генки – потенциальной энергии формоизменения: (*Equivalent (VonMises)*).

Сведение асимметричного цикла напряжений к эквивалентному симметричному

Так как значение нагрузки изменялось по симметричному циклу, то учет асимметрии цикла не требовался.

Корректировка значений эквивалентных амплитудных напряжений для учета конструктивно-технологических факторов

Учет конструктивно-технологических факторов проводился при помощи коэффициента пересчета предела выносливости K_f , определенным по следующей формуле

$$K_f = K_v / \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right). \quad (5.19)$$

Чувствительность материала к масштабному фактору и местным напряжениям вычисляли при помощи выражения (5.20):

$$\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} = \frac{2\alpha_\sigma}{1 + \left(88,3 \frac{\bar{G}}{L} \right)^{\nu_\sigma}}. \quad (5.20)$$

Градиент напряжений. Увеличение \bar{G} снижает чувствительность материала к местным напряжениям. Градиент напряжений \bar{G} подобно теоретическому коэффициенту концентрации напряжений, зависит от формы тела и условий

нагружения, и определяется законом изменения напряжений в окрестности очага концентрации [86].

$$\bar{G} = \frac{2(1+\varphi)}{r} + \frac{2}{d} = \frac{2(1+0,32)}{0,1} + \frac{2}{2,7} = 27,14. \quad (5.23)$$

где d – диаметр стержня в зоне концентратора напряжений, r – радиус скругления на дне выточки, φ рассчитывалось по формуле:

$$\varphi = \frac{1}{4\sqrt{\frac{D-d}{2r}+2}} = \frac{1}{4\sqrt{\frac{3-2,7}{2 \times 0,1}+2}} = 0,32. \quad (5.24)$$

Протяженность концентратора L :

$$L = \pi \times d = \pi \times 2,7 = 8,48 \text{ мм}, \quad (5.25)$$

где d – диаметр стержня на дне выточки.

Учитывая вышеизложенное, вычислено

$$\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} = \frac{2\alpha_{\sigma}}{1 + \left(88,3 \frac{\bar{G}}{L}\right)^{\nu_{\sigma}}} = \frac{2 \times 4,4}{1 + \left(88,3 \frac{27,14}{8,48}\right)^{0,08}} = 3,43; \quad (5.26)$$

где α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений,

ν_{σ} – коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений и масштабному фактору.

Таким образом, определившись со значениями необходимых коэффициентов, проводился расчет коэффициента пересчета предела выносливости K_f :

$$K_f = K_v / \left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) = 1 / \left(3,43 + \frac{1}{1} - 1 \right) = 0,29; \quad (5.27)$$

$K_{F\sigma}$ – коэффициент влияния шероховатости поверхности. Рабочую поверхность стержня подвергали шлифовке и механической полировке с обеспечением шероховатости Ra 0,63 мкм, что соответствует $K_{F\sigma} = 1$.

K_v – коэффициент влияния поверхностного упрочнения. Так как стержень не подвергался никаким технологическим операциям по упрочнению, то $K_v = 1$.

Расчет числа циклов N , при которых происходит усталостное разрушение конструкции

На рисунке 5.9 приведена кривая усталости для гладких образцов из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V [15].

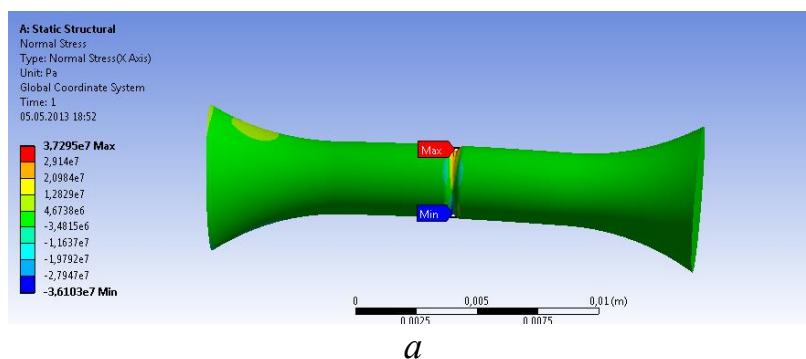


Рисунок 5.9 – Кривая усталости для наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V

По завершению подготовки исходных данных и решения статической задачи проводился расчет усталостной прочности.

Анализ напряженного и деформированного состояния в стержне

В качестве примера на рисунке 5.10 приведены поля напряжений σ_z и деформаций ε_z в стержне с выточкой, возникающих при изгибе силой $F_{\max} = 20,5\text{Н}$.



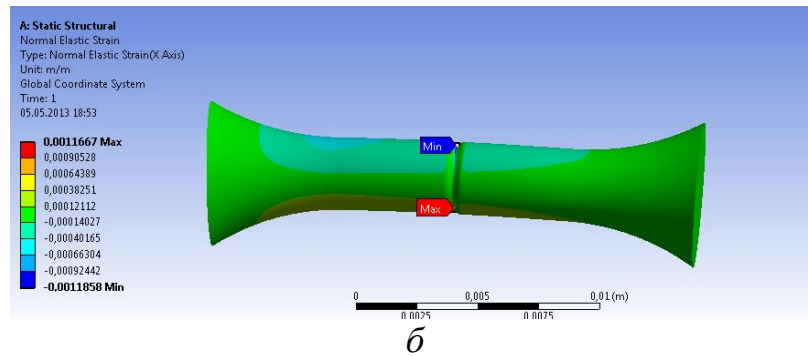


Рисунок 5.10 – Поля осевых напряжений σ_z и деформаций ε_z в рабочей части стержня, возникающих при изгибе

Максимальные растягивающие напряжения возникают на внешних слоях в зоне концентратора $\sigma_z = 372$ МПа, а максимальные сжимающие – на внутренних и равны $\sigma_z = 372$ МПа. Аналогичный характер наблюдается и по деформациям, при этом на внешних слоях ε_z составляет 0,000117, а на внутренних – 0,000118.

Анализ многоциклового усталостной прочности стержня

На рисунке 5.11 приведены кривые усталости для стержня с выточкой из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V, полученные численным решением и экспериментальным путем.

