

**Любченко Михаил Алексеевич**

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
РЕЗЬБОВОЙ ПАРЫ ИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО АРМИРОВАННЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре основ конструирования машин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Захаров Михаил Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой основ конструирования машин  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Евдокимов Алексей Петрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник отдела «Прочность,  
живучесть и безопасность машин» Института ма-  
шиноведения им. А.А. Благонравова Российской  
академии наук (ИМАШ РАН)

**Степашкин Андрей Александрович**,  
кандидат технических наук, старший научный  
сотрудник Научно-исследовательского центра ком-  
позиционных материалов (НИЦ КМ). Националь-  
ный исследовательский технический университет  
«МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

Ведущая организация: **АО «ЦНИИСМ» (Центральный научно-  
исследовательский институт специального ма-  
шиностроения)**


Защита состоится « 01 » июля 2019 г. в 14.30 часов на заседании диссертационно-  
го совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете  
им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учрежде-  
ния, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1,  
ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на  
официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
Д.Т.Н., доцент



В.А. Горелов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Специфика эксплуатации ряда современных изделий из композиционных материалов (КМ), связанная с работой в условиях высоких температур, диктует необходимость использования в них резьбовых деталей, также изготовленных из композитов, способных функционировать при больших термодинамических нагрузках. Одним из таких материалов является углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), способные сохранять свою работоспособность при температурах свыше 3000 °С.

Основные принципы конструирования и методы расчета резьбовых соединений были заложены Н.Е. Жуковским и получили развитие в трудах известных отечественных ученых И.А. Биргера, Г.Б. Иосилевича, Д.Н. Решетова и других.

Однако, стандартные крепежные детали резьбовой пары (винт - гайка), изготовленные из УУКМ, не могут быть подобраны или рассчитаны на основе классических подходов, используемых для металлических изделий, так как характер разрушения и напряженное состояние резьбовой пары из КМ принципиально отличны от разрушения и напряженного состояния в металлической винтовой паре.

В связи с этим современные исследования ведутся в направлении определения оптимальных параметров резьбы, наносимой механическим способом на готовый стержень из УУКМ с уже сформированным армирующим каркасом, при которых вред прочностным характеристикам материала за счет перерезания армирующих волокон будет минимизирован. При этом эффект подрезанных нитей в профиле витка приводит к необходимости учета структуры армирования УУКМ при механическом изготовлении резьбы.

Основные достижения структурной теории КМ за рубежом связаны с именами Z. Hashin, B. Rosen, R. Hill. В нашей стране вопросами поведения композитов с учетом их структуры занимались Г.А. Ван Фо Фы, Ю.М. Тарнопольский, А.М. Скудра, а также известны работы научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана, АО «Композит», АО «ЦНИИСМ», АО «НИИграфит», АО «УНИИКМ» и других.

В настоящее время, однако, отсутствуют общепринятые методики оценки прочности резьбовой пары из КМ и методы её выбора для заданных нагрузок. Результаты исследований в этой области достаточно ограничены и в ряде случаев противоречивы. При возникновении подобных задач часто используют методы выбора резьбы, разработанные для других классов материалов, без проверки корректности такого расширения области их применения, либо подбирают параметры резьбы эмпирически, проводя значительное количество экспериментов.

В связи с этим тема представленной работы, которая посвящена созданию методики оценки несущей способности резьбовой пары из пространственно армированных композиционных материалов, является актуальной и практически значимой.

**Цель работы** - обеспечение несущей способности резьбовой пары из пространственно армированных углерод-углеродных композиционных материалов.

**Задачи исследования,** поставленные и решенные для достижения данной цели:

1. Проведение комплексного анализа специфики соединения деталей из КМ.
2. Выполнение экспериментальных исследований несущей способности резьбовых пар из пространственно армированного УУКМ для получения зависимости

распределения нагрузки по виткам резьбы, а также зависимости несущей способности соединения от шага и диаметра резьбы.

3. Опытное исследование влияния масштабного эффекта на прочностные характеристики УУКМ со схемой армирования 4ДЛ при стандартных схемах испытаний.

4. Определение критерия разрушения резьбовых пар из УУКМ со схемой армирования 4ДЛ на базе результатов компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и прочностных характеристиках материала, определенных по стандартным схемам испытаний.

5. Разработка методики оценки несущей способности резьбовой пары из КМ.

**Научная новизна** настоящей работы отражается в следующих ключевых результатах проведенных исследований:

1. Получены новые экспериментальные данные о характере разрушения и несущей способности резьбовой пары из пространственно армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ.

2. Для УУКМ со схемой армирования 4ДЛ получены новые экспериментальные данные о величине масштабного эффекта прочности при срезе на характерных размерах профиля резьбы.

3. Предложена расчетная схема МКЭ для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) в момент разрушения резьбовой пары и алгоритма анализа НДС, особенностью которых является последовательность осреднения напряжений по линии среза витка.

4. Предложено условие прочности резьбовой пары из пространственно армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ, особенностью которого является использование в качестве критерия разрушения максимальных осреднённых напряжений среза на первом витке, а за критическое значение приняты напряжения среза с учетом влияния масштабного эффекта прочности.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и результатов базируются на теоретических и экспериментальных исследованиях резьбовых пар из пространственно армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ, а также на использовании апробированных методов математического моделирования и теории планирования эксперимента.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Разработанная методика оценки несущей способности резьбовой пары из пространственно армированного КМ может быть использована на стадии проектирования резьбового соединения из КМ.

2. Предложенный критерий разрушения резьбовой пары из УУКМ со схемой армирования 4ДЛ предназначен для выполнения проверочных расчетов на прочность термонагруженных узлов из УУКМ.

3. Общий инженерный подход, выработанный для исследования резьбовых пар из КМ, позволяет сократить количество необходимых испытаний при разработке резьбовых элементов деталей из композитов.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы используются при выполнении научных и конструкторских работ в АО «Композит». Результаты работы применены при проектировании образцов с резьбовой захватной частью для высокотемпературных испытаний в АО «Композит», что подтверждено актом. Полученные ре-

зультаты используются в учебном процессе на кафедре основ конструирования машин в МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено соответствующей справкой.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: молодежной конференции «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике». Королев (МО). 2015; Всероссийской научно-технической конференции «Механика и математическое моделирование в технике». Москва. 2017; III Всероссийской научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники». Москва. 2017; научных чтениях имени члена-корреспондента РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов». Москва. 2018.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных работах, в число которых входят 6 научных статей из журналов, рекомендованных ВАК РФ, и 4 - материалы научных конференций, общим объемом 1,7 п.л.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов по работе, списка сокращений, списка литературы из 111 наименований. Работа изложена на 126 листах машинного текста, содержит 66 рисунков и 22 таблицы.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Новые экспериментальные данные о механическом поведении резбовой пары из пространственно армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ.
2. Результаты экспериментального исследования для УУКМ со схемой армирования 4ДЛ по изучению масштабного эффекта прочности при срезе.
3. Критерий разрушения резбовой пары из пространственно армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ.
4. Методика оценки несущей способности резбовой пары из пространственно армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** отмечена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведена научная новизна и практическая значимость исследований.

**В первой главе** проведен комплексный анализ специфики соединения деталей из КМ.

Для разработки резбового крепежа в области высоких температур перспективным направлением представляется изготовление резбовой пары из теплозащитных материалов, примером которых могут служить углерод-углеродные композиционные материалы.

