

На правах рукописи

Медведев Александр Викторович

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
КРУЧЕНЫХ НИТЕЙ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ГИБКИХ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УПЛОТНЕНИЙ**

Специальность 05.19.02

«Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Московская область
2022

Работа выполнена в Акционерном обществе «НПО Стеклопластик»

Научный

консультант: **Разумеев Константин Эдуардович** доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина» (Технология, Дизайн, Искусство), профессор кафедры текстильных технологий.

Официальные

оппоненты: **Корнилова Надежда Львовна** доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет», начальник инжинирингового центра текстильной и легкой промышленности, профессор направления подготовки технология швейных изделий.

Панин Иван Николаевич доктор технических наук, профессор, общество с ограниченной ответственностью «Нефтегазовые технологии МИФИ», генеральный директор. г. Димитровград.

Рудовский Павел Николаевич доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Костромской государственный университет», профессор кафедры теории механизмов и машин, деталей машин и проектирования технологических машин.

Ведущая

Организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, г. Иваново.

Защита диссертации состоится 12 апреля 2022 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.01 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», по адресу: 191186, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, ауд. 437.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 190068, Санкт-Петербург, Вознесенский пр., д. 46, <http://www.sutd.ru>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.236.01

кандидат технических наук, доцент

Вагнер Виктория Игоревна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. Разработка научных основ технологии производства керамических крученых нитей из оксида алюминия направлена на создание современных гибких высокотемпературных уплотнений. Разработка, проектирование и производство гибких высокотемпературных уплотнений, применяемых в узлах герметизации разъемных соединений, работающих в зоне высоких температур и агрессивных сред, имеют большую практическую значимость для отечественной промышленности.

Объектом исследования диссертационной работы является технология производства крученых нитей из отечественных керамических комплексных нитей.

Предметами исследования диссертационной работы являются свойства и структура керамических комплексных, керамических крученых нитей и гибких высокотемпературных уплотнений из керамических крученых нитей, параметры технологического режима выработки крученых нитей и гибких высокотемпературных уплотнений.

Цель работы состоит в разработке научных основ технологии производства крученых нитей из оксида алюминия для гибких высокотемпературных уплотнений.

Для достижения данной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Исследования текстуры поверхности разрушения и структуры поверхности керамических элементарных нитей.
2. Исследования влияния параметров фрикционного контакта на характеристики внешнего трения керамических комплексных и крученых нитей.
3. Разработка теоретических основ процесса кручения нитей по способу отдельной подачи нитей в зону формирования.
4. Разработка теоретических основ проектирование одиночных, однокруточных и многокруточных керамических нитей из отечественного сырья.
5. Разработка параметров технологического режима выработки и выработка керамических крученых нитей.
6. Разработка параметров технологического режима выработки и выработка высокотемпературных шнуров наполненных из керамических крученых нитей.
8. Разработка конструкции высокотемпературных кольцевых волокнистых уплотнений и устройств для выработки кольцевых волокнистых уплотнений.
9. Разработка параметров технологического режима выработки и выработка высокотемпературных кольцевых волокнистых уплотнений.
10. Исследования микроструктуры порового пространства высокотемпературных шнуров наполненных и высокотемпературных кольцевых волокнистых уплотнений.

Методы исследований. В работе использовались следующие методы: механики текстильных нитей, фрактографии, рентгеновской, оптической, сканирующей зондовой микроскопии, рентгеновской компьютерной

микротомографии, определения физико-механических свойств текстильных материалов по действующей нормативно-технической документации и оригинальным методикам, разработанным в соответствии с отечественной и зарубежной научно-технической документацией.

Вид научного исследования. В диссертационной работе проведены поисковые исследования, направленные на разработку научных основ технологии производства керамических крученых нитей. Результаты исследований должны продемонстрировать работоспособность технологии на макетах в лабораторных условиях в соответствии с достигнутым уровнем готовности технологии.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке теоретического, экспериментального и методического обеспечения проектирования керамических крученых нитей, разработке технологии производства керамических крученых нитей из отечественного сырья для гибких высокотемпературных уплотнений, работающих при температуре до 1600°C. В работе применен метод научно обоснованных исследований или исследований, основанных на доказательствах (*Evidence-based research; EBR*), который заключается в систематическом изучении существующих физических данных предметов исследования и определении необходимых методов исследования.

Применительно к проблематике диссертации по стандартным и оригинальным методикам исследованы *впервые*:

- текстура поверхности разрушения отечественных керамических элементарных нитей;
- дефекты отечественных керамических элементарных нитей;
- структура поверхности отечественных керамических элементарных нитей;
- влияние на характеристики внешнего трения отечественных керамических комплексных и крученых нитей параметров фрикционного контакта;
- механические свойства отечественных керамических элементарных, комплексных и крученых нитей;
- процесс кручения нитей по способу отдельной подачи нитей в зону формирования;
- параметры структуры и характеристики пористости высокотемпературных шнуров наполненных и высокотемпературных кольцевых волокнистых уплотнений.

В соответствии с целями диссертационной работе *впервые*:

- разработаны и апробированы параметры технологического режима выработки отечественных керамических крученых нитей;
- разработаны и апробированы параметры технологического режима выработки высокотемпературных шнуров наполненных из отечественных керамических крученых нитей;
- разработана конструкция нового типа гибкого высокотемпературного уплотнения – высокотемпературного кольцевого волокнистого уплотнения и устройства для его реализации;

– разработаны и апробированы параметры технологического режима выработки высокотемпературных кольцевых волокнистых уплотнений.

Теоретическая значимость выполненных в диссертационной работе исследований заключается в разработке теоретических основ кручения керамических нитей по способу отдельной подачи в зону формирования, что позволит вырабатывать крученые нити с заданными механическими свойствами. Разработка теоретических основ проектирования одиночных, однокруточных и многокруточных нитей керамических нитей из отечественного сырья.

Практическая значимость выполненных в диссертационной работе исследований заключается в создании инновационного научно-технического задела, обеспечивающего четвертый уровень готовности технологии – УГТ4 крученых нитей и второй уровень готовности технологии – УГТ2 гибких высокотемпературных уплотнений из керамических крученых нитей отечественного производства:

- выработаны керамические крученые нити с линейной плотностью и разрывной нагрузкой, обеспечивающей выработку гибких высокотемпературных уплотнений;
- выработан высокотемпературный шнур наполненный из керамических крученых нитей;
- разработана конструкция уплотнения нового типа – высокотемпературное кольцевое волокнистое уплотнение;
- разработана конструкция и изготовлен станок для обмотки кольцевого уплотнения;
- выработаны высокотемпературные кольцевые волокнистые уплотнения;
- результаты диссертационного исследования использовались АО «Композит» при выполнении ОКР по теме «Разработка технологии изготовления работоспособных в окислительных средах теплоизоляционных материалов и герметизирующих гибких уплотнений для ГЛА и тракта ГПВРД, объемно – армированных структур эластичного шарнира поворотного управляемого сопла РДТТ», шифр НИР: «Сборка».