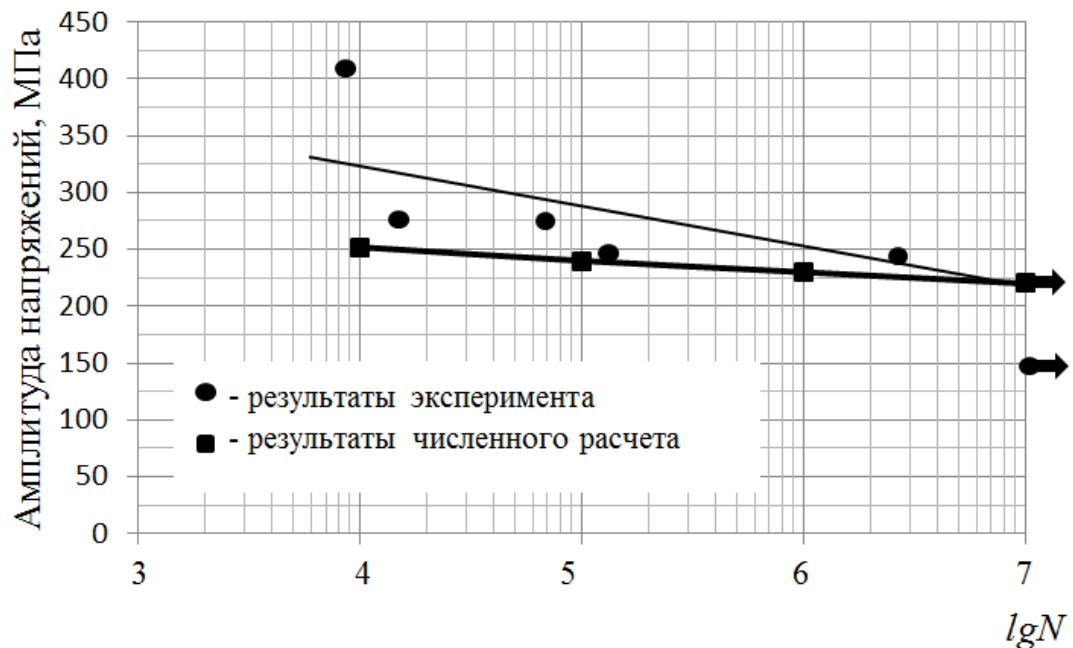


Рисунок 5.11 – Кривая усталости для стержня с выточкой при симметричном изгибе

Анализ результатов численного расчета усталостной прочности стержней с выточкой из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V выявил, что предел выносливости $\sigma_{-1Д}$ соответствует значению $\sigma_{-1Д}^P = 222$ МПа. Экспериментальные исследования усталостной прочности стержней показали, что $\sigma_{-1Д}^Э$ достигает уровня 220 МПа. Таким образом, отклонение расчетных данных от экспериментальных составляет всего 0,9%. Однако, при числе циклов $N = 10^4$ разрушение детали при численном расчете происходит при уровне напряжений цикла в 252 МПа, а при эксперименте – 325 МПа. Отклонение составляет 22,5%. Таким образом, заметим, что при приближении значения амплитуды напряжений к малоцикловой области, разница между результатами численного решения и полученными экспериментальным путем увеличивается. Однако, в пределах многоцикловой области ($N \geq 10^5$), отклонение не превышает 8%.

На рисунке 5.12 показана характеристика напряженного состояния в теле объекта.

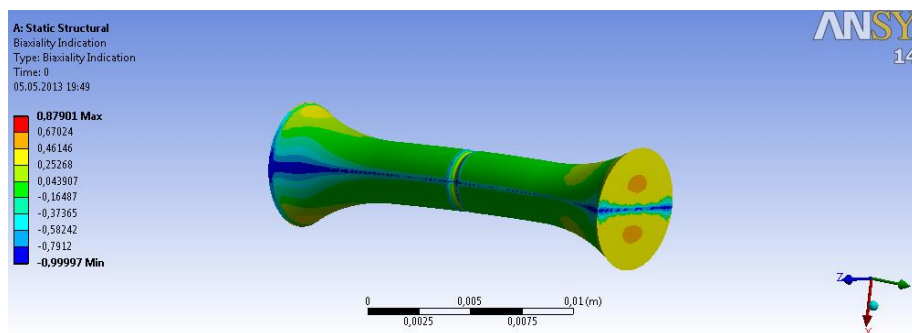


Рисунок 5.12 – Характер напряженного состояния при изгибе стержня

Из рисунка 5.12 видно, что практически во всей конструкции, и в частности, в опасных областях, напряженное состояние соответствует растяжению. Следовательно, использование кривой усталости, полученной в случае циклического изгиба, было корректно.

5.3 Расчет усталостной прочности пластины с отверстием при симметричном циклическом растяжении – сжатии

В данном параграфе была поставлена задача исследования многоцикловой усталостной прочности пластин с отверстием, выполненных из обычного и

наноструктурного титанового сплава, при симметричном цикле одноосного растяжения–сжатия.

Решение статической задачи

На первом этапе проводилось решение статической задачи. Численное решение статической задачи было достигнуто с помощью метода конечных элементов, реализованного с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS [86] в трехмерной постановке.

Физико-механические характеристики материалов, размеры пластин, расчетная схема и метод построения конечно-элементной модели приведены в главе 3. Величина растягивающей нагрузки в пределах полуцикла изменялась в диапазоне от 0 до p .

Приведение объемного напряженного состояния к эквивалентному одноосному

Для приведения рассчитанного объемного напряженного состояния к эквивалентному одноосному, применялась гипотеза пластичности Губера – Мизеса – Генки – потенциальной энергии формоизменения: (*Equivalent (VonMises)*).

Сведение асимметричного цикла напряжений к эквивалентному симметричному

Так как значение нагрузки изменялось по симметричному циклу, то учет асимметрии цикла не требовался.

Корректировка значений эквивалентных амплитудных напряжений для учета конструктивно-технологических факторов

Как отмечалось ранее, учет конструктивно-технологических факторов проводился коэффициентом пересчета предела выносливости K_f .

Чувствительность материала к масштабному фактору и местным напряжениям определялась по следующей формуле:

$$\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} = \frac{2\alpha_{\sigma}}{1 + \left(88,3 \frac{\bar{G}}{L}\right)^{v_{\sigma}}}. \quad (5.28)$$

Градиент напряжений [86]:

$$\bar{G} = \frac{4,6}{d} = \frac{4,6}{10} = 0,46, \quad (5.29)$$

где d – диаметр отверстия в пластине.

Протяженность концентратора L :

$$L = 2\pi R = 2 \times \pi \times 5 = 31,4 \text{ мм}, \quad (5.30)$$

где R – радиус отверстия в пластине.

Учитывая вышеизложенное,

$$\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} = \frac{2\alpha_{\sigma}}{1 + \left(88,3 \frac{\bar{G}}{L}\right)^{v_{\sigma}}} = \frac{2 \times 3}{1 + \left(88,3 \frac{0,46}{31,4}\right)^{0,08}} = 2,97, \quad (5.31)$$

$K_{F\sigma}$ – коэффициент влияния шероховатости поверхности. Рабочая поверхность пластины соответствует ГОСТу 22178-76 [29], $K_{F\sigma} = 0,7$.

K_v – коэффициент влияния поверхностного упрочнения. Так как стержень не подвергался никаким технологическим операциям по упрочнению поверхностного слоя, то $K_v = 1$.

Таким образом, определившись со значениями необходимых коэффициентов, проводился расчет коэффициента пересчета предела выносливости K_f :

$$K_f = K_v / \left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) = 1 / \left(2,97 + \frac{1}{0,7} - 1 \right) = 0,294. \quad (5.32)$$

Расчет числа циклов N , при которых происходит усталостное разрушение конструкции

На рисунке 5.13 приведена кривая усталости для гладких образцов из технического (кривая 1) и наноструктурного (кривая 2) титанового сплава Ti-6Al-4V [15].