В данной работе в качестве материала для исследования резбовых пар из композиционных материалов был выбран пространственно армированный УУКМ на основе стержневого каркаса со схемой армирования 4ДЛ (Рисунок 1) и характерным поперечным размером армирующего элемента (стержня) 0,7 мм. Матрица материала представляет собой кокс каменноугольного пека. Материал изготавливался путем многократной пекопропитки с последующей карбонизацией и графитацией до конечной плотности 1950 кг/м<sup>3</sup>.



Отдельные элементы резьбовых деталей из УУКМ в настоящее время изготавливают АО «УНИИКМ», АО «ЦНИИСМ», АО «НИИграфит», АО «Композит», ООО НПО «ГКМП», ООО «НИАГАРА» и другие, однако нет единого стандарта и

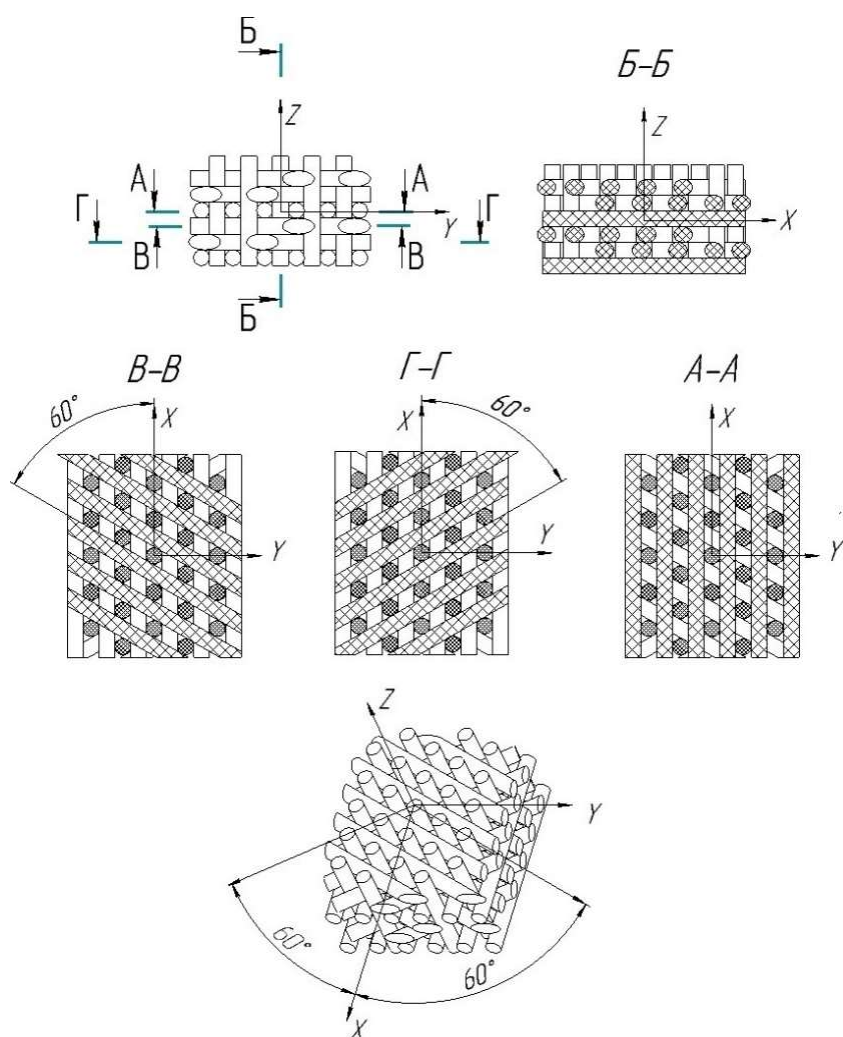


Рисунок 1. Структура каркаса и основные направления материала схемы армирования 4ДЛ

Кроме того, на основании проведенного анализа литературных данных можно говорить, что существует тенденция к увеличению доли композитов в элементах и узлах соединения конструкций из КМ.

**Вторая глава** посвящена выбору и подготовке образцов для исследований, испытаниям образцов на разрыв, статистическому анализу результатов экспериментов, анализу диаграмм разрушения соединения и определению характера разрушения резьбы.

Исследование несущей способности резьбовой пары из УУКМ со схемой армирования 4ДЛ от направления вырезки проводилось на резьбе М16. Образцы вырезались из материала вдоль направлений осей  $X$  и  $Z$ . Несущая способность резьбовой пары определялась в зависимости от количества витков в соединении. Рассматривалось следующее число витков в соединении:  $n_b=2,3,4,6$ . Схема нагружения в эксперименте приведена на Рисунке 2.

Результаты механических испытаний представлены в Таблице 1.

подхода к изготовлению крепежных деталей и оценке несущей способности резьбовых соединений из КМ при проектировании конструкции.

Обзор публикаций по теме диссертации позволяет сформулировать проблемы оценки прочности резьбовых соединений из КМ:

- отсутствие зависимостей несущей способности резьбовых пар из КМ от параметров резьбы (шаг, диаметр, число витков в соединении);
- отсутствие имитационной модели поведения резьбовой пары из композита под нагрузкой, учитывающей особенности КМ;
- отсутствие методов исследования резьбовых соединений из КМ;
- отсутствие рекомендаций по проектированию и расчету резьбовых узлов в конструкциях из КМ.

В результате анализа Таблицы 1 и статистической обработки результатов, можно сделать вывод, что резьбовые пары, вырезанные в направлении  $X$ , показали прочность на разрыв выше винтовых пар, вырезанных в направлении  $Z$ .

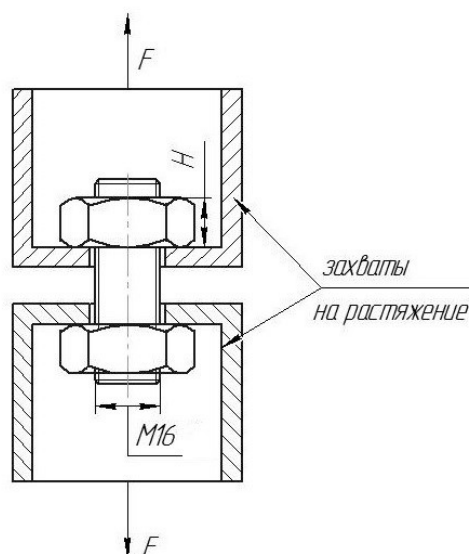


Рисунок 2. Схема нагружения в эксперименте

Таблица 1.  
Несущая способность резьбовой пары из УУКМ  
в зависимости от направления вырезки

$n_v$	$P_{cp} \pm \text{ДИ}^*, \text{ Н}$	
	Направление $X$	Направление $Z$
2	$2181 \pm 500$	$1606 \pm 292$
3	$2815 \pm 327$	$2210 \pm 630$
4	$3666 \pm 881$	$2912 \pm 300$
6	$4024 \pm 279$	$3944 \pm 504$

\*ДИ – Доверительный интервал

Прочность резьбовых пар, вырезанных в направлении  $Y$ , не исследовалась, так как по паспортным данным прочность материала в этом направлении существенно ниже прочности материала в направлениях осей  $X$  и  $Z$ .