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на научно-технических конференциях: ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (Москва, 2013 г.), ФГБУ ВО «ИВГПУ» (Иваново, 2017 г.), ФГБУ ВО РГУ им. А.Н. Косыгина (Москва, 2017 г.), ФГБУ ВО СПбГУПТД (Санкт – Петербург, 2018 г.), ФГБУ ВО РГУ им. А.Н. Косыгина (Москва, 2019 г.), ОНПП «Технология» (Обнинск, 2019 г.), УО ВГТУ (Витебск, 2019 г.), ФГБУ ВО РГУ им. А.Н. Косыгина (Москва, 2021 г.), ПАО РКК «Энергия» (Королев, 2021 г.).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 41 научной публикации, в том числе 31 в журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерации, 19 статей в журналах, индексируемых в международных базах научного цитирования, а также 1 патент РФ на изобретение, 22 доклада на научных конференциях.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, 6 глав с заключением, основными результатами и выводами по работе, рекомендациями по

дальнейшей разработке темы, списка литературы, иллюстративного материала и приложений. Работа изложена на 293 страницах машинописного текста, содержит 85 таблиц и 106 рисунков. Список используемых литературных источников включает 108 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены объект исследования, предметы исследования, цель и задачи диссертационной работы. В диссертационной работе проведены поисковые исследования, направленные на разработку научных основ технологии производства керамических крученых нитей. Результаты исследований должны продемонстрировать работоспособность технологии на макетах в лабораторных условиях, в соответствии с достигнутым уровнем готовности технологии. Дана оценка уровня готовности объекта исследования. Отмечена теоретическая и практическая значимость разработки технологии производства крученых керамических нитей из отечественного сырья.

В первой главе проведен анализ рынка материалов для гибких высокотемпературных уплотнений. Отмечено, что рост мирового рынка текстильных керамических материалов за период с 2016 по 2019 год показал среднегодовой рост 10,2% при прогнозе 9,94%. Проведенный анализ производственной деятельности АО «НПО Стеклопластик» показал, что спрос на высокотемпературные уплотнительные материалы существует и постоянно растет. На основании патентно-технических исследований и результатам анализа открытых литературных источников обоснованы направления исследования:

1. Исследование текстуры поверхности разрушения и структуры поверхности керамических элементарных нитей.
2. Исследование влияния на характеристики внешнего трения керамических нитей параметров фрикционного контакта.
3. Исследование процесса кручения нитей по способу отдельной подачи нитей в зону формирования.
4. Теоретические и экспериментальные исследования по проектированию и выработке керамических крученых нитей.
5. Теоретические и экспериментальные исследования по проектированию и выработке гибких высокотемпературных уплотнений.

Во второй главе выполнены исследования текстуры поверхности разрушения и структуры поверхности отечественных керамических элементарных нитей.

На поверхности разрушения исследована сердцевина, состоящая из отдельных зерен либо групп зерен размерами от 200 до 700 нм и оболочка толщиной от 0,3 до 0,6 мкм (рисунок 1, а). Анализ поверхности разрушения элементарных нитей показал, что для керамических элементарных нитей характерен совмещенный вид излома: пластичный оболочки и хрупкий

сердцевины. Исследованы внутренние дефекты (рисунок 1, б) и дефекты поверхности элементарных нитей (рисунок 1, в).

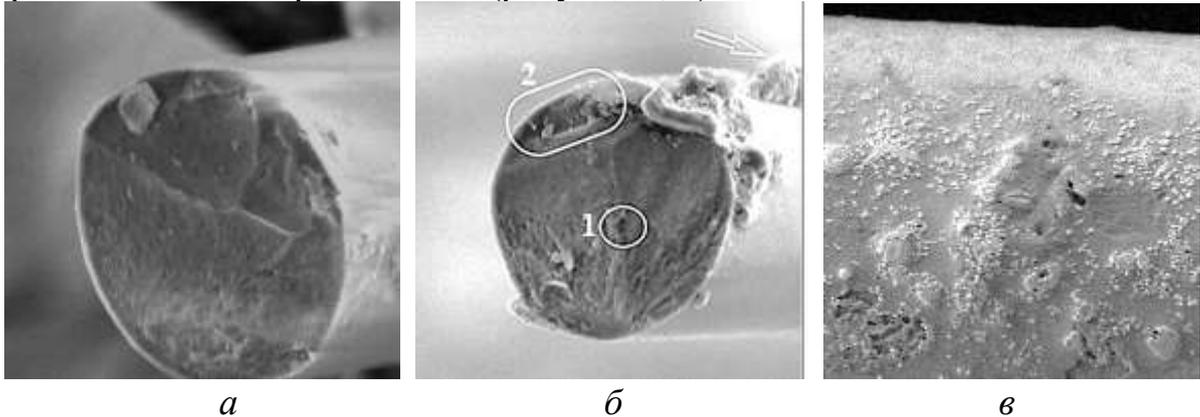


Рисунок 1 – Поверхность разрушения (а) и дефекты: инородное включение – 1, внутренняя пора – 2 (б); наружная пора (в)

Методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) проведено измерение элементов структуры поверхности образцов элементарных нитей ФГУП ВИАМ (образец №1), ЗМ™ Nextel™ 720 (образец №2) и РХТУ им. Д.И. Менделеева (образец №3). Методами СЗМ получены значения параметров структуры ГОСТ 2789 – 73:

Ra – среднее арифметическое отклонение оцениваемого профиля;

Rq – среднеквадратическое отклонение оцениваемого профиля;

Sa – среднее арифметическое значение высоты поверхности;

Sq – среднеквадратическое значение высоты поверхности.

Средние значения параметров структуры шероховатой поверхности элементарных нитей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние значения параметров структуры шероховатой поверхности элементарных нитей

Образец №1				Образец №2				Образец №3			
Ra , нм	Rq , нм	Sa , нм	Sq , нм	Ra , нм	Rq , нм	Sa , нм	Sq , нм	Ra , нм	Rq , нм	Sa , нм	Sq , нм
39,25	33,21	7,18	8,78	272	237,91	33,26	38,14	345,38	277,12	102,9	120,12

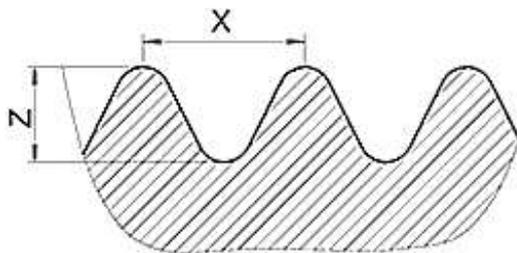


Рисунок 2 – Высота пиков Z и расстояние между соседними пиками X

Исследование параметров шероховатости поверхности образцов керамических элементарных нитей показало, что контактное взаимодействие отечественных нитей (образец №1) с рабочими органами машин и между собой будет выше, так как большему числу числа пиков – точек контакта на поверхности соответствует и большее число адгезионных мостиков.

Средняя высота пиков Z и расстояние между соседними пиками X (рисунок 2) во взаимно перпендикулярных направлениях по осям X и Y исходных СЗМ – изображений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Средняя высота пиков Z и расстояние между соседними пиками X

№ образца	Ось X				Ось Y			
	Среднее число пиков	Z/X			Среднее число пиков	Z/X		
		Макс.	Мин.	Сред.		Макс.	Мин.	Сред.
1	30,2	1,85	0,26	0,71	15,8	0,34	0,018	0,125
2	15,6	0,92	0,16	0,47	8,2	0,38	0,115	0,245
3	5,6	2,37	0,64	1,13	4,0	1,26	0,465	0,833

В третьей главе установлены зависимости характеристик внешнего трения керамических нитей – коэффициента трения и стабильности коэффициента трения от следующих параметров фрикционного контакта:

- значения параметра шероховатости Ra образцов цилиндрических выпуклых ГОСТ 9378-93;
- нормальной нагрузки в контакте;
- скорости скольжения нити по стальному телу трения;
- аспектного отношения текстуры поверхности.