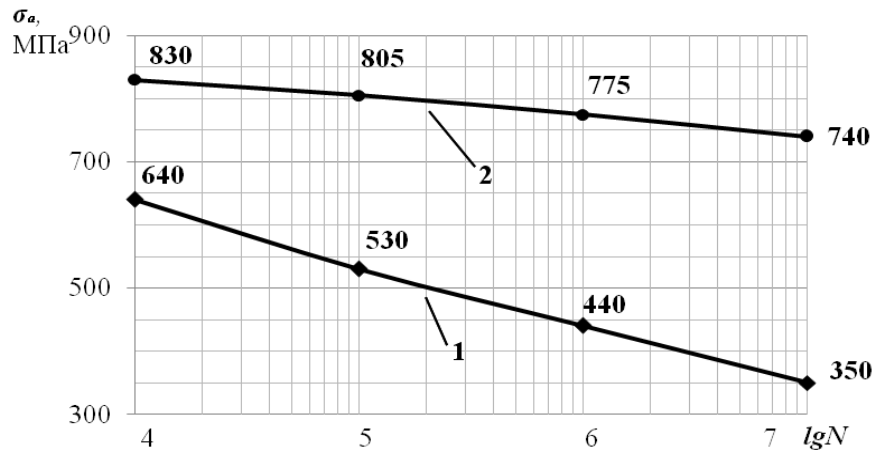


Рисунок 5.13 – Кривая усталости для технического и наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V

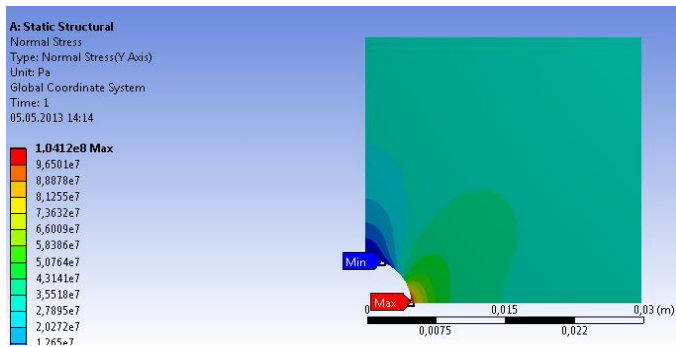
По завершению подготовки исходных данных и решения статической задачи, проводился расчет усталостной прочности.

Анализ напряженного и деформированного состояния

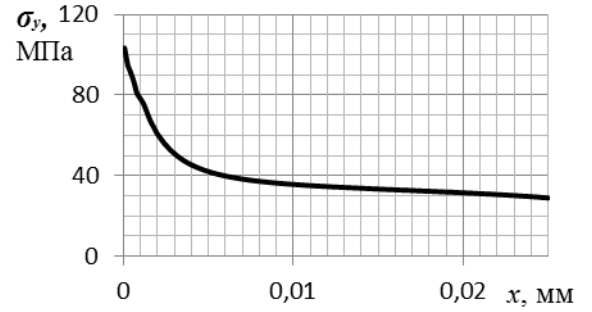
С целью определения кривой усталости была рассчитана усталостная прочность пластин с отверстием при различных значениях растягивающего-сжимающего усилия.

В качестве примера, приведены поля напряжений в пластине с отверстием из обычного титанового сплава Ti-6Al-4V при одноосном растяжении интенсивностью $\sigma_0 = 32$ МПа (рисунок 5.14, а, б) и в пластине из наноструктурного сплава $\sigma_0 = 66,9$ МПа (рисунок 5.14, в, г).

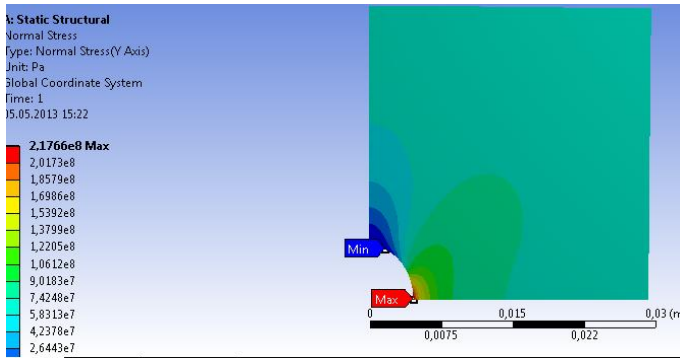
Видно, что в пластине из обычного титанового сплава ВТ6 при растяжении усилием $\sigma_0 = 32$ МПа на кромке отверстия максимальные осевые напряжения достигают уровня $\sigma_y = 104$ МПа (рисунок 5.14, а, б).



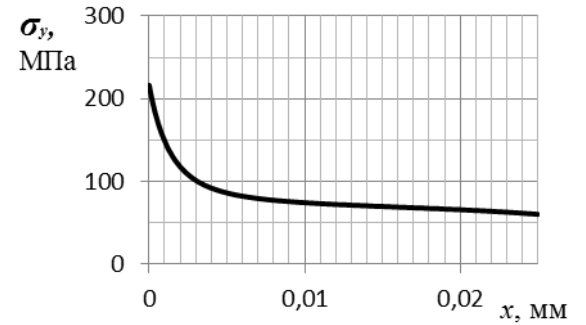
a



б



в



г

Рисунок 5.14 – Поля осевых напряжений σ_y в пластине с отверстием при одноосном растяжении давлением $\sigma_0 = 32$ МПа (а, б) и $\sigma_0 = 66,9$ МПа (в, г)

Аналогичный характер распределения полей напряжений наблюдается при одноосном растяжении пластины из наноструктурного материала. Так, при $\sigma_0 = 66,9$ МПа напряжения σ_y достигают значения 218 МПа (рисунок 5.14 в, г)

Анализ многоциклового усталостной прочности

На основании методики описанной выше, были произведены расчеты по определению многоциклового усталостной прочности пластин с концентратором напряжений при симметричном цикле одноосного растяжения.

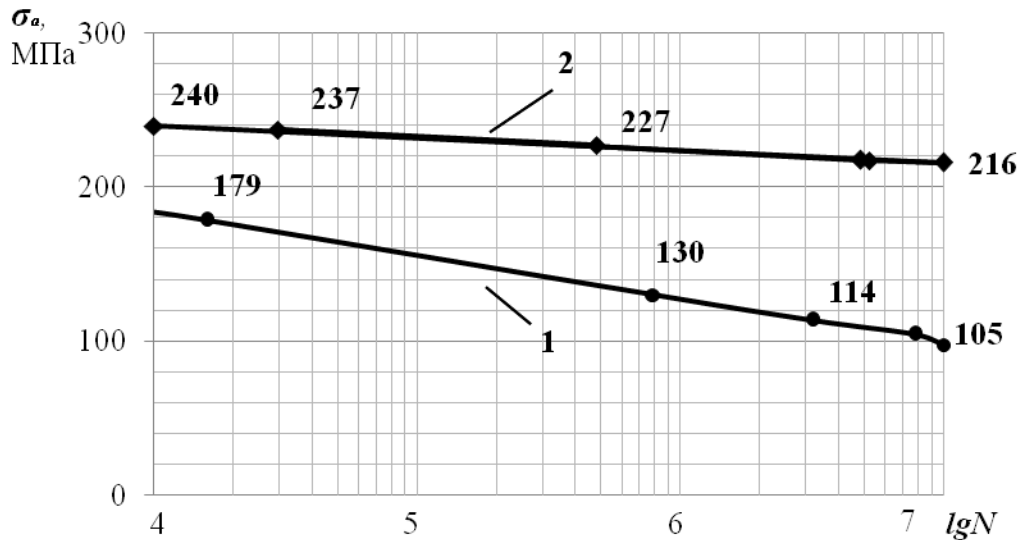


Рисунок 5.15 – Кривая усталости для пластины с отверстием при симметричном одноосном растяжении-сжатии

Исследования усталостной прочности пластины с отверстием при ее симметричном растяжении–сжатии установили, что предел выносливости σ_{-1D} 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 105МПа, 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.