Дальнейшие зависимости несущей способности резьбовых пар проводились на образцах, вырезанных в направлении оси  $X$ . Зависимость несущей способности винтовой пары из УУКМ от числа витков определялась в диапазоне от 1 до 8 витков. Дополнительно к имеющимся данным были проведены испытания при числе витков  $n_v=1, 5, 7, 8$ . На каждый виток в указанном диапазоне использовалось не менее 4 образцов. Средние значения от числа витков в резьбовой паре указаны в Таблице 2 и графически представлены на Рисунке 3.

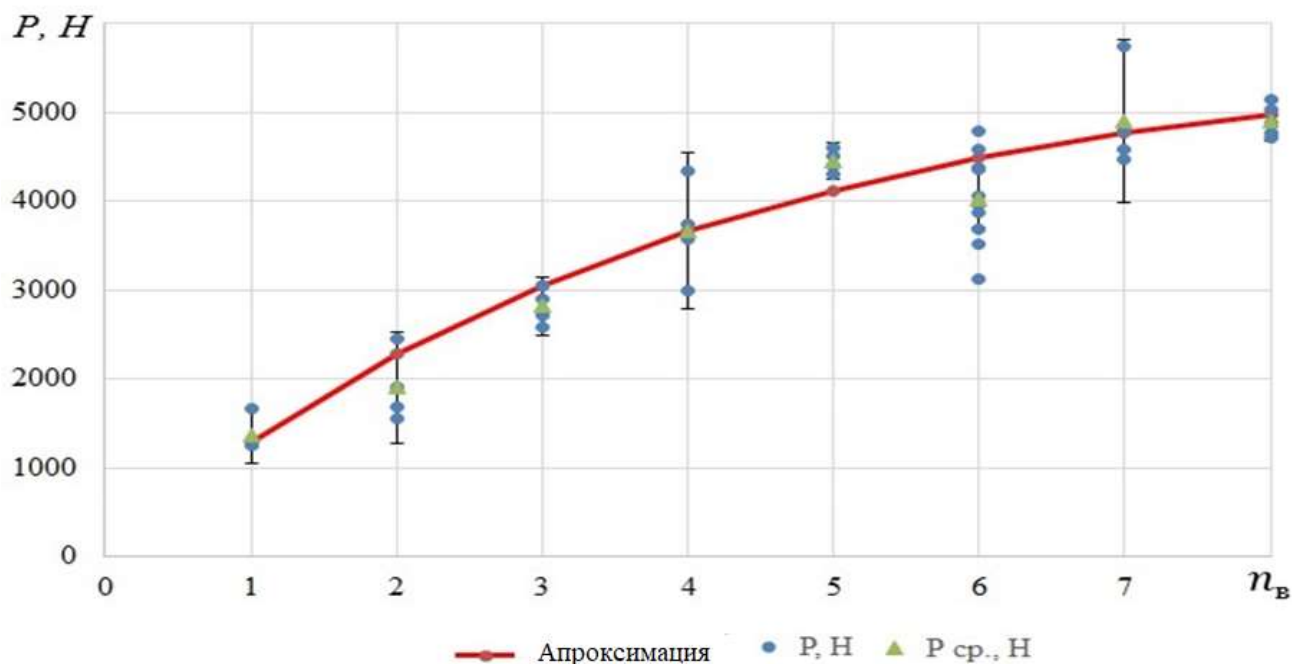


Рисунок 3. Зависимость несущей способности резьбовой пары из УУКМ от числа витков в соединении

Таблица 2.

Зависимость несущей способности резьбы из УУКМ от числа витков

$n_B$	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{cp} \pm$	1360 $\pm$	2181 $\pm$	2815 $\pm$	3666 $\pm$	4450 $\pm$	4024 $\pm$	4894 $\pm$	4908 $\pm$
ДИ, Н	317	500	327	881	209	325	913	228

Результаты испытаний резьбовых элементов одного диаметра, но с разным шагом, приведены в Таблице 3. Наблюдается явная нелинейная зависимость увеличения несущей способности резьбы от ее шага.

Таблица 3.

Несущая способность винтовой пары одного диаметра, но с различным шагом

Типоразмер резьбы					
M24x1,5		M24x2		M24x3	
№ обр.	P, Н	№ обр.	P, Н	№ обр.	P, Н
1	8465	1	12433	1	14750
2	8281	2	12158	2	9999
3	8905	3	12697	3	14345
4	8924	4	11798	4	13307
5	9716	5	12991	5	11834
$P_{cp} \pm$ ДИ, Н	8858 $\pm$ 248	$P_{cp} \pm$ ДИ, Н	12415 $\pm$ 207	$P_{cp} \pm$ ДИ, Н	12847 $\pm$ 872

Аналогичные исследования были проведены для резьбовых пар с одним шагом, но с разным диаметром резьбы. В результаты механических испытаний была получена нелинейная зависимость несущей способности резьбы из КМ от ее диаметра, которая согласуется с данными для резьбовых пар из металла.

Типовая диаграмма разрушения винтовой пары приведена на Рисунке 4.

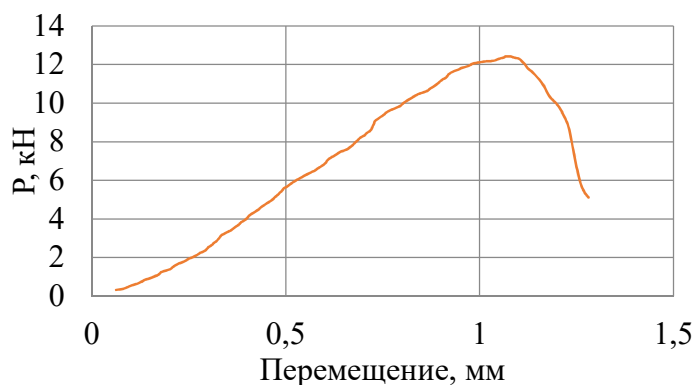


Рисунок 4. Диаграмма «мгновенного» разрушения винтовой пары

Разрушение происходит вследствие среза витков по внутреннему диаметру шпильки (Рисунок 5), что обусловлено повреждением каркаса при изготовлении резьбы и нарушением структуры материала из-за эффекта перерезанных нитей.



Рисунок 5. Фотографии разрушенных образцов после испытаний



При анализе геометрической модели резьбы М16 (см. Рисунок 6) видно, что армирование витка резьбы не соответствует структуре материала, а, значит, и свойства витка будут отличаться от свойств УУКМ.

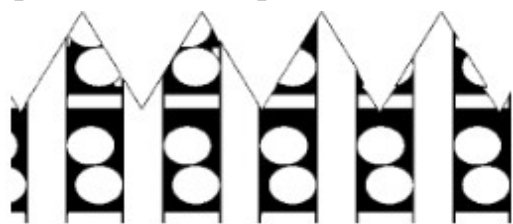


Рисунок 6. Поврежденный каркас при изготовлении резьбы М16 на УУКМ со схемой армирования 4ДЛ в направлении оси  $X$ , разрез в плоскости  $ZX$

Из этого следует необходимость исследования прочности материала на срез на размерах образцов, сопоставимых с шагом резьбы, так как каркас может менять свои прочностные свойства из-за повреждения арматуры.

**В третьей главе** проведено экспериментальное исследование влияния масштабного эффекта на прочность УУКМ со схемой армирования 4ДЛ. В результате простых испытаний получена оценка влияния масштабного эффекта на прочность материала при срезе на малых размерах материала.