В экспериментах использовались нити без замасливателя (вариант №1), нити, обработанные водной эмульсией препарата АВИБ-Б с концентрацией 8% (масс.) непосредственно после нанесения эмульсии на нити (вариант №2), после нанесения эмульсии препарата АВИБ-Б с концентрацией 8% (масс.) и сушки нитей (вариант №3).

Установлены следующие зависимости характеристик внешнего трения комплексных и крученых нитей от параметров фрикционного контакта:

- с уменьшением значения параметра Ra образцов шероховатости цилиндрических ГОСТ 9378-93 с 1,6 до 0,0125 мкм для всех трех вариантов коэффициент трения покоя комплексных нитей увеличивается в среднем на 95%, крученых нитей – на 145%;
- с увеличением нормальной нагрузки в контакте от 0,98 сН до 49 сН наблюдается уменьшение коэффициента трения покоя при продольном взаимном перемещении комплексных нитей для всех трех вариантов на 51%, 62% и 40% соответственно, при поперечном взаимном перемещении на 36%, 60% и 62% соответственно.
- с увеличением нормальной нагрузки в контакте от 0,98 сН до 49 сН наблюдается уменьшение коэффициента трения при продольном взаимном перемещении крученых нитей для всех трех вариантов на 28%, 27% и 32%, при поперечном взаимном перемещении на 14%, 19% и 14% соответственно.
- коэффициент трения движения пары «крученая нить – сталь» с ростом скорости скольжения нити по стальному телу трения от 4 до 100 м/мин увеличивается на 49%.

Исследована зависимость характеристик внешнего трения керамических нитей от пространственного параметра поверхности – аспектного отношения

текстуры поверхности пар трения. В качестве контрпар использовались образцы с аспектным отношением текстуры $Str \rightarrow 1$, т.е. с изотропной шероховатостью поверхности (пластины плоские стеклянные и стекло предметное) и образцы с аспектным отношением текстуры $Str \rightarrow 0$, т.е. с анизотропной шероховатостью поверхности (концевые меры длины стальные). Поверхность элементарных нитей имеет величину Str порядка 0,454...0,465. Установлено, что коэффициент трения покоя зависит от аспектного отношения текстуры поверхности пар трения.

В четвертой главе выполнены теоретические и экспериментальные исследования кручения нитей по способу отдельной подачи нитей в зону формирования. Кручение нитей выполнялось на универсальном комплексном крутильно – перемоточном стенде. Универсальный стенд предназначен для выработки одиночных нитей (рисунок 3, а), однокруточных и многокруточных нитей (рисунок 3, б).

На рисунке 3:

- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. Привод мотальной головки | 6. Крутильная платформа №1 |
| 2. Мотальная головка и выходная бобина | 7. Крутильная платформа №2 |
| 3. Узел замасливания | 8. Привод крутильных платформ |
| 4. Узел формирования | 9. Пульт управления |
| 5. Бобинодержатель и входная бобина | |

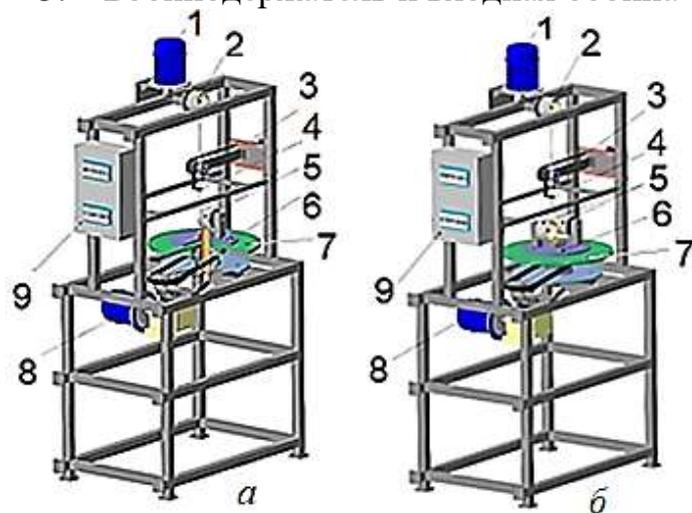


Рисунок 3 – Универсальный комплексный крутильно – перемоточный стенд для выработки одиночных нитей (а), однокруточных и многокруточных нитей (б)

Кручение нитей по способу отдельной подачи в зону формирования происходит следующим образом: нити (стренги) сматываются с входных бобин

1 в точках *A* и *B*. В вершине треугольника кручения точке *C* стренги №1 (*AC*) и №2 (*BC*) соединяются под углом $\alpha_1 + \alpha_2$, где начинается ее формирование и наматывается на выходную бобину 2 (рисунок 4, а). Узел формирования предназначен для силового воздействия на стренги 1 и 2, зарабатываемые в крученую нить 3 (рисунок 4, б).

Крутящим органом универсального стенда является крутильная платформа (рисунок 3). Исследование кручения по способу отдельной подачи и параметры структуры крученых нитей, вырабатываемых по способу отдельной подачи исследовались на однокруточной нити из двух стренг. Стренга №1 из углеродной нити, стренга №2 из кварцевого ровинга. Линейная плотностью каждой из стренг 200 текс. Натяжение каждой из стренг равно 20 сН. Число оборотов крутильной платформы, необходимых для формирования однокруточной углеродно-

кварцевой нити линейной плотностью 400 текс зависит от величины крутки. Так, например, для формирования нити с круткой, равной 45 кручений/м, необходимо пять оборотов крутильной платформы и двенадцать для нити с круткой 127 кручений/м (рисунок 4, б).

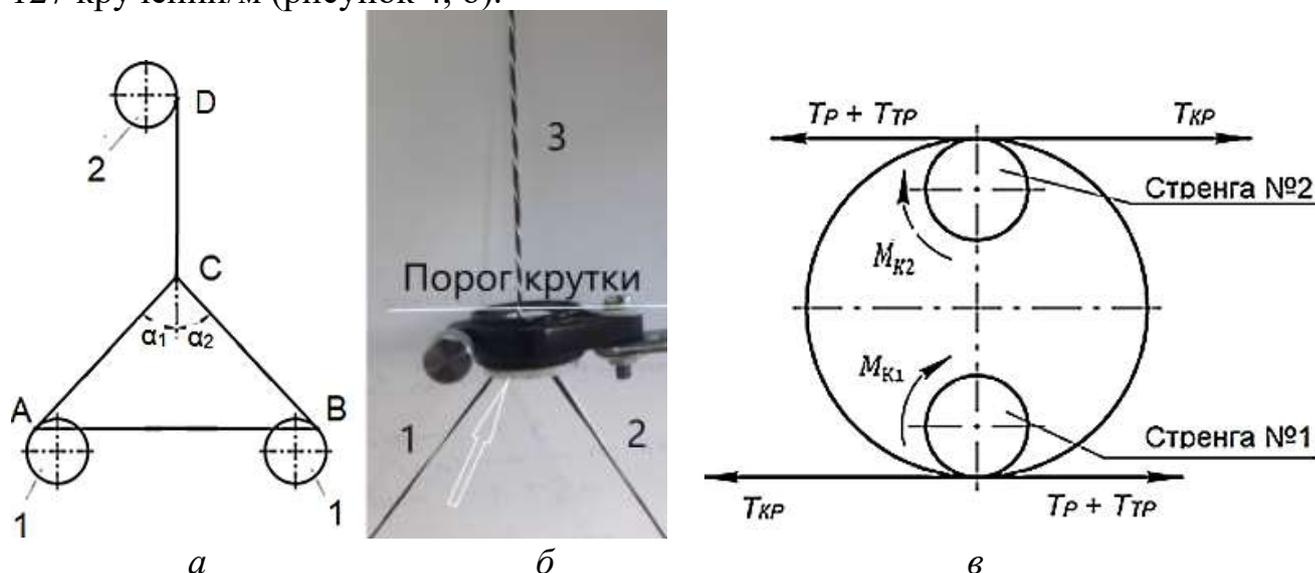


Рисунок 4 – Схема кручения по способу отдельной подачи (а), узел формирования – указан стрелкой (б), силовое взаимодействие стренг (в)