На рисунке 5.16 показана характеристика напряженного состояния. Нулевое значение соответствует одноосному НДС, значение равное -1 – чистому сдвигу, а значение равное 1 – чистому двухосному НДС. Признак двухосных напряжений определяется как меньшее по величине главное напряжение, деленное на самое большое значение главного напряжения, причем главное напряжение близкое к нулю игнорировалось.

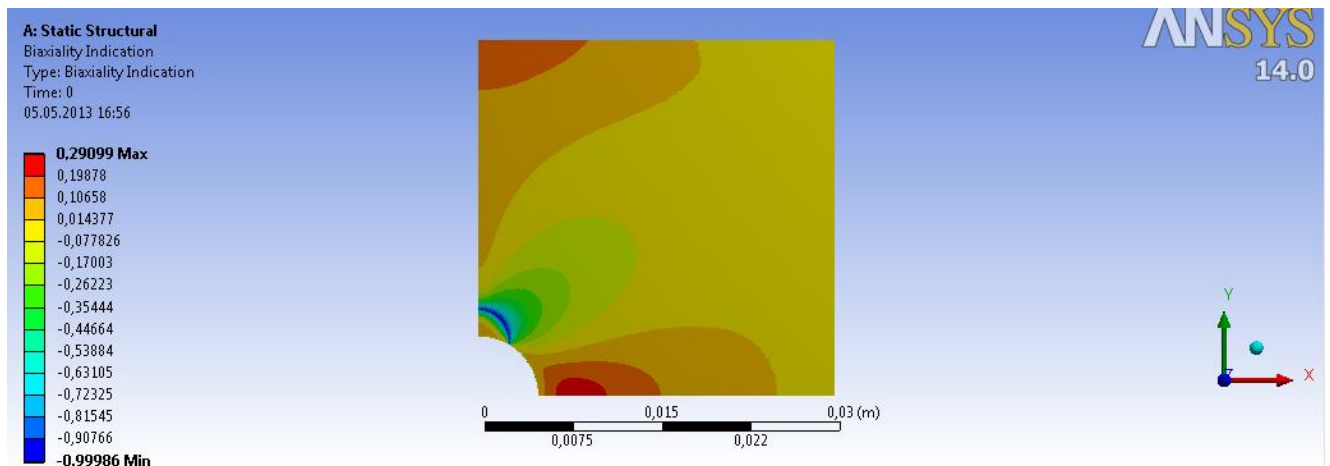


Рисунок 5.16 – Характеристика напряженного состояния при одноосном растяжении

Как видно из рисунка 5.16, основная часть модели работает в условиях одноосного напряженного состояния, но также имеет место чистый сдвиг, который действует в небольшой области. Заметим, что наиболее повреждаемая зона находится в области одноосного растяжения. Следовательно, использование кривой усталости, полученной в случае циклического изгиба, было корректно.

5.4 Экспериментальное исследование усталостной многоциклового прочности элементов конструкций из обычного и наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V

В данном разделе представлены результаты экспериментального исследования усталостной многоциклового прочности элементов конструкций (на примере гладких образцов и стержней с кольцевой канавкой) из обычного и наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V.

Испытания образцов проводились в условиях изгиба с вращением с частотой $f=50$ Гц, при симметричном цикле нагружения и базе испытаний $N_6=10^7$ в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Геометрические размеры образцов и стержней представлены на рис.5.17, а, б. Рабочую поверхность цилиндрических гладких образцов для усталостных испытаний подвергали шлифовке и механической полировке с обеспечением шероховатости Ra 0,63 мкм.

Поверхность канавки образцов полировали до степени шероховатости $Ra\ 0,2\ \mu\text{m}$ [28, 29].

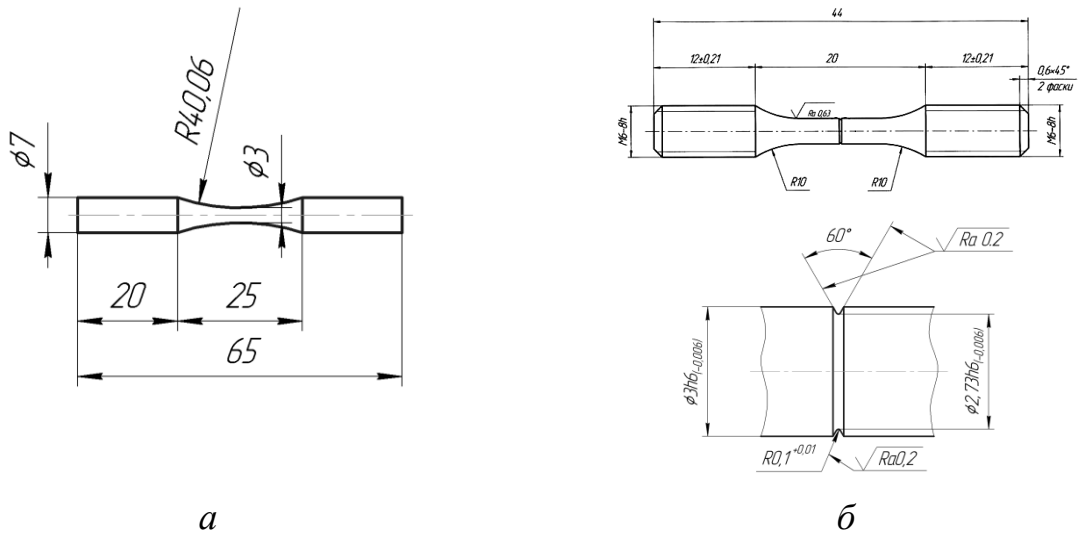
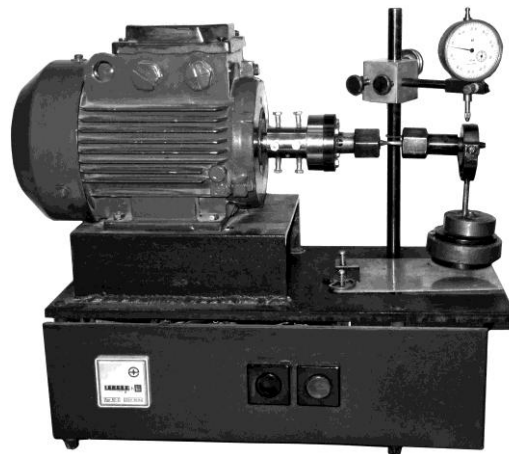
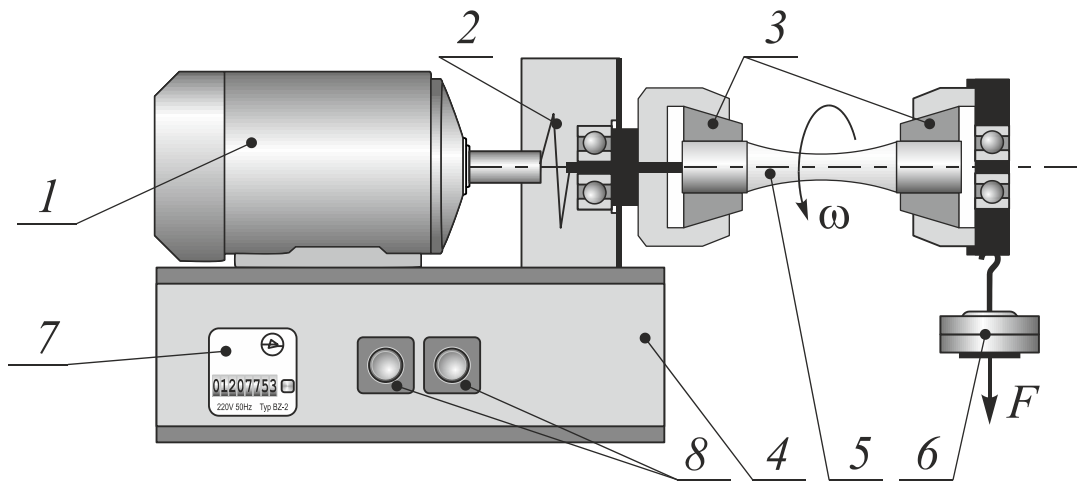