Экспериментальные исследования поведения прочности материала при срезе определялись в соответствии с ОСТ 92-1474-78, на УУКМ со схемой армирования 4ДЛ и диаметром армирующего элемента 0,7 мм при толщинах образцов от 1 до 3 мм, вырезанных в направлениях соответствующим плоскостям среза  $YX$  и  $ZX$ . Толщина образцов выбиралась таким образом, чтобы соответствовать размеру шага метрической резьбы в плоскости среза. На каждое значение размера приходилось не менее 5 образцов. Расчетная схема эксперимента приведена на Рисунке 7.

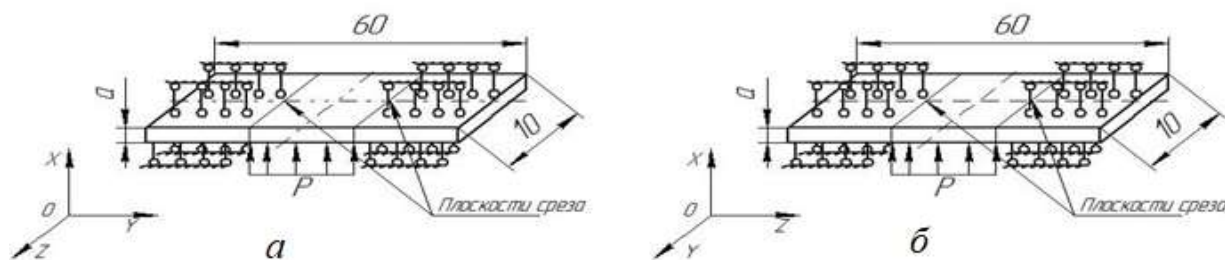


Рисунок 7. Расчетная схема образца на срез в плоскости:  $a$  -  $YX$  и  $b$  -  $ZX$ , где толщина образца  $a = 1 \div 3$  мм

Результаты испытаний представлены на Рисунке 8 в виде зависимости напряжений среза УУКМ от толщины образцов.

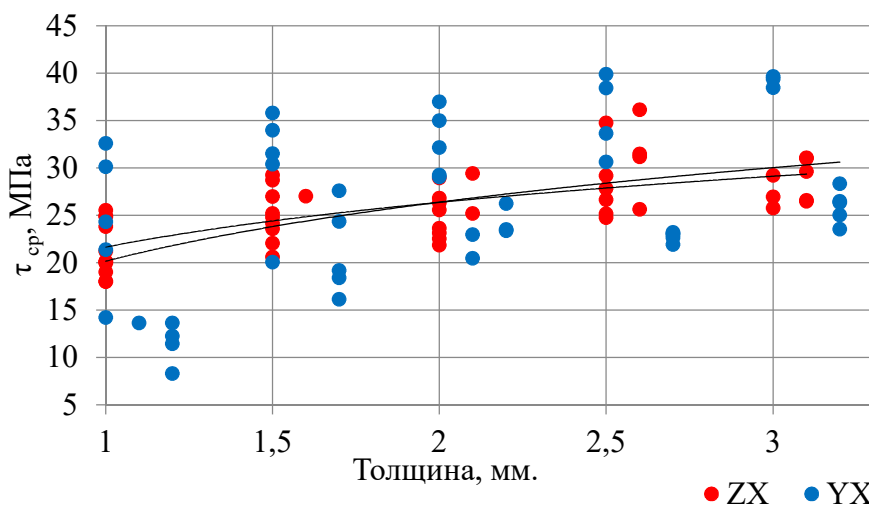


Рисунок 8. Зависимость напряжений среза УУКМ 4ДЛ от толщины образца

В результате анализа полученных данных можно сделать вывод, что масштабный эффект присутствует в области размеров от 1 мм до 3 мм, но разброс значений, полученных в ходе экспериментального исследования, показывает, насколько нестабилен краевой эффект. Статистическая обработка результатов на всем диапазоне толщин от 1 до 3 мм приведена в Таблице 4.

Значения прочности материала на срез, полученные в результате статистической обработки, сравнивались с результатами испытаний на срез образцов по ОСТ 92-1474-78 с размерами рабочего сечения 10x10 мм. Предполагается, что сечение в 100 мм<sup>2</sup> является представительным объемом материала. Полученные значения приведены в Таблице 4.

Таблица 4.

Прочность УУКМ 4ДЛ на срез при различных толщинах образцов		
Плоскость образца	$\tau_{\text{ср}} \pm \text{ДИ, МПа}$	
	При толщине образца от 1 мм до 3 мм	При толщине образца 10 мм
<i>YX</i>	$27,3 \pm 2,7$	$37,7 \pm 5,0$
<i>ZX</i>	$25,7 \pm 1,2$	$31,9 \pm 3,0$

Прочность материала на срез при толщинах образцов от 1 до 3 мм и образцами толщиной 10 мм существенна, для плоскости *ZX* - 25%, для *YX* - 20%, что обусловлено влиянием масштабного эффекта.

В результате проведенного исследования получен предел прочности материала на срез, который с учетом масштабного эффекта рекомендуется принимать для плоскостей *YX* - 27,3 МПа, *ZX* - 25,7 МПа.

**В четвертая глава** диссертационной работы посвящена разработке математической модели резьбового соединения из КМ со свойствами рассматриваемого УУКМ. Разработана методика осреднения результатов, полученных в результате численного расчета МКЭ. Сформулирован критерий разрушения резьбовых соединений из УУКМ со схемой армирования 4ДЛ, вырезанных в направлении оси *X*. Разработан оперативный метод оценки прочности резьбы из УУКМ со схемой армирования 4ДЛ при проектировании резьбовых узлов конструкции.

Расчеты проводились МКЭ в пакете ANSYS в линейной постановке. При расчете УУКМ со схемой армирования 4ДЛ рассматривался как однородный и ортотропный со свойствами, соответствующими средним характеристикам рассматриваемого КМ. Конечно-элементная модель приведена на Рисунке 9.

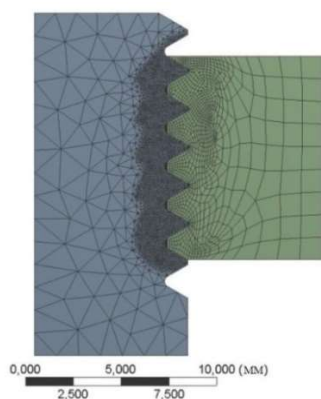


Рисунок 9. Конечно-элементная модель

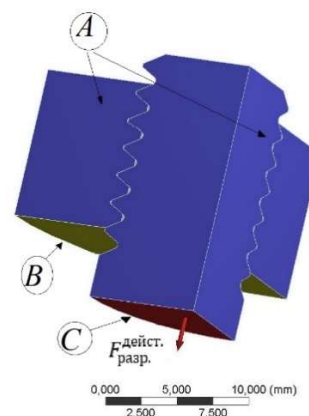


Рисунок 10. Граничные условия

Граничные условия формировались следующим образом. Предполагалось, что в зоне соприкосновения реализуется контакт с кулоновым трением и коэффициент трения равен 0,1. На площадках *A* были заданы симметричные граничные условия, запрещающие перемещения в направлении нормали к площадкам, на площадке *B* запрещено перемещение вдоль оси *Y*, а к площадке *C* приложена  $F_{\text{раз}}^{\text{дейст}}$  (Рисунок 10).