Кручение нити происходит на участке CD (рисунок 4, а) под действием силы T_{KP} , которой противодействует сила реакции T_P и сила трения T_{TP} . Сила T_{KP} возникает при скольжении стренг по внутреннему диаметру втулки узла формирования (рисунок 4, в). Сила T_{KP} создает крутящий момент для каждой из двух стренг.

$$M_{K1} = M_{K2} = T_{KP} l,$$

где l – плечо силы;

$$l = L_c / \cos \alpha,$$

где L_c – расстояние от точки контакта стренги с втулкой узла формирования до порога крутки; $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ – угол между осью стренги и осью крученой нити в вершине треугольника кручения (рисунок 4, а).

На пороге крутки в точке C на стренгу №1 действует сжимающая сила $T_2 \sin \alpha_2$, на стренгу №2 действует сжимающая сила $T_1 \sin \alpha_1$ (рисунок 5, а). Для случая, когда угол наклона осей стренг к оси крученой нити $\beta_1 = \alpha_1 = 38^\circ$ и $\beta_2 = \alpha_2 = 38^\circ$, и каждую из стренг действует сжимающая сила, равная 12,31 сН.

За порогом крутки в точке A на стренгу №1 действует сжимающая сила $T_2 \operatorname{tg} \beta_2$, на стренгу №2 действует сжимающая сила $T_1 \operatorname{tg} \beta_1$ (рисунок 5, б). В рассматриваемом случае для углеродно-кварцевой нити после первого оборота крутильной платформы угол наклона стренг к оси крученой нити составит $\beta_1 = \beta_2 = 20^\circ 42'$ (рисунок 7, б), и на каждую из стренг будет действовать сжимающая сила, равная 7,67 сН. На двенадцатом обороте крутильной платформы угол наклона осей

стренг к оси крученой нити уменьшается до $\beta_1 = \beta_2 = 18^\circ 57'$ (рисунок 7, в), и на каждую из стренг будет действовать сжимающая сила, равная 6,8 сН.

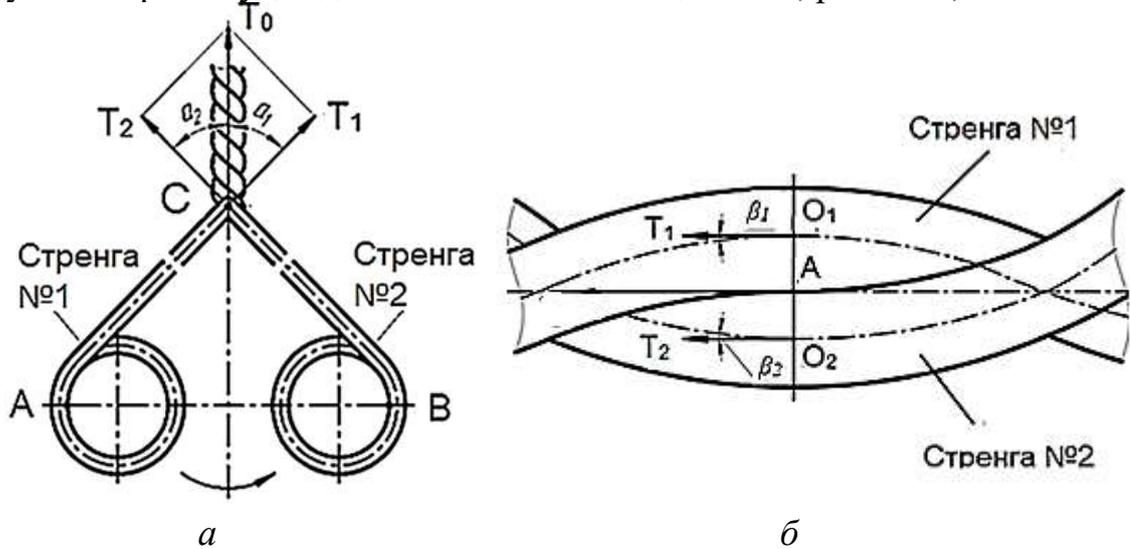


Рисунок 5 – Взаимодействия стренг с втулкой узла формирования (а), изменение плотности однокруточной нити в процессе формирования

В зоне формирования CD изменяются следующие параметры крученой нити: диаметр (рисунок 6, а), плотность (рисунок 6, б), угол наклона осей стренг к оси однокруточной нити (рисунок 7, а).

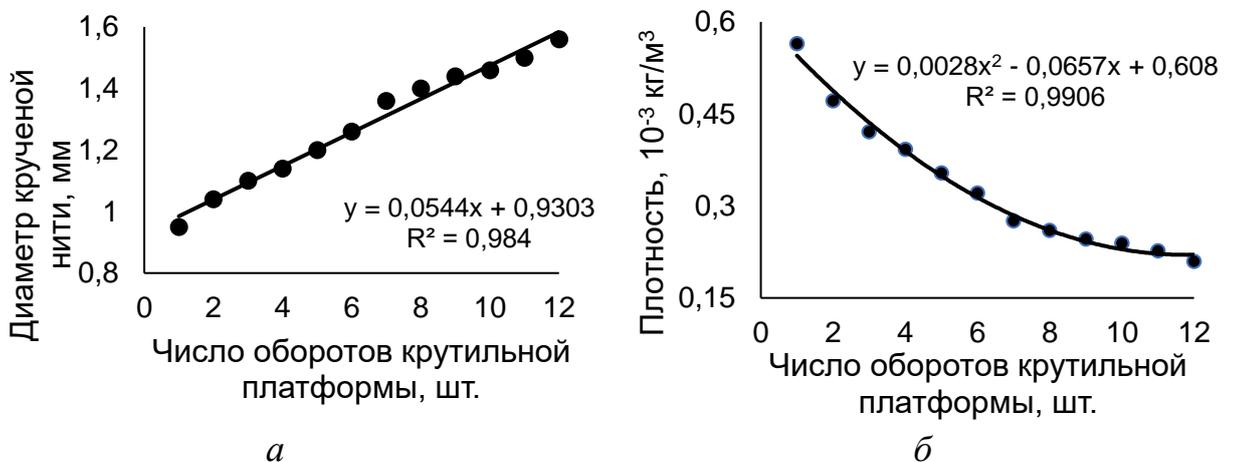


Рисунок 6 – Изменение диаметра (а) и изменение плотности (б) однокруточной нити в два сложения в процессе формирования

Активное нитесоединение приводит к увеличению плотности нитей, выработанных по способу отдельной подачи в зону формирования, по сравнению с нитями, выработанными по способу совместной подачи в зону формирования. Диаметр однокруточной углеродно-кварцевой нити в два сложения линейной плотностью 400 текс с круткой 127 кручений/м, выработанной по способу совместной подачи равен 1,9 мм, плотность равна 141 кг/м³. Диаметр углеродно-кварцевой нити два сложения линейной плотностью 400 текс с круткой 127 кручений/м, выработанной по способу отдельной подачи, равен 1,56 мм, плотность равна 209 кг/м³. Таким образом, диаметр нити, выработанной по способу

совместной подачи, больше на 21%, а плотность меньше на 48%, чем у нити, выработанной по способу отдельной подачи.