Рисунок 5.17 – Геометрические размеры гладких образцов (а) и стержней с канавкой (б) для усталостных испытаний

Внешний вид и схема установки для консольного изгиба с вращением образцов представлена на рисунке 5.18.



а



б

Рисунок 5.18. – Внешний вид (а) и схема (б) установки для консольного изгиба с вращением: 1 – электродвигатель, 2 – муфта, 3 – цанговые захваты, 4 – станина, 5 - испытуемый образец, 6 – грузы, 7 – счетчик циклов, 8 – кнопки «пуск» и «останов»

На рисунке 5.19 показан график зависимости числа циклов N от амплитуды напряжений в гладких образцах из обычного и наноструктурного титанового сплава. Видно, что предел выносливости титановых образцов после обработки методом РКУП в данном эксперименте увеличился с 600 МПа до 740 МПа.

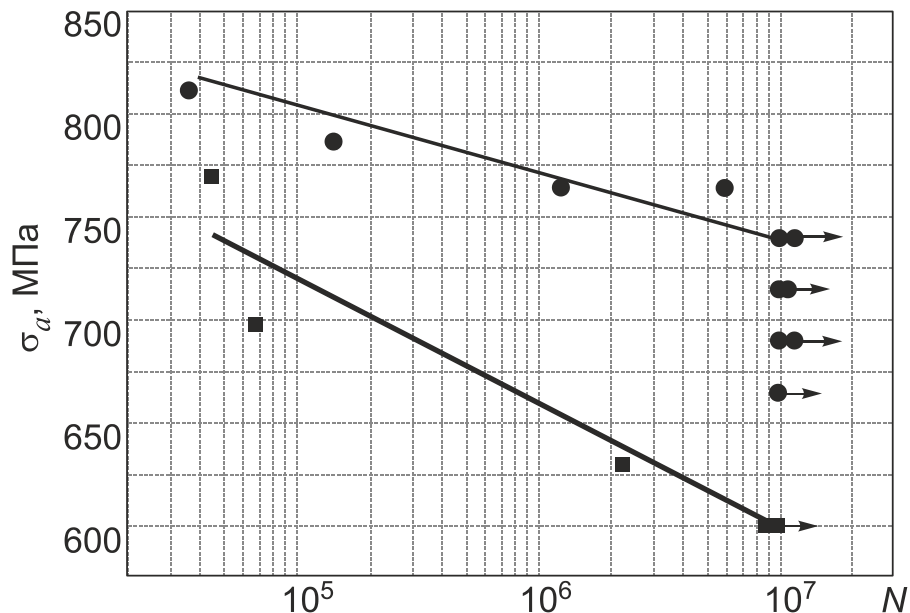


Рисунок 5.19 – Результаты усталостных испытаний гладких образцов из УМЗ Ti-6Al-4V ELI в сравнении его крупнозернистым аналогом после горячей прокатки.

Результаты испытаний стержней с канавкой различной геометрии представлены на рисунке 5.20. α_T – теоретический коэффициент концентраций напряжений, Как было показано ранее, предел выносливости гладких образцов на базе 10^7 циклов составлял 600 МПа. Видно, что стержни с надрезом, имеющие наибольший $\alpha_T=4,4$, выдерживают нагрузку с максимальным напряжением 220 МПа в течение 10^7 циклов. С уменьшением коэффициента концентрации α_T до значения 3,3 максимальное напряжение возросло до 295 МПа.

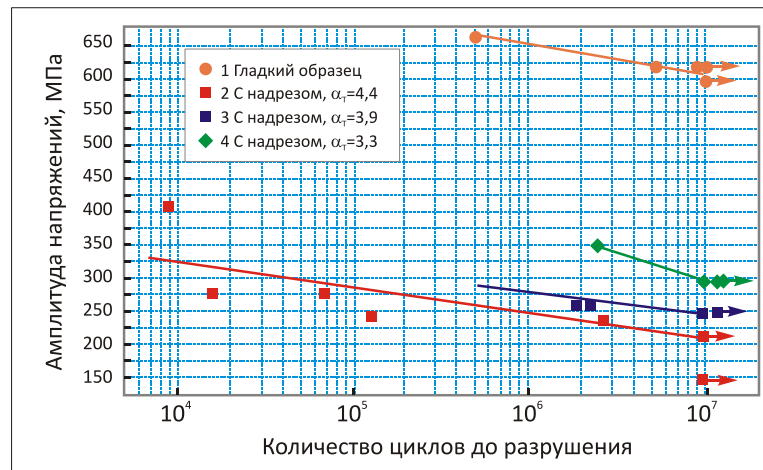


Рисунок 5.20 – Зависимость напряжения от числа циклов напряжения для УМЗ образцов с различной геометрией надреза.

Видно, что наноструктурный титановый сплав имеет повышенную чувствительность к надрезу существенно снижая предел выносливости материала.

Основные выводы по главе 5

1. Проведено исследование усталостной прочности элементов конструкций из объемных наноструктурных материалов при многоцикловом нагружении.

Показано, что решение задачи расчета усталостной прочности основано на анализе напряженного состояния конструкции, сформированного при максимальных значениях внешних нагрузок. При этом, объемное напряженное состояние в теле объекта приводится к эквивалентному одноосному при помощи соотношений, основанных на третьей и четвертой теориях прочности при статическом нагружении. В случае асимметричного цикла изменения напряжений, характеристики данного цикла сводятся к эквивалентному

симметричному, используя соотношения Гудмана, Гербера и Зодерберга. Учет конструктивно-технологических факторов определяется корректировкой значений эквивалентных амплитудных напряжений. По окончании приведения характеристик цикла к эквивалентным, проводится определение числа циклов N , при которых происходит усталостное разрушение.

2. На основании описанной методики рассчитана усталостная прочность стержней с выточкой, выполненных из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V, при циклическом изгибе. Анализ результатов расчета выявил, что предел выносливости σ_{-1D} при базовом числе циклов $N_0 = 10^7$, соответствует значению $\sigma_{-1D}^P = 222$ МПа. Экспериментальные исследования усталостной прочности стержней показали, что $\sigma_{-1D}^Э$ при числе циклов $N_0 = 10^7$ достигает уровня 220 МПа. Таким образом, установлено что отклонение расчетных данных от экспериментальных составляет всего 0,9%. Однако, при числе циклов $N = 10^4$ погрешность составляет 22,5%. Выявлено, что в пределах многоциклового области ($N \geq 10^5$) отклонение не превышает 8%.