Так как разрушение соединения происходит в результате среза витков по внутреннему диаметру резьбы (Рисунок 5), то критерий разрушения было принято искать в виде осредненного значения совокупности касательных напряжений в зонах основания витков.

Из-за анизотропии свойств материала распределение касательных напряжений по витку имеет неравномерный характер, и увеличиваются от направления оси *Z* к направлению оси *Y* в плоскости среза витков (Рисунок 11).

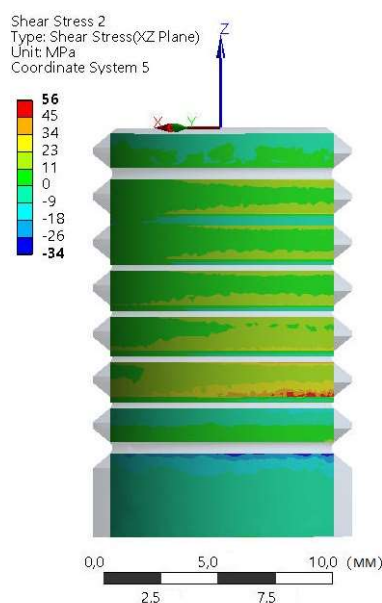


Рисунок 11. Результаты расчета МКЭ в плоскости среза витков

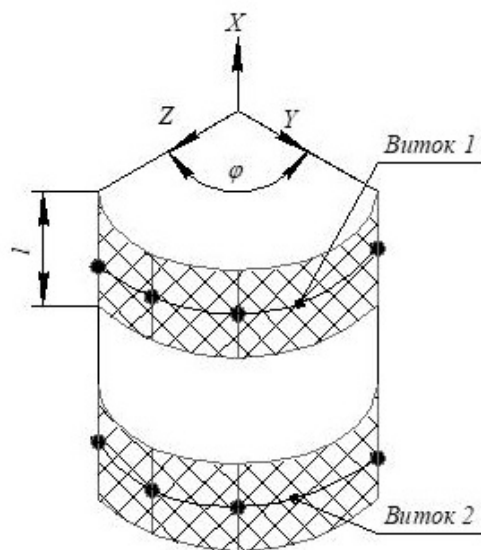


Рисунок 12. Схема осреднения результатов расчета МКЭ

Осреднение результатов проводилось по каждому витку в цилиндрической системе координат (Рисунок 12), где ось *X* совпадала с осью винта, а полярный угол  $\varphi$  определял поворот от 0 ° до 90 ° по витку резьбы. Путь осреднения задавался по линии основания витка, где происходит срез резьбы. В полученном пути определялось среднее значение напряжений на срез (Рисунок 13):

$$\tau_{\text{ср}}(n, \varphi) = \frac{1}{l} \int_0^l \tau_{\text{ср}}(n, \varphi, x) dx, \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{ср}}(n, \varphi, l)$  - распределения напряжений по сечению среза витков,  $\varphi$  – полярный угол по витку,  $l$  – вертикальная координата в плоскости среза витка,  $n$  – номер витка.

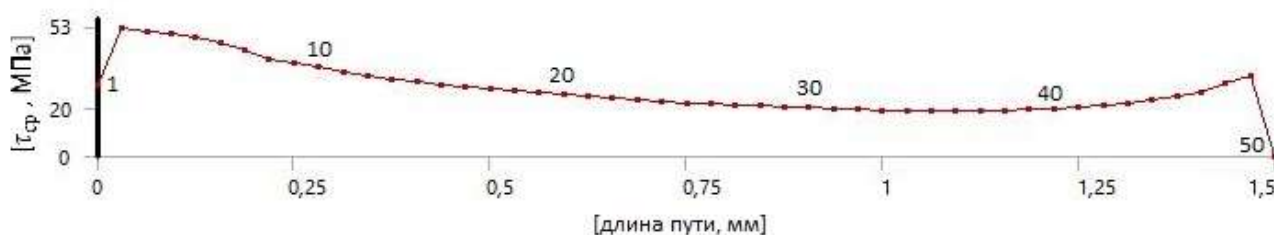


Рисунок 13. График значений  $\tau_{\text{ср}}$  — напряжений по линии среза витка

В результате осреднения нагрузки по виткам получены следующие зависимости напряжений от полярного угла  $\varphi$  (Рисунок 14), по каждому витку в соединениях.

Очевидно, что на прочность резьбовой пары из УУКМ наибольшее влияние оказывают напряжения в первом витке, так как они в два раза отличаются от напряжений на последующих витках в большую сторону.

Исходя из вышеизложенного, за критерий разрушения резьбовой пары из УУКМ могут быть приняты:

- 1) осреднённые напряжения среза по первому витку  $\tau_{\text{ср}}^{1\text{в}}$ , полученные по следующей формуле:

$$\tau_{\text{ср}}^{1\text{в}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \tau_{\text{ср}} d\varphi, \quad (2)$$

для каждого соединения в зависимости от количества витков, где  $\varphi$  – полярный угол между осями  $Z$  и  $Y$ ;

- 2) осреднённые напряжения на первом витке в зависимости от плоскости, к которой они принадлежат (Рисунок 11):

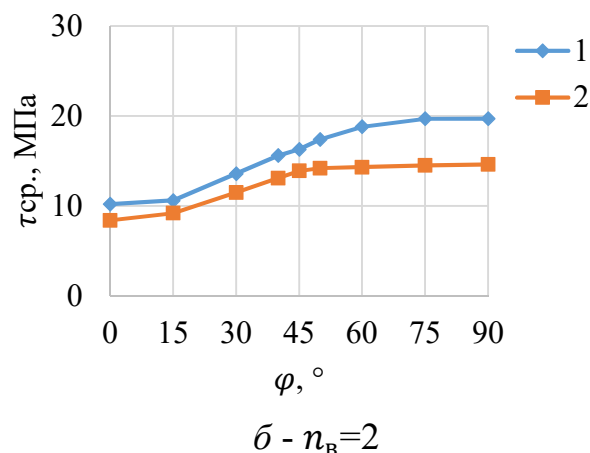
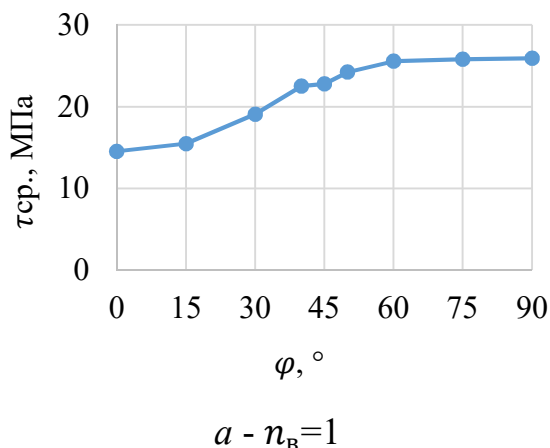
- на плоскость  $ZX$  приходятся минимальные осреднённые напряжения среза на  $i$ -ом витке  $\tau_{\text{срмин}}^{i\text{в}}$ ,
- на плоскость  $YX$  приходятся максимальные осреднённые напряжения среза на  $i$ -ом витке  $\tau_{\text{срмах}}^{i\text{в}}$ ;

- 3) максимальные локальные напряжения в плоскости среза (цилиндрическая поверхность в основании витков)  $\tau_{\text{мах}}$ ;

- 4) эквивалентные напряжения по теории максимальных касательных напряжений.