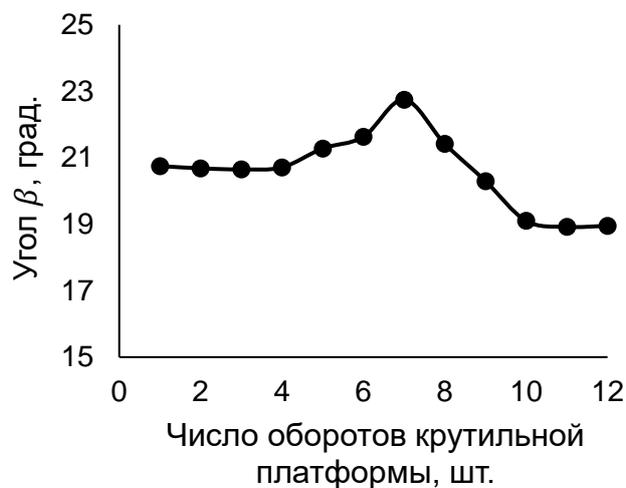
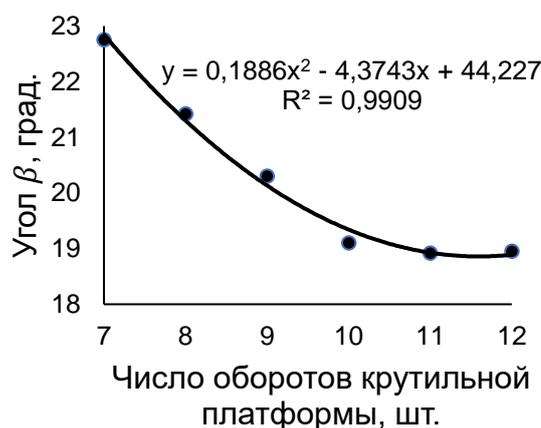
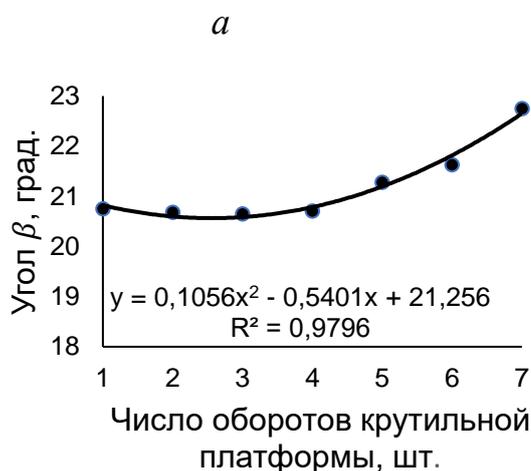


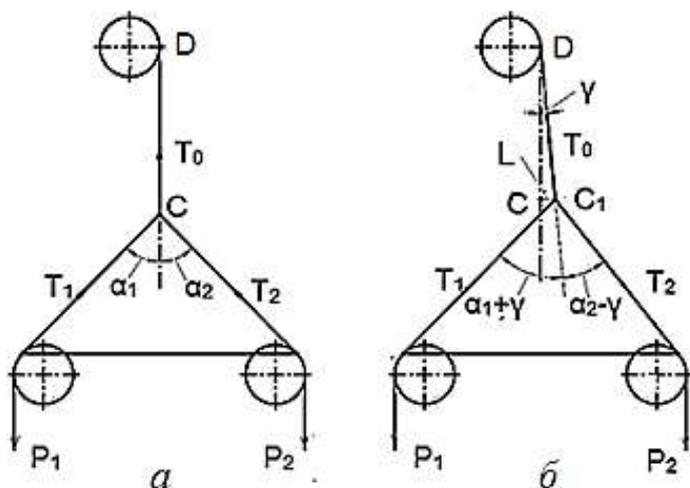
Рисунок 7 – Изменение угла наклона осей стренг к оси однокруточной нити в два сложения в процессе формирования с первого по двенадцатый оборот (а) и изменение угла наклона стренг с первого по седьмой (б) и с седьмого по двенадцатый оборот (в) крутильной платформы



Угол наклона осей стренг к оси однокруточной нити увеличивается от первого до седьмого оборота крутильной платформы (рисунок 7, б), а затем от седьмого до двенадцатого оборота уменьшается (рисунок 7, в). Это вызвано тем, что на первом этапе формирования от первого до седьмого оборота диаметр крученой нити увеличивается на 30%, и одновременно с этим шаг винтовой линии увеличивается на 26%. На втором этапе формирования от седьмого до двенадцатого оборота диаметр увеличивается только на 14%, а шаг увеличивается на 40%.

Исследование влияния неравноты натяжения стренг на образование порока штопорная крутка проводилось непосредственно на универсальном стенде. Методика эксперимента предусматривала обеспечение равноты натяжения стренг $T_1 = T_2$ нагрузкой $P_1 = P_2$, приложенной к соответствующим стренгам (рисунок 8, а). Натяжение стренг №1 и №2, равное 20 сН и 40 сН, создавалось гирями лабораторными. Нагружая стренгу №2 дополнительными гирями, обеспечивалась неравнота натяжения стренг от 0,5 до 3 сН. В этом случае при

$P_1 < P_2$ и $T_1 < T_2$ происходит перемещение вершины треугольника кручения на величину L из точки C в точку C_1 . (рисунок 8, б).



Соответственно, углы между осью однокруточной нити и осями стренг №1 и №2 на пороге крутки изменятся на угол γ . Для стренги №1: $\alpha_1 + \gamma$, для стренги №2: $\alpha_2 - \gamma$.

Рисунок 8 – Схематическое изображение образования порока штопорная крутка

Для оценки степени дефектности крученой нити при наличии порока штопорная крутка предлагается использовать коэффициент штопорности – отношение тангенса угла стренги с меньшим наклоном к оси крученой нити к тангенсу угла стренги с бóльшим наклоном к оси крученой нити:

$$K_{\text{штопорн.}} = \text{tg } \beta_2 / \text{tg } \beta_1$$

Проведены измерения натяжения нити в установившемся режиме сматывания с входных бобин универсального стенда. В целом подтверждена стохастической независимости и стационарности результатов выборок результатов измерения натяжения. Проверка независимости и стационарности результатов измерения натяжения осуществлялась с использованием непараметрических статистических критериев, основанных на оперировании частотами или рангами.

Исследование влияния на натяжение нити параметров сматывания с входных бобин массой 0,15 кг и 0,075 кг показали, что величина расчетного и фактического натяжения нити отклоняется на 10% для бобин массой 0,15 кг и на 14% для бобин массой 0,075 кг. Коэффициент вариации по натяжению нити обусловлен изменением условий сматывания нитей с выходной бобины, в том числе массой входной бобины.

Пятая глава посвящена теоретическим и экспериментальным аспектам проектирования и выработке керамических крученых нитей.

С целью получения исходных данных для проектирования керамических крученых нитей исследованы общие свойства элементарных, комплексных и крученых нитей. Установлено, что распределение вероятностей диаметра элементарных нитей имеет нормальное распределение (распределение Гаусса). Отечественные элементарные и комплексные нити имеют бóльшую дефектность и неоднородность механических свойств по сравнению с нитями зарубежного производства.