3. Исследована многоцикловая усталостная прочность пластин с отверстием, выполненных из обычного титанового сплава Ti-6Al-4V и наноструктурного при симметричном циклическом растяжении-сжатии. Выявлено, что предел выносливости σ_{-1D} при числе циклов $N_0 = 10^7$ для обычного титанового сплава почти в два раза меньше, чем для наноструктурного материала. При этом предел выносливости для пластины из крупнозернистого материала составляет 105 МПа, а предел выносливости для пластины из наноструктурного сплава соответствует значению 216 МПа. При числе циклов $N=10^4$ долговечность пластины из крупнозернистого Ti-6Al-4V достигает уровня 179 МПа, а для наноструктурного титана 240 МПа.

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

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

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. Определенно, 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 σ_{-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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, Д.А. Моделирование процесса гидроформовки методом конечных элементов./ Д.А. Алексеев, М.В. Грязев // Кузнечно - штамповочное производство. Обработка материалов давлением. –2010. – № 9. – С. 6-9.
2. Алымов, М.И. Механические свойства нанокристаллических материалов / М.И. Алымов. – М.: МИФИ, 2004. – 32 с.
3. Алымов, М.И., Зеленский В.А. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов / М.И. Алымов, В.А. Зеленский. – М.: МИФИ, 2005. – 52 с.
4. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы/ Р. А. Андриевский // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И.Менделеева). – 2002. – Т. XLVI, №5. – С. 50-56.
5. Антонов, И.С. Основы расчета резьбовых соединений при ударном и циклическом нагружении: автореф. дис...док.техн. наук: 05.02.02/ И.С. Антонов; КГУ. –Курган: Изд-во УлГТУ, 1999. – 32 с.
6. 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.
7. 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.

8. 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.
9. 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.
10. Балоян, Б.М. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения./ Б.М. Балоян, А.Г. Колмаков, М.И. Алымов, А.М. Кротов. – Москва: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», филиал «Угреша», 2007. –124 с.
11. Безухов, Н.И. Теория упругости и пластичности / Н.И.Безухов. – Ленинград: тип-я Союзполиграфпром,1953 – 420 с.
12. Березин, И.Я., Чернявский О.Ф. Сопротивление материалов. Усталостное разрушение металлов и расчеты на прочность и долговечность при переменных напряжениях: Учебное пособие/ Под общей редакцией О.Ф. Чернявского. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 47 с.
13. Берендеев, Н.Н. Методы решения задач усталости в пакете Ansys Workbench: Учебно-методическое пособие / Н.Н. Берендеев. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 64 с.
14. Берендеев, Н.Н. Применение системы Ansys к оценке усталостной долговечности. Учебно – методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы в исследованиях и разработках информационно – телекоммуникационных систем и технологий» / Н.Н. Берендеев. – Нижний Новгород, 2006. – 83 с.

15. Биргер, И.А. Некоторые общие методы решения задач теории пластичности/ И.А. Биргер // Прикладная математика и механики. – 1951. – Т. 15, вып. 6 – С. 765-770.
16. Биргер, И.А. Общие алгоритмы решения задач упругости, пластичности и ползучести/ И.А. Биргер // Успехи механики деформируемых тел. Сб. статей. – М.: Наука, 1975.
17. Биргер, И.А. Прочность и надежность машиностроительных конструкций: Избранные труды. / И.А. Биргер. – Уфа, 1998. – 350 с.
18. Будник, О.Ю. Механическая прочность электроизолирующих соединений трубопроводов производства ТМС ГРУПП / О.Ю. Будник, Р.М. Шаммасов, С.Ю. Князев, А.С. Жуковский // Нефтегазовая Вертикаль. – 2012. – №9. – С. 56-57.
19. Валиев, Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В.Александров. – М. : ФЦП «Интеграция», Логос, 2000. – 272 с.
20. Валиев, Р.З., Александров, И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. – 398 с.
21. Валиев, Р.З., Александров, И.В. Парадокс интенсивной пластической деформации / Р.З.Валиев, И.В.Александров // ДАН РФ. Сер. "Техническая физика". – 2001. – Т. 380, № 1. – С. 34 – 37.
22. Вишняков, Н.А. Остаточные напряжения в элементах конструкций при статическом и циклическом нагружении/ Вишняков, Н.А. и [др.] // Вестник машиностроения. – 1981. – №9. – С. 34-39.
23. Гидропластическая обработка металлов / К.Н. Богоявленский, В.А. Вагин, А.Н. Кобышев и [др.]. – Ленинград: Машиностроение; София: Техника, 1988. – 253 с.
24. Горелик, С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С.С. Горелик, С.В. Добаткин, Л.М. Капуткина.–М.: МИСИС, 2005. – 432 с.

25. Горынин, И.В. Исследования и разработки ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в области конструкционных наноматериалов/ И.В. Горынин //Российские нанотехнологии. Исследования и разработки. – 2007. – Т.2. №3 – 4. – С. 36-57.
26. ГОСТ 22178-76. Листы из титана и титановых сплавов. Технические условия. – Введ. 1978–01–07– М. : Изд-во стандартов, 19878. – 16 с.
27. ГОСТ 23.207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 48 с.
28. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытания на усталость. – Введ. 1981–01–01– М. : Изд-во стандартов, 1979.
29. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. – Введ. 1983–01–07 – М: Издательство стандартов, 1983.
30. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1960. – Т2.
31. Давиденков, Н.Н. К итогам дискуссии о классификации и проявлении остаточных напряжений / Н.Н. Давиденко // Заводская лаборатория. – 1960. – №7. – С. 861 – 862.
32. Ермоленко, А.Н. Прочность деталей из объемных наноматериалов при равноканальном угловом прессовании: автореф. дис...к. тех. наук: 01.02.06 / А.Н. Ермоленко; Уфимск.гос.авиационн.техн.ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2009.– 16с.
33. Жернаков, В.С. Влияние напряженно-деформированного состояния деталей из объемных наноматериалов на усталостную прочность/ В. С. Жернаков, И.П. Семенова, А.Н. Ермоленко//Вестник УГАТУ. – 2009. – Т.12, № 2(31). – С. 62 – 68.

34. 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.
35. 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.
36. Жернаков, В.С. Ресурс и надежность резьбовых соединений / В.С. Жернаков, Е.Н. Петров, Р.Г Якупов. – М.: Машиностроение, 2003 – 292с.
37. Жернаков, В.С. Сопротивление материалов и конструкций: учебник/ В.С. Жернаков; Уфимск.гос.авиационн.техн.ун-т. – Уфа:УГАТУ, 2012. – 495с.
38. Жернаков, В.С., Будилов, И.А. Сопротивление разрушению элементов разъемных соединений высоконагруженных конструкций / В.С. Жернаков, И.А. Будилов.– М.: Наука, 2000. – 240 с.
39. 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.
40. Зайдес, С.А. Технологическая механика осесимметричного деформирования / С.А. Зайдес, А.Н. Исаев. – Иркутск, 2007. – 432 с.
41. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / Пер.с англ. – Москва: Мир, 1975. – 542 с.
42. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов/ Ю.Р. Колобов, Р.З. Валиев, Г.П. Грабовецкая, и [др.]; Новосибирск: Наука, 2001. – 232 с.