В результате расчета МКЭ критерий в виде эквивалентных напряжений по теории максимальных касательных напряжений был исключен, так как по данной теории прочности разрушение резьбового соединения должно произойти по телу шпильки, во впадине резьбы, что не соответствует результату эксперимента.

Все значения рассмотренных критериев, рассчитанных на момент разрушения, то есть при значении экспериментально определенной разрушающей нагрузки  $F_{\text{раз}}^{\text{дейст}}$ , приведены в Таблице 5.



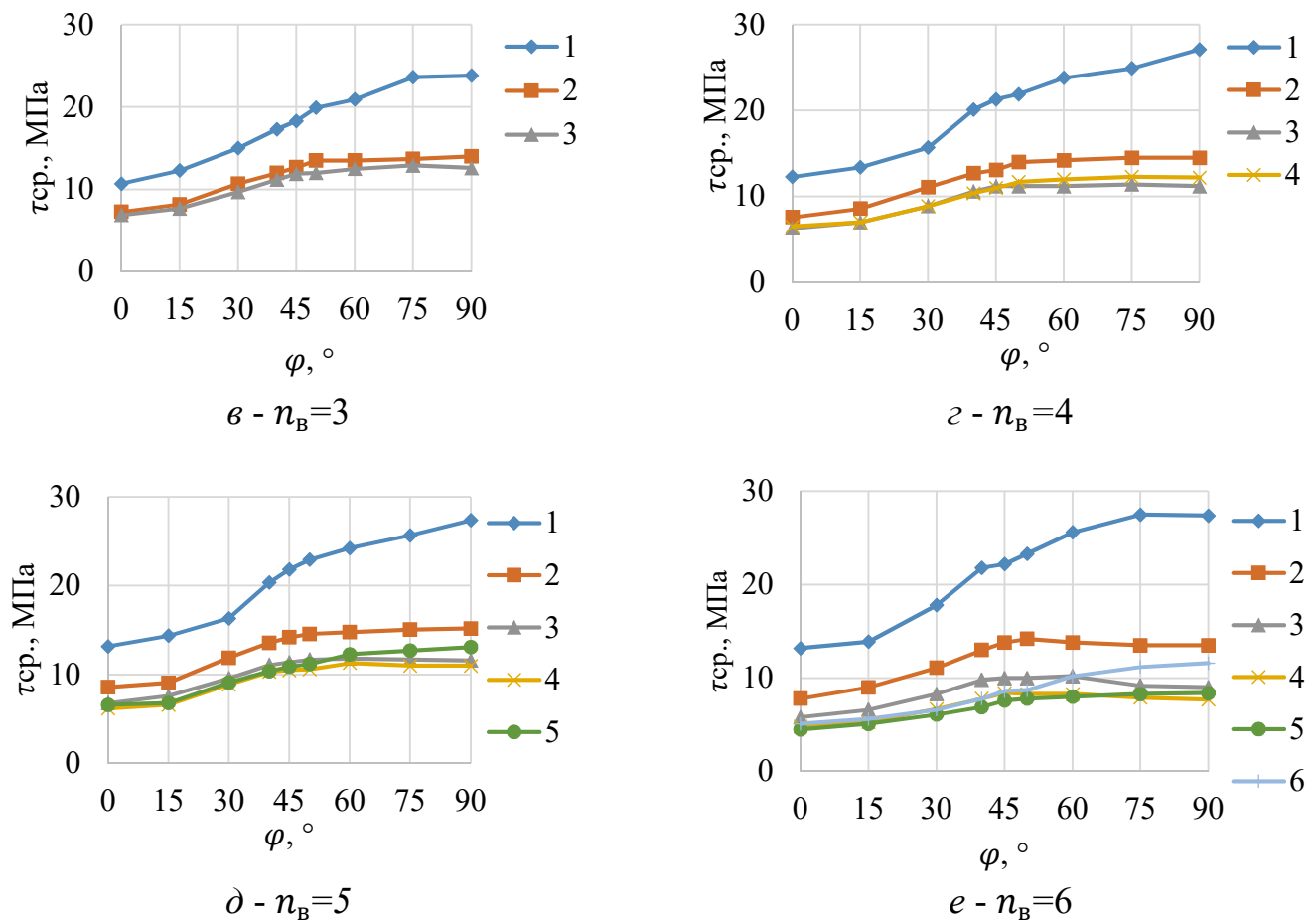


Рисунок 14. Распределение осреднённых напряжений по виткам резьбы в зависимости от полярного угла  $\varphi^\circ$ , в соединениях с различным числом витков

Таблица 5.

Значение критических напряжений в резьбовой паре из УУКМ

$n_{\text{в}}$	$\tau_{\text{ср}}^{1\text{в}}, \text{ МПа}$	$\tau_{\text{срmax}}^{1\text{в}}, \text{ МПа}$	$\tau_{\text{срmin}}^{1\text{в}}, \text{ МПа}$	$\tau_{\text{max}}, \text{ МПа}$
1	21,6	25,9	14,5	49,7
2	18,1	22,8	11,7	47,4
3	18,0	23,8	10,7	62,7
4	19,8	27,1	12,3	75,2
5	20,5	27,4	13,2	56,4
6	21,1	27,4	13,2	76,9

По результатам анализа данных Таблиц 4 и 5 очевидно, что в качестве критерия разрушения резьбовой пары предпочтительней взять максимальные осреднённые напряжения среза на первом витке  $\tau_{\text{срmax}}^{1\text{в}}$ , так как их значения на момент разрушения наиболее близки к значениям стандартной характеристики прочности материала на срез, определяемой по ОСТ 92-1474-78.

Таким образом, условие разрушения резьбовой пары из пространственно армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ, вырезанного в направлении оси  $X$ , можно записать в следующем виде:

$$\tau_{\text{срmax}}^{1\text{в}} > \tau_{\text{ср}}^{YX}, \quad (3)$$



где  $\tau_{ср\max}^{1в}$  – максимальные напряжения среза на первом витке в соединении,  $\tau_{ср}^{УХ}$  – прочность материала на срез в плоскости УХ с учетом поврежденного каркаса материала.

Используя условие разрушения (3), можно получить силу  $F_{раз}^{расч}$ , при которой произойдет разрушение резьбовой пары, и провести сравнение с экспериментальными данными, оценив погрешность вычисления. Результаты численного расчета приведены в Таблице 6.

Таблица 6.

Результаты численного расчета с помощью предложенного критерия разрушения

Модель резьбы от $n_b$	$F_{раз}^{расч}$ , Н	$F_{раз}^{эксп}$ , Н	$ \delta  = \frac{F_{раз}^{эксп} - F_{раз}^{расч}}{F_{раз}^{эксп}} \cdot 100, \%$
1	1518	1360	11,6
2	2633	2181	20,7
3	3235	2815	14,9
4	3693	3666	0,7
5	4484	4450	0,8
6	4484	4024	11,4
Среднее значение относительной погрешности, %			10,0

По результатам расчетов МКЭ, приведенным в Таблице 7, можно сделать вывод, что средняя относительная погрешность вычисления не превышает 10 %. Следовательно, модель резьбовой пары из УУКМ хорошо описывает реальный процесс разрушения композита, и может быть использована при расчете несущей способности резьбы с учетом соответствующего коэффициента безопасности.