Проведена однокритериальная оптимизации круток. В первой серии экспериментов критерием служила разрывная нагрузка. Получено следующее уравнение регрессии:

$$Y_R = 0,9 + 0,14x_1^2$$

Во второй серии экспериментов критерием служила неравновесность. Получено следующее уравнение регрессии:

$$Y_R = 6,8 - 2,09x_1^2 - 2,59x_2^2$$

Варьируемые факторы и их уровни при нахождении зависимости между величинами второй крутки нитей в два сложения и третьей крутки нитей в пять сложений многокруточных нитей структуры $TZK_1 \times 2SK_2 \times 5ZK_3$, где: T – линейная плотность комплексной нити; S, Z – направление крутки; K_1, K_2, K_3 – первая, вторая и третья крутки.

Рассчитана разрывная нагрузка одиночных, однокруточных и многокруточных нитей. Расчет разрывной нагрузки производился исходя из фактических прочностных свойств элементарных и комплексных нитей. Расчет разрывной нагрузки проводился по формулам К.И. Корицкого для одиночных крученых нитей:

$$P = P_0 (1 + \eta \mu \cos \beta_c \sin \beta_c), \quad (1)$$

где P_0 – разрывная нагрузка комплексной нити;

$\eta = 1 + 0,1 \sqrt[3]{m_0}$ – коэффициент, характеризующий структуру нити,

где m_0 – число элементарных нитей в комплексной нити;

μ – коэффициент трения покоя пары «нить – нить»;

β_c – средневзвешенное значение угла наклона элементарных нитей в крученой нити.

Для однокруточных и многокруточных нитей по формуле:

$$P_2 = P'_1 m_1 \cos \beta'_2, \quad (2)$$

где P'_1 – разрывная нагрузка одной стренги;

m_1 – число стренг в крученой нити;

β'_2 – угол наклона стренг к оси крученой нити в момент ее разрыва.

Расчет разрывной нагрузки одиночных и многокруточных керамических нитей 3M™ Nextel™ 312 3M Company, проведенный по известным исходным данным, показал, что эмпирические формулы (1) и (2) позволяют выполнять расчет разрывной нагрузки с достаточной точностью до 12%

Расчетная разрывная нагрузка P_p , рассчитанная по формуле (1), и фактическая разрывная нагрузка P_ϕ одиночных крученых нитей марок ОА–11–20×1–20, ОА–12–25×1–25, ОА–13–30×1–30 приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчетная разрывная нагрузка и фактическая разрывная нагрузка однокруточных нитей

Наименование параметра	Марка нити		
	ОА–11–20 ×1–20	ОА–12–25×1–25	ОА–13–30×1–30
P_p , Н	1,81	1,76	1,57
P_ϕ , Н	2,04	1,9	1,63

Предварительные эксперименты показали, что разрывная нагрузка однокруточных и многокруточных керамических нитей превышает расчетную разрывную нагрузку. Это связано с особенностями выработки нитей по способу отдельной подачи в зону формирования. С целью повышения точности расчетов в формулу расчета разрывной нагрузки однокруточных и многокруточных нитей (2) введен поправочный коэффициент пропорциональности k_1 , зависящий от числа стренг в крученой нити:

$$P_2 = P'_1 m_1 k_1 \cos \beta'_2, \quad (3)$$

где: k_1 – коэффициент пропорциональности, зависящий от числа стренг в крученой нити: при $m_1 = 2$ $k_1 = 2$; $m_1 = 3$ $k_1 = 1,3$; $m_1 = 4$ $k_1 = 1,8$.

Разрывная нагрузка P_2 керамических однокруточных и многокруточных нитей, рассчитанная по формуле (3) и удельная разрывная нагрузка P_y представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетная разрывная нагрузка и удельная разрывная нагрузка однокруточных и многокруточных нитей

Марка крученой нити	Линейная плотность, текс	P_2 , Н	P_y , сН/текс
ОА–11–20×1×3–60	60	7,05	11,75
ОА–11–20×1×3×2–120	120	16,91	14,09
ОА–12–25×1×2–50	50	4,22	8,44
ОА–12–25×1×2×2–100	100	11,39	11,39
ОА–13–30×1×4–120	120	11,21	9,34
ОА–13–30×1×4×2–240	240	23,81	9,92

Исследована структурная неровнота одиночных крученых нитей марки ОА–12–25×1–25 с круткой равной 20, 40, 60, 80 кручений/м на приборе USTER TESTER 4–SE. Кроме средней линейной неровноты $U, \%$ и средней квадратичной неровноты $CV_m, \%$ (таблица 5) определены характеристики пороков одиночной крученой нити при установленном пороге чувствительности. Величина порока утоненные участки получена при установленном пороге чувствительности минус 40% и минус 50%. Величина порока утолщенные участки при установленном пороге чувствительности плюс 35% и плюс 50%. Величина порока несп при установленном пороге чувствительности плюс 200% и плюс 280%.

Таблица 5 – Параметры неровноты и характеристики пороков одиночных нитей

Наименование параметра неровноты	Крутка, кручений/м			
	20	40	60	80
Средняя линейная неровнота, %	19,8	15,87	12,45	12,31
Средняя квадратичная неровнота, %	23,95	20,03	15,62	15,71
Утоненные участки – 40%, шт. на 1 км	7920	2680	300,0	280,0
Утоненные участки – 50%, шт. на 1 км	2040	720,0	60,0	60,0
Утолщенные участки +35%, шт. на 1 км	2300	1100	0,00	0,00
Утолщенные участки +50%, шт. на 1 км	580,0	120,0	0,00	0,00
Непсы +200%, шт. на 1 км	3080	1780	0,00	0,00
Непсы +280%, шт. на 1 км	760,0	220,0	0,00	0,00

Из данных, представленных в таблице 5, можно видеть, что неровнота нитей по линейной плотности и количество пороков уменьшаются с увеличением крутки.

Выработка крученых нитей опытной партии осуществлялась в соответствии временным технологическим регламентом ВТР №1 – 2018. Разрывная нагрузка крученых нитей определялась по ГОСТ 6611.2-73. Зажимная длина образцов 250 мм, скорость перемещения зажима разрывной машины 10 мм/мин. В таблице 6 приведены разрывная нагрузка (P), удельная разрывная нагрузка (P_y), удлинение (δ), неравновесность (H) керамических крученых нитей опытной партии. Число испытаний $m = 5$, так как проведенные исследования не выявили изменения основных числовых характеристик случайных величин для случаев с числом испытаний $m = 30$ и $m = 240$.

Таблица 6 – Механические свойства крученых нитей опытной партии

Марка крученой нити	Наименование параметра			
	P , Н	P_y , Н/текс	δ , %	H , витки
ОА–11–20×1×3–60	6,82	11,37	0,637	7
ОА–11–20×1×3×2–120	18,74	15,62	0,934	7
ОА–12–25×1×2–50	3,67	7,65	0,590	7
ОА–12–25×1×2×2–100	11,69	12,18	0,604	7
ОА–13–30×1×4–120	12,09	10,42	0,623	7
ОА–13–30×1×4×2–240	24,66	10,63	0,739	6

Разрывная нагрузка крученых нитей, выработанных по способу совместной подачи, представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Разрывная нагрузка крученых нитей, выработанных по способу совместной подачи