43. Иванов, Д.В. Прогнозирование предела выносливости упрочненных деталей с концентраторами напряжений при нормальной температуре и в условиях ползучести: автореф. дис...кан. тех. наук: 01.02.06 / Д.В. Иванов; СГАУ им. С.П.Королева. – Самара.:изд-во СГАУ, 2009. – 16 с.
44. Инженерный анализ в Ansys Workbench: учеб. пособие / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова и [др.]; Сам.гос.ун-т. – Самара: СамГУ, 2010. – 271 с.
45. Инжиниринговая компания ТЕСИС DEFORM Режим доступа: <http://www.thesis.com.ru/software/deform/> (дата обращения 14.10.2013).
46. Каменецкий, Б.И. Современный уровень развития технологий гидроформовки за рубежом /Б.И. Каменецкий, А.И. Резер, А.А. Богатов// Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2004. – № 7. – С. 27-35.
47. Кирпичев, В.А. Остаточные напряжения в детали при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.А. Кирпичев, О.Ю. Семенова, Е.А. Денискина // Высокие технологии в машиностроении. – Ч.1 – Самара, 2009. – С.118 – 120.
48. Кирпичев, В.А. Разработка научных методов прогнозирования сопротивления усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений: автореф. дис...док. тех. наук: 01.02.06 / В.А. Кирпичев, СГАУ. – Самара, 2009. – 36 с.
49. Кузнецова, Е.В. Остаточные напряжения и технологическая прочность осесимметричных металлоизделий, полученных пластическим деформированием: дис...кандидата технических наук: 01.02.04 / Е.В. Кузнецова. – Пермь, 2002. –154 с.

50. Колмогоров, Г.Л. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий / Г.Л. Колмогоров. – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического ун-та, 2012. – 224 с.
51. Колмогоров, Г.Л., Кузнецова Е.В. Остаточные напряжения и потенциальная энергия при изготовлении трубных заготовок/ Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова Е.В. // Известия вузов. Черная металлургия.– 2001.– № 2.– С. 19 – 21.
52. Кочанов, Д.И. Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения: состояние и перспективы применения / Д.И. Кочанов// РИТМ . – 2010. – 16 с.
53. Крижановский, В.И. Оценка предельного состояния конструкционных сталей при асимметричном многоцикловом нагружении растяжением-сжатием, изгибом и кручением./ В.И. Крижановский, В.В. Касперская, А.Д. Погребняк // Проблемы прочности. – 2008. – №5(395). – С.81–88.
54. Лякишев, Н.П. Объемные наноматериалы конструкционного назначения/ Н.П. Лякишев, М.И. Алымов, С.В. Добаткин, // Металлы. – 2003. – № 3. – С. 3-16.
55. Мавлютов, Р.Р. Концентрация напряжений в элементах конструкций/ Р.Р. Мавлютов. – Москва: Наука, 1996. – 240 с.
56. Мавлютов, Р.Р. Остаточные напряжения в элементах конструкций/ Мавлютов Р.Р., В.С. Куликов, Мардимасова Т.Н. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, Институт механики УНЦ РАН, 2000. –116с.
57. Мавлютов, Р.Р. Остаточные напряжения и деформации при упрочнении отверстий / Р.Р. Мавлютов, Т.Н. Мардимасова, В.С. Куликов // Прочность конструкций. – 1996. – С. 90-97.
58. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: «Машиностроение», 1968. – 400 с.

59. Матвеев, А.С., Халатов Е.М., Конанков С.В. Исследование процесса гидроштамповки тройников/ А.С. Матвеев, Е.М. Халатов, С.В. Конанков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 12. – С. 10 – 18.
60. Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. Ч.1. Критерии прочности и ресурса./ Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 494 с.
61. Митюшников, В.А., Сунагатов, М.Ф., Шафиков, Р.Р. Оценка возможности получения равнопрочного соединения труб методом обжатия/ В.А. Митюшников, М.Ф. Сунагатов, Р.Р. Шафиков, // Территория нефтегаз . – 2011. – № 10. – С. 56 – 61.
62. Михайлов, О.Н. Остаточные напряжения в заготовках и деталях крупных машин / Михайлов О.Н. – Свердловск: НИИТЯЖМАШ Уралмашзавод. – 1971.
63. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем/ С.В. Доронин и [др.]. – Новосибирск: Наука, 2005. – 250 с.
64. Москвитин, В.В. Пластичность при переменных нагружениях. / В.В. Москвитин. – М.: Изд-во Московского гос. ун-та, 1965. – 263 с.
65. Нихамкин, М.Ш. Влияние объемных остаточных напряжений на усталостную прочность и трещиностойкость лопаток ГТД./ М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, И.П. Конев // Вестник ПГТУ. Аэрокосмическая техника №24. – 2006. – С. 5-11.
66. Новиков, Л.С. Перспективы применения наноматериалов в космической технике. Учебное пособие / Л.С. Новиков, Е.Н. Воронина – М.: Университетская книга, 2008. – 188 с.
67. Новожилов, В.В. Микронапряжения в конструкционных материалах / В.В. Новожилов, Ю.И. Кадашевич.— Л.: Машиностроение, 1990.—223 с.

68. Огородникова, О.М. Введение в компьютерный конструкционный анализ: Учебно-методическое пособие. / О.М. Огородникова; УГТУ-УПИ. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 50 с.
69. Окопный, Ю.А. Механика материалов и конструкций: Учебник для вузов / Ю.А.Окопный, В.П. Радин, В.П. Чирков. – М.:Машиностроение, 2001. – 408 с.
70. ОСТ 1.12923-77. Законцовки трубопроводов, деформированные. Конструкция и размеры. – Введ.1979-01-01.
71. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Чернышев Г.Н и [др.]. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 240 с.
72. Отчет №34-03/455-06 по результатам выполненных работ по определению негерметичности фторопластового рукава 8Д0.447.091-42 линии всасывания гидросистемы самолета ИЛ-96-300ПУ(М) от 22.12.2006.
73. Павленкова, Е.В. Числовые методы экспериментально-теоретического анализа больших деформаций элементов конструкций и определения параметров математических моделей упругопластических материалов: учебно-методическое пособие / Е.В. Павленкова, Д.В. Жегалов. – Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2012. – 101 с.
74. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям: моногр. / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичев, В.С. Вакалюк. – Самара: «Издательство СНЦ РАН», 2012. – 125 с.
75. Перспективные разработки ВИАМ в области наноматериалов и нанотехнологий/ Е.Б. Чабина, Г.А. Морозов, А.Н. Луценко, С.Ю. Скрипачев, // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – №6. – С. 9 – 16.
76. Поздеев, А.А. Остаточные напряжения: теория и приложение / А.А. Поздеев, Ю.И. Няшин, П.В. Трусов. – М.: 1982 г.