Проведенные всесторонние экспериментальные исследования дают возможность сформулировать формулу для оценки разрушающей нагрузки резьбовой пары.

Кривые, полученные в численном расчете (Рисунок 14), были проинтегрированы в соответствии с формулой (2). Зависимость распределения напряжений по виткам от числа витков  $n_b$  в резьбовом соединении из УУКМ со схемой армирования 4ДЛ приведена на Рисунке 15.

В результате интегрирования получены средние значения напряжений на каждом витке в соединении.

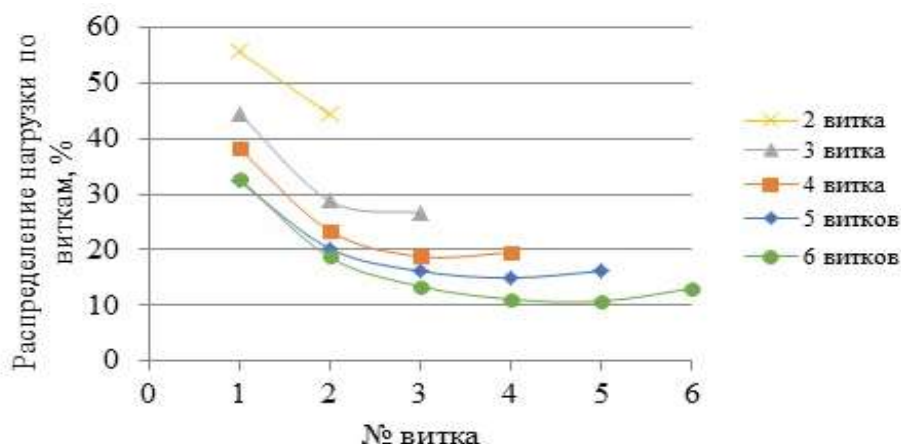


Рисунок 15. Распределение нагрузки по виткам резьбы

Принято допущение, что в резьбовой паре с одним витком всю осевую нагрузку воспринимает единственный виток. При увеличении числа витков  $n_b$  в соединении осевая нагрузка распределяется между витками, и максимум приходится на первый виток. Начиная с модели  $n_b = 2$

витка и до модели при  $n_b = 5$  витках включительно, процент воспринимаемой осевой нагрузки первым витком постепенно уменьшается от 55 % до 32 %, а далее стабилизируется и останавливается приблизительно на уровне 1/3 от общей силы, действующей на резьбовую пару. Доля нагрузки  $\eta$ , воспринимаемая первым витком, от числа витков  $n_b$  в резьбовой паре приведена в Таблице 7.

Таблица 7.

Доля нагрузки, воспринимаемая первым витком					
$n_b$	1	2	3	4	5 и более
$\eta$	1	0,56	0,45	0,38	0,32

Таким образом, усилие, вызывающее срез витков, можно записать в следующем виде:

$$F_{\text{раз}} \geq S \tau_{\text{ср}} / (k \eta) = \pi d_3 k_1 P \tau_{\text{ср}} / (k \eta), \quad (4)$$

где  $F_{\text{раз}}$  – усилие, вызывающее срез витков;  $H$ ;  $\tau_{\text{ср}}$  – прочность материала на срез, МПа;  $S = \pi d_3 H$  – площадь среза первого витка, мм<sup>2</sup>;  $d_3$  – внутренний диаметр резьбы, мм;  $H = k_1 P$  – высота среза витка, мм;  $k_1$  – коэффициент эффективной площади среза витка (для метрической резьбы  $k_1 = 0,825$ , для трапецеидальной  $k_1 = 0,634$  и т.д.);  $P$  – шаг резьбы, мм;  $\eta$  – доля нагрузки, воспринимаемая первым витком;  $k = 2$  – коэффициент неравномерности восприятия нагрузки витком.

Средняя относительная погрешность расчета разрушающей нагрузки по формуле (4) составила 26 %, причем оценка по предложенной формуле является консервативной, то есть расчетные значения были ниже, чем реально разрушающая нагрузка, таким образом, формула (4) применима для проектных расчетов.

**В пятой главе** разработана методика оценки прочности резьбовой пары из КМ, апробированная на пространственно армированном УУКМ со схемой армирования 4ДЛ. Спроектирован резьбовой образец для высокотемпературных испытаний при исследовании механических свойств УУКМ на основе методики оценки несущей способности резьбовой пары из пространственно армированного углерод-углеродного композиционного материала.

В результате проделанной работы сформулирована методика общего подхода к оценке несущей способности резьбовых пар из КМ, которая позволяет, используя один и тот же алгоритм действий, получить необходимые зависимости для формирования критерия разрушения резьбовой пары (винт – гайка) из КМ.

Блок схема состоит из 6 крупных блоков:

- 1 Блок. Анализ структуры материала.
- 2 Блок. Экспериментальное исследование.
- 3 Блок. Разработка математической модели.
- 4 Блок. Верификация модели.
- 5 Блок. Формирование критерия разрушения.
- 6 Блок. Формирование упрощенного расчета.

Алгоритм общего подхода к оценке несущей способности резьбовых соединений предусматривает следующую последовательность действий.

- 1 Блок. Изучение структуры материала для формирования исходных данных программы испытаний, а также, учета особенности его внутреннего строения при создании геометрической модели.

- 2 Блок. Формирование стандартного набора испытаний в зависимости от требований к условиям эксплуатации искомых резьбовых деталей, а также характера разрушения для дальнейшего определения напряжений в зоне разрушения.

- 3 Блок. Создание теоретической модели поведения резьбовой пары при приложении силы в зависимости от вида нагрузок, действующих на соединение. Свойства материала ( $E_x, E_y, E_z; \nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}; G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}$ ) должны соответствовать паспортным. В первом приближении рекомендуется ограничиться гомогенным эквивалентом материала, без перехода на микроуровень.

- 4 Блок. Верификация модели на «простых» испытаниях. Под «простыми» испытаниями следует понимать испытания прочности материала на растяжение, сжатие, изгиб или срез, состав которых будет определен в ходе экспериментального исследования в зависимости от характера и вида разрушения резьбовой пары. Необходимо сравнить напряжения, полученные при расчете в момент разрушения, и напряжения, реализованные в «простых» испытаниях при определенном нагружении. В случае, если прочность композита зависит от размера сечения, то рекомендуется использовать размеры образцов, максимально приближенные к реальным размерам резьбы, в противном случае ограничиться известными паспортными значениями.

- 5 Блок. Формирование критерия разрушения резьбовой пары из композита заключается в подборе такой комбинации параметров НДС винтовой пары  $f(\sigma)$ , определенных на момент разрушения, которые удовлетворяют условию разрушения  $f(\sigma) > \sigma_{кр}$ , где  $f(\sigma)$  – критерий разрушения;  $\sigma_{кр}$  – критическое значение характеристики разрушения.

- 6 Блок. Формирование инженерного подхода предназначено для обобщения полученных данных при формировании методики и позволяет предложить методику оценки несущей способности резьбы из КМ на стадии проектирования резьбового узла.

Для иллюстрации использования инженерного подхода была решена задача проектирования образца с резьбовой захватной частью для высокотемпературных исследований физикомеханических свойств УУКМ со схемой армирования 4ДЛ.