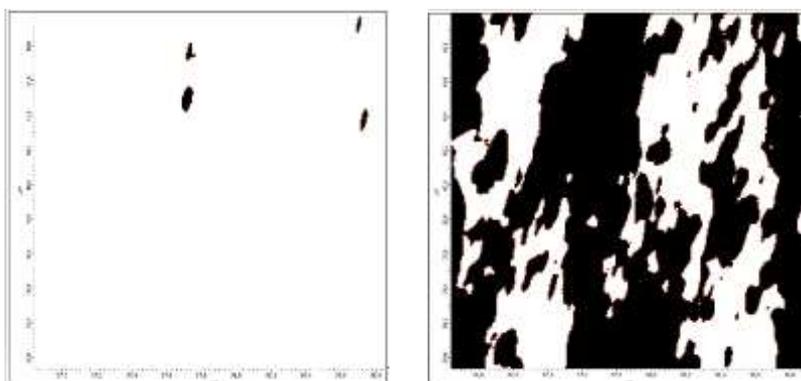
Марка крученой нити	Разрывная нагрузка, Н
ОА–12–25×1×2×2–100	6,08
ОА–11–20×1×3×2–120	10,23
ОА–13–30×1×4×2–240	12,14

Как можно видеть из данных, представленных в таблице 7, разрывная нагрузка крученых нитей, выработанных по способу отдельной подачи в зону формирования (таблица 6), превышает разрывную нагрузку нитей, выработанных по способу совместной подачи в зону формирования, на 92% для нитей марки ОА–12–25×1×2×2–100, на 83% для нитей марки ОА–11–20×1×3×2–120, на 103% для нитей марки ОА–13–30×1×4×2–240. Значительные различие между разрывной нагрузкой нитей, выработанных двумя способами на универсальном стенде, подчеркивает специфику кручения по способу отдельной подачи нитей в зону формирования.

Шестая глава посвящена проектированию и выработке шнуров наполненных и кольцевых волокнистых уплотнений.

Наполнители высокотемпературных шнуров изготавливают из волокон, нетканых материалов, ровинга или крученых нитей, что приводит к различиям в размерах микроканалов и величине общей пористости. При поперечной деформации уплотнения в сальниковой камере происходит увеличение плотности и снижение общей пористости за счет уменьшения объема межконтактного пространства.

Анализом СЗМ – изображений поверхности керамических элементарных нитей установлено, что объем межконтактного пространства зависит от сближения элементов волокнистого материала уплотнения. С уменьшением расстояния от базовой плоскости с $Z=18$ нм (рисунок 9, а) до $Z=8$ нм (рисунок 9, б) объем межконтактного пространства уменьшается в 6,25 раза.



а)

б)

Рисунок 9 – СЗМ-изображения с расстояниями от базовой плоскости $Z=18$ нм (а), $Z=8$ нм (б)

Исследована зависимость плотности и коэффициента покрытия шнура наполненного от диаметра шнура. Шнуры выработывались с варьированием линейной плотности наполнителя без изменения линейной плотности нитей оплетки. Установлено, что с увеличением диаметра шнура плотность увеличивается (рисунок 10, а), в то время как с увеличением диаметра шнура коэффициент покрытия уменьшается (рисунок 10, б). Таким образом, варьируя

массу нитей оплетки и наполнителя, можно вырабатывать шнуры наполненные различной плотности.

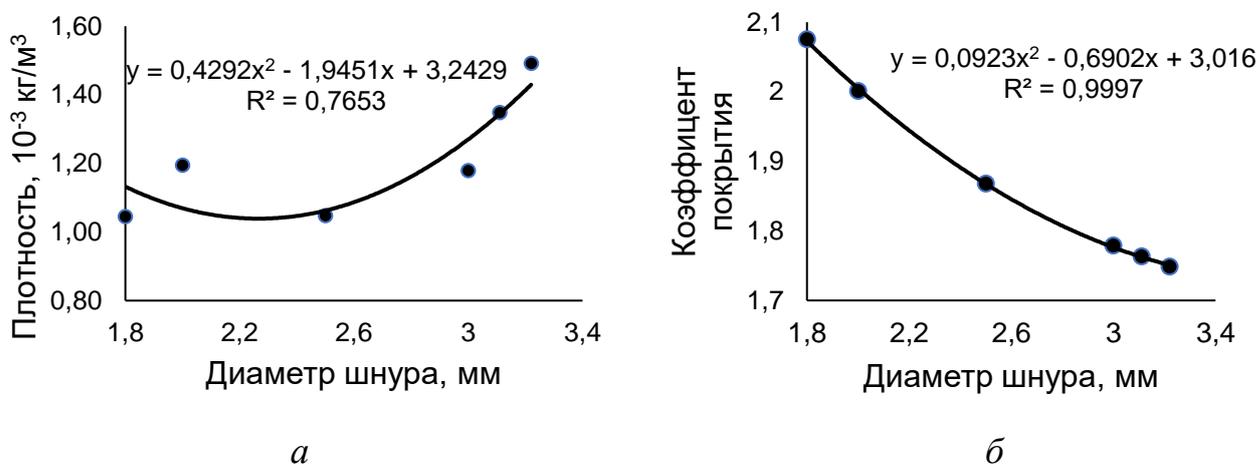


Рисунок 10 – Зависимость плотности (а) и коэффициента покрытия (б) от диаметра шнура

С целью проведения более полного анализа структуры шнуров наполненных предлагается ввести новый параметр коэффициент массового отношения – K_{MO} . Коэффициент массового отношения определяется из следующего выражения:

$$K_{MO} = \frac{m_O}{m_H},$$

где: m_O – масса оплетки шнура наполненного;

m_H – масса наполнителя шнура наполненного.

Коэффициент массового отношения дает полное и объективное представление о структуре шнуров наполненных.

Оплетка шнура наполненного в узле уплотнения под сжимающей нагрузкой представляет собой тонкостенную изотропную оболочку, находящуюся под действием внутреннего давления. Таким образом, расчет разрывной нагрузки нитей оплетки необходимо проводить исходя из известной величины внутреннего давления. Формула расчета разрывной нагрузки нитей оплетки, находящейся под действием внутреннего давления, по формуле К.И. Корицкого имеет следующий вид:

$$P_p = \frac{PzD_1^2}{0,735n_1Nk}, \quad (4)$$

где P – давление на нити оплетки, МПа;

z – запас прочности;

D_1 – диаметр наложения оплетки, м;

n_1 – число нитей в пряди (элемент оплетки в виде нескольких нитей, прилегающих одна к другой и расположенных параллельно в один ряд);

N – число прядей в оплетке;

k – коэффициент использования прочности нити.

Формула расчета числа нитей в потоке К.И. Корицкого имеет следующий вид:

$$n_1 = \frac{2\pi D_1 \cos \beta \eta}{Nd_1}, \quad (5)$$

где $D_1 = 0,0134$ – диаметр наложения оплетки, м;

$d_1 = 0,0005$ м – диаметр нити;

$\beta = 45^\circ$ – угол расположения нитей оплетки;

$\eta = 0,8$ – коэффициент смятия нити.

Расчетное значение $n_1 = 3,97$ округляем до $n_1 = 4$. Для значений $P = 1,67$ МПа, $z = 2$, $N = 24$, $k = 1$ разрывная нагрузка нитей в пряди равна 8,29 Н.

Разрывная нагрузка одной кремнеземной крученой нити К11С6-180 по данным производителя равна 39 Н. Несмотря на то, что фактическая разрывная нагрузка даже при $n_1 = 1$ превышает расчетную, с целью обеспечения 100% покрытия, т.е. $K_{\Pi} = 2$ в шнуре ШКН(Н) –1–14 используются нити оплетки в два сложения ($n_1 = 2$).

Выработка шнура наполненного выполнялась согласно временного технологического регламента ВТР №2–2019. Оплетка выполнена из крученых нитей марки ОА–13–30×1×4×2–240 в два сложения, наполнитель из крученых нитей марки ОА–11–20×1×3×2–120 в двадцать сложений. Диаметр шнура наполненного марки ШОАН (К) – 2,5 из керамических крученых нитей составляет 2,45 мм, масса 1 м – 7,82 г, плотность – 960 кг/м³.

Расчет разрывной нагрузки нитей оплетки шнура наполненного диаметром 14 мм, проведенный при $z = 2$, $n_1 = 2$ и $N = 8$ по формулам (4) и (5), дает значение разрывной нагрузки нитей оплетки. 49,77 Н. Керамические крученые нити марки ОА–13–30×1×4×2–240 в два сложения имеют разрывную нагрузку 49,32 Н, что обеспечивает двукратный запас прочности оплетки шнура из крученых керамических нитей. Таким образом, крученые нити ОА–13–30×1×4×2–240 могут быть использованы для выработки шнуров наполненных диаметром до 14 мм включительно, что является актуальным для проектирования тепловой защиты перспективных ГЛА.

Критический диаметр для шнура наполненного производства Lewis Research Center Cleveland (США) тип АС1 равен 411 мм, а отношение диаметра шнура к критическому диаметру равно 0,036. Шнур ШОАН(К) – 2,5 имеет аналогичную структуру и материал наполнителя и оплетки – керамические крученые нити. Исходя из вышесказанного, критический диаметр шнура должен быть равен 67 мм. Шнур ШОАН(К) – 2,5, изогнутый на цилиндре диаметром 40 мм не имеет повреждений нитей оплетки (рисунок 11). Отношение диаметра шнура ШОАН(К) – 2,5 к критическому диаметру равно 0,0612. Таким образом, шнур ШОАН(К) – 2,5 в 1,7 раза более гибкий, чем шнур тип АС1.



Рисунок 11 – Шнур ШОАН(К) – 2,5, изогнутый на цилиндре диаметром 40 мм

Одной из задач диссертационного исследования является разработка конструкции высокотемпературного кольцевого волокнистого уплотнения, работающего при высоких температурах в уплотнительных узлах энергетического, металлургического оборудования и ракетно-космической техники. Кольцевое уплотнение должно иметь низкую

стоимость, обладать высокой технологичностью изготовления.

В соответствии с вышеперечисленными требованиями разработана конструкция, способ изготовления высокотемпературного кольцевого волокнистого уплотнения и получен патент RU 2722681 «Сальниковое высокотемпературное уплотнение».

Высокотемпературное кольцевое волокнистое уплотнение состоит из сердцевины 1 и обмотки 2 (рисунок 12, а). Высокотемпературное кольцевое волокнистое уплотнение может иметь круглую (рисунок 12, а) и квадратную (рисунок 12, б) форму поперечных сечений.

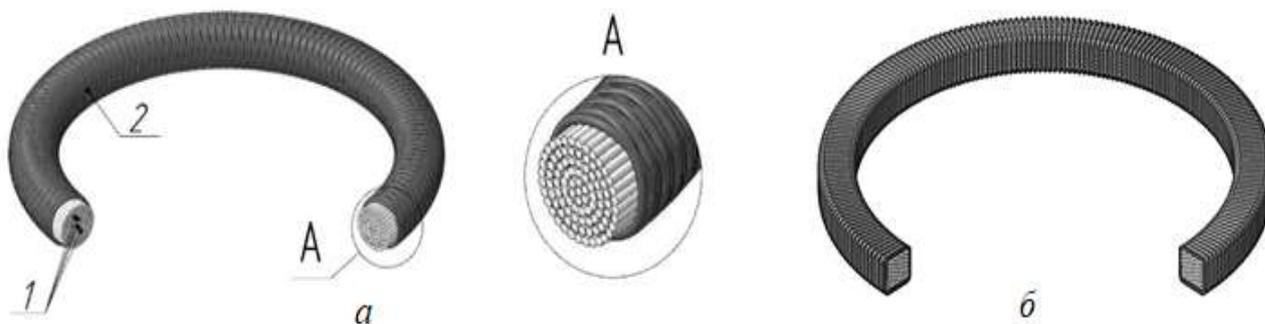


Рисунок 12 – Высокотемпературное кольцевое волокнистое уплотнение круглой (а) и квадратной (б) поперечной формой сечения

С целью выработки высокотемпературных кольцевых волокнистых уплотнений оптимальной структуры исследовано влияния натяжения нитей при намотке сердцевины и натяжения нитей при обмотке сердцевины на плотность кольцевого волокнистого уплотнения. Проведены эксперименты, в которых варьировалось удельное натяжение нитей при намотке на оправку в пределах от 0,056 до 0,278 сН/текс и удельное натяжение нитей при обмотке сердцевины от 0,556 до 2,78 сН/текс. Материал сердцевины и обмотки – кремнеземные крученые нити марки К11С6–180 производства АО «НПО Стеклопластик».

Удельное натяжение нитей при намотке на оправку, плотность и общая пористость сердцевины кольцевого волокнистого уплотнения представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Удельное натяжение нитей при намотке на оправку, плотность и общая пористость сердцевины кольцевого уплотнения

Наименование параметра	Удельное натяжение нитей при намоте, сН/текс						
	0,056	0,111	0,139	0,194	0,222	0,250	0,278
Плотность, кг/м ³	523	584	640	748	841	925	988
Общая пористость, %	74,57	71,60	68,88	63,63	59,11	55,03	51,96

Максимальная плотность сердцевины, равная 988 кг/м³, достигается при намотке на оправку с удельным натяжением нитей 0,278 сН/текс (таблица 8). Для керамических крученых нитей марки ОА–13–1 × 4 × 2–240 удельное натяжение нитей обмотки, равное 0,278 сН/текс, составляет 2,8% от удельной разрывной нагрузки, равной 10,63 сН/текс (таблица 6), что является приемлемым.

Удельное натяжение нитей при обмотке сердцевины, плотность и пористость кольцевого волокнистого уплотнения представлены в таблице 9. Плотность сердцевины перед обмоткой 523 кг/м³.

Таблица 9 – Удельное натяжение нитей обмотки, плотность и пористость кольцевого уплотнения, плотность сердцевины перед обмоткой 523 кг/м³

Наименование параметра	Удельное натяжение нитей при обмотке, сН/текс				
	0,556	1,111	1,667	2,222	2,778
Плотность, кг/м ³	642	745	867	925	1144
Общая пористость, %	74,57	72,87	71,60	68,88	65,92

Удельное натяжение нитей при параллельной обмотке сердцевины, плотность и пористость кольцевого уплотнения представлены в таблице 10. Плотность сердцевины перед обмоткой 988 кг/м³.

Таблица 10 – Удельное натяжение нитей обмотки, плотность и пористость кольцевого уплотнения, плотность сердцевины перед обмоткой 988 кг/м³

Наименование параметра	Удельное натяжение нити при обмотке, сН/текс				
	0,556	1,111	1,667	2,222	2,778
Плотность, кг/м ³	1088	1114	1247	1355	1411
Общая пористость, %	47,10	45,84	39,37	34,12	31,39

Максимальная плотность уплотнения, равная 1411 кг/м³, и, соответственно, минимальная общая пористость, равная 31,39%, достигается при удельном натяжении нитей обмотки 2,778 сН/текс (таблица 10).

Для керамических крученых нитей марки ОА–13–1 × 4 × 2–240 удельное натяжение нитей обмотки, равное 2,778 сН/текс, составляет 27% от удельной разрывной нагрузки, равной 10,63 сН/текс (таблица 6), что является приемлемым. С целью исследования влияния на плотность и пористость кольцевого волокнистого уплотнения натяжения