77. Поздей, А.В. Технологические остаточные напряжения/ А.В. Поздей. – М.: 1973.
78. Похмурский, В.И. Коррозионно-усталостная прочность сталей и методы ее повышения / В.И. Похмурский. – Киев: Наукова думка, 1974. – 184 с.
79. Проскуряков, Ю.Г. Объемное дорнование отверстий/ Ю.Г. Проскуряков, В.Н. Романов, А.Н. Исаев. – Москва: Машиностроение, 1984. –224 с.
80. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов/ Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
81. Серенсен, С.В., Когаев, В.П., Шнейдерович, Р.Н. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность./ С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.Н. Шнейдерович – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
82. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные методы расчета операций пластической обработки материалов / Г.А. Смирнов-Аляев. – Москва: Машгиз, 1961. – 464 с.
83. Справочник по сопротивлению материалов./ Г.С. Писаренко и [др.] – Киев: Наукова Думка, 1975. – 704 с.
84. Терентьев, В.Ф. Циклическая прочность субмикро– и нанокристаллических металлов и сплавов / В.Ф. Терентьев // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – №1. – С. 8 – 24.
85. Терентьев, В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. Пособие / В.Ф.Терентьев, А.А. Оксогоев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
86. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей/ С.И. Иванов и [др.].– М.: КуАИ, 1992. – 192 с.

87. Технология выполнения высокоресурсных соединений/В.Ф. Пширков и [др.]. – Москва: Технический прогресс и повышение квалификации, 1980. –170с.
88. Трощенко, В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении.– Киев: Наукова Думка, 1981.– 343 с.
89. Фаддеев, М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента / М.А. Фаддеев. – Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2010. – 122 с.
90. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов. В 2 частях./ Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 2ч., 1974. – 308 с.
91. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов. В 2 частях./ Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1ч., 1974. – 472 с.
92. Чернышев, Г.Н. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах./ Г.Н. Чернышев и [др.] – М.: Наука, 1996. – 240 с.
93. [Электронный ресурс] URL: [http:// http://www.cae-club.ru](http://www.cae-club.ru).
94. [Электронный ресурс].URL: <http://skyfly.on.ufanet.ru/elpoms/25SMC.HTM>
95. Ansys, Inc. Theory Reference./ Edited by P.Kohnke Canonsburg, 2004.– Режим доступа: <http://www.ansys.com>.
96. Boehm, L. Nano-materials for aerospace and security applications. Israel Aircraft Industries/ L. Boehm.–2006. – Режим доступа: <http://www.ariel.ac.il/sites/conf/mmt/WS2006/Papers/004/.doc>.
97. Daniewicz, S.R., Collins J.A., Houser D.R. The stress intensity factor and stiffness for a cracked spur gear tooth/ S.R. Daniewicz, J.A. Collins, D.R. Houser// Fatigue. –1994.–№ 16. – P. 123–133.
98. DEFORM 3D V. 10.1 System Documentation, Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC), 2545 Farmers Drive Suite 200 Columbus, Ohio 43235.

99. Dexter, J. Aircraft nanocomposites that provide early warning system for structural failures/ J. Dexter. – 2011. Режим доступа: <http://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/nanotechnology/aircraft-nanocomposites-that-provide-early-warning-system-for-structural-failures>.
100. Doege, E. Measurement and calculation of residual stresses after die forging Text. / E. Doege, H.P. Hougardy, A. Lubbe, Erhard Schultchen // Steel Res., 1996. – Vol. 67, No. 2. – P. 52-58.
101. Fischer, E.E. Paul, E. MEMS fatigue testing to study nanoscale material response / E.E. Fischer, E. Paul – 2003. – Режим доступа: <http://clifton.mech.northwestern.edu/~me382/docu/SEM166.pdf>.
102. Hanlon, T. Fatigue behavior of nanocrystalline metals and alloys / T. Hanlon, E.D. Tabachnikova, S. Surech // International Journal of Fatigue.– 2005.– P. 1147–1158.
103. High strength nanocrystallized multilayered structure obtained SMAT and CO-ROLLING/ L. Waltz¹, D. Reintant¹, A. Roos¹ [and etc.]/Materials Science Forum. – 2009. – №614.– P.249 – 254.
104. Kwan, C-T. Investigation of T-Shape tube hydroforming with Finite Element Method / C.-T. Kwan, F.-C. Lin // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2003. – № 21(6). – P.420-425.
105. Kwan, C-T. Investigation of T-Shape tube hydroforming with Finite Element Method/C.-T. Kwan, F.-C. Lin // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2003. – № 21(6). – P.420-425.
106. Laamouri, A. Sidhom, S. Braham, C. Evaluation of residual stress relaxation and its effect on fatigue strength of AISI 316L stainless steel ground surfaces: Experimental and numerical approaches/ A. Laamouri, S. Sidhom, C. Braham // International Journal of Fatigue. – 2013. – P.109 – 121.

107. Lammi, J. Lados, D. Effects of processing residual stresses on fatigue crack growth behavior of structural materials: Experimental approaches and microstructural mechanisms/ J. Lammi, D. Lados. //Metallurgical and materials transactions A-Physical metallurgy and materials science. – 2012. – № 43A(1). – P.87-107.
108. Matthias, F.F. Microstructural stability of nanostructured fcc metals during cyclic deformation and fatigue/ F.F. Matthias. – Karlsruhe : SIAM, Karlsruhe Institut für Technologie, 2012. – 190 p.
109. Moaveni, S. Finite element analysis. Theory and application with ANSYS/ S Moaveni. – Pearson, 2008. – 527p.
110. Nelson, D.V. Residual Stress effects in Fatigue/ D.V. Nelson: // H.S. Reemsnyder and J.F. Throop, eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. – 1982. – P. 172 – 194.
111. Nowell, D. Dini, D. Duó, P. Stress analysis of V-notches with and without cracks, with application to foreign object damage/ D. Nowell, D. Dini, P. Duó // Jnl Strain Analysis. – 2003. – P.429 – 441.
112. Parker, A.P. Residual stress effects in fatigue/ A.P. Parker: // vol. 776, H.S. Reemsnyder and J.F. Throop, eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. –1982. – P. 13 – 31.
113. Rajenthirakumar, D. The FEM simulation of tube hydroforming (THF) of the super alloy/ D. Rajenthirakumar, G. Chandramonah, P.R. Thyla // International journal of engineering. – 2010. – T. VIII. – P.33 – 36.
114. Rolanda, T. Enhanced mechanical behavior of a nanocrystallised stainless steel and its thermal stability/T. Rolanda, D. Retraint, K. Lub, J. Luc // Materials Science and Engineering A. – 2007. – P. 281 – 288.
115. Study of residual stress in surface nanostructured AISI 316L stainless steel using two mechanical methods / M. Ya, Y. Xing, F. Dai and [etc.] // Surface and Coatings Technology. – 2003. – P.148 – 155.

116. Thompson, S.R., Ruschau J.J., Nicholas T. Effect of foreign damage on the high cycle fatigue strength of Ti-6Al-4V. / S.R. Thompson, J.J. Ruschau, T .Nicholas // Materials Science and Engineering. – 2002. – №1.– P. 465-477.
117. Vangi, D. Residual stress evaluation by the hole-drilling method with off-center hole: An extension of the integral method Text. / Dario Vangi // Trans. ASME. J. Eng. Mater, and Technol., 1997. – Vol. 119, No. 1. – P. 79-85.