Прочность на растяжение современного мелкоячеистого высокоплотного пространственно армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ варьируется  $80 \div 140$  МПа в зависимости от температуры испытаний. Чтобы гарантировать разрушение образца в рабочей части примем  $\sigma_p$  равное 150 МПа. В процессе испытаний помимо прочности на растяжение определяют модуль упругости, поэтому необходимо предусмотреть рабочую часть образца не менее  $5d$ , где  $d$  – диаметр образца в рабочей части. Величина диаметра в рабочей части резьбового образца на растяжение с учетом масштабного эффекта прочности пространственно армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ должна составить не менее 6 мм,  $S$  – площадь сечения рабочей части образца.

Следовательно, если воспользоваться формулой оперативного расчета (4) и выразить внутренний диаметр резьбы  $d_3$ , то получим:

$$d_3 \geq (2\sigma_p S \cdot \eta) / (Pk_1 \pi \tau_{cp}^{yx}).$$

Расчет показал, что для крепления образца необходимый размер резьбовой части М18х2,5. Итоговый чертеж образца приведен на Рисунке 16.

Дальнейшие испытания показали, что вновь разработанный образец разрушается в рабочей части (Рисунок 17), что подтверждает правомерность применения методики для подбора резьбы из пространственно армированных КМ под определенные нагрузки.

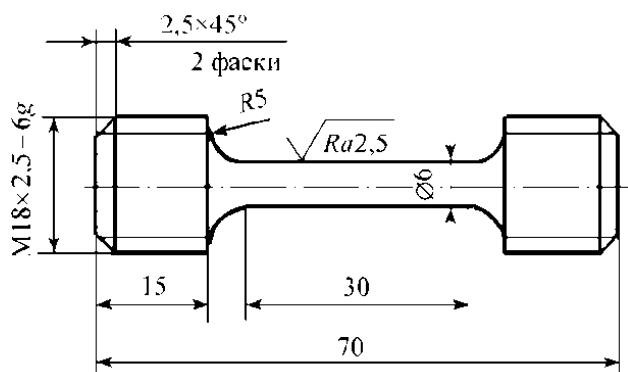


Рисунок 16. Чертеж образца для высокотемпературных испытаний с резьбовой захватной частью



Рисунок 17. Образцы с резьбовой захватной частью после разрушения

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основе анализа специфики соединений деталей из пространственно армированного УУКМ установлено, что работоспособность изделия при высоких температурах может быть обеспечена использованием резьбовой пары, изготовленной из УУКМ, хотя в нормальных условиях её несущая способность значительно ниже, чем у такой же резьбовой пары из стали.

2. Новые экспериментальные данные о характере разрушения резьбовой пары из пространственно армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ и её несущей способности в зависимости от параметров резьбы (шаг, диаметр, число витков в соединении) позволили установить непропорциональное снижение прочности винтов при механическом нанесении резьбы из-за эффекта перерезанных нитей и необходимость создания оригинального подхода к оценке несущей способности резьбовых пар из КМ.

3. Анализ результатов экспериментальных исследований серии специальных образцов по стандартной схеме испытаний на срез доказал, что для резьбовых соединений из пространственно армированных УУКМ следует учитывать масштабный эффект прочности витков, достигающий 20-25 %.

4. Анализ НДС в зоне разрушения резьбовой пары в момент достижения критической нагрузки доказал правомерность применения математической модели КМ с ортотропными упругими свойствами, соответствующими паспортным характеристикам рассматриваемого КМ, и расчетной схемы МКЭ для резьбовых деталей из КМ.

5. Полученный критерий разрушения резьбовой пары из УУКМ со схемой армирования 4ДЛ, базирующийся на численном моделировании и стандартных прочностных характеристиках материала, позволяет с точностью до 10 % оценить несущую способность резьбовой пары из пространственно армированных УУКМ и определить необходимые параметры винтовой пары для безотказной работы резьбового узла изделия.

6. Разработанная методика оперативной оценки несущей способности резьбовой пары из КМ со схемой армирования 4ДЛ в значительной мере сокращает стадию проектирования изделия, что в работе проиллюстрировано на примере проектирования образца с резьбовой захватной частью для исследования прочностных характеристик УУКМ в диапазоне высоких температур.

7. Применение разработанного алгоритма оценки несущей способности резьбовых пар из УУКМ со схемой армирования 4ДЛ позволяет получить необходимые зависимости для формирования критерия разрушения резьбовых соединений из прочих КМ с проведением минимального количества дополнительных экспериментальных исследований, что на практике существенно экономит время и ресурсы в проектно-конструкторских работах предприятий.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

### Научные статьи, опубликованные в журналах рекомендованных ВАК РФ:

1. **Любченко М.А.**, Захаров М.Н. Исследование предельных нагрузок для резьбовых соединений деталей из углерод-углеродных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2017. № 4 (148). С. 82-87. (0,42 п.л./0,21 п.л.);
2. Проблемы прочности соединения деталей элементами из композиционных материалов / **М.А. Любченко** [и др.] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эл № ФС77-48211. 2016. № 3. С. 1-11. (0,5 п.л./0,1 п.л.);
3. **Любченко М.А.**, Магнитский И.В. Оценка прочности резьбового соединения из углерод-углеродного композиционного материала при проектировании деталей из композита // Вопросы оборонной техники: Секция 15. 2018. №3 (190). С. 14-20. (0,33 п.л./0,2 п.л.);
4. Захаров М.Н., **Любченко М.А.**, Магнитский И.В. Критерий разрушения резьбовых соединений деталей из композитных материалов // Вестник машиностроения. 2018. №12. С. 3-6. (0,29 п.л./0,1 п.л.);
5. Захаров М.Н., **Любченко М.А.**, Магнитский И.В. Проектирование резьбового образца для высокотемпературных механических испытаний углерод-углеродных композиционных материалов // Вестник машиностроения. 2019. №3. С. 14-19. (0,41 п.л./0,14 п.л.);
6. **Любченко М.А.** Общий подход к оценке несущей способности резьбовых соединений из композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2019. №1 (153). С. 21-30 (0,64 п.л./0,64 п.л.).

### Прочие научные труды:

7. **Любченко М.А.**, Захаров М.Н. Исследование несущей способности резьбы на углерод-углеродных композиционных материалах (УУКМ) // III Всероссийская научно-техническая конференция «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники»: Сборник трудов конференции. Издательство ВИАМ, 2017. С. 8. (0,27 п.л./0,14 п.л.);
8. **Любченко М.А.**, Магнитский И.В. Оценка несущей способности резьбового соединения из УУКМ // Научные чтения им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов»: Сборник материалов. М: ИМЕТ РАН, 2018. С. 184. (0,05 п.л./0,04 п.л.);
9. Резьбовые элементы из «Арголона 4DL» / **М.А. Любченко** [и др.] // Молодежная конференция «Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники». Сборник материалов молодежной конференции. Королев (Московской обл.): Изд-во ИПК «Машприбор», 2015. С. 28-31. (0,22 п.л./0,1 п.л.);
10. Захаров М.Н., **Любченко М.А.** Исследование несущей способности резьбовых элементов из углерод-углеродных композиционных материалов.// II Всероссийская научно-техническая конференция «Механика и математическое моделирование в технике» посвященная юбилеям основателей кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана профессорам С.Д. Пономареву, В.Л. Бидерману, К.К. Лихареву, Н.Н. Малинину, В.А. Светлицкого: Сборник трудов. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 251-255. (0,17 п.л./0,1 п.л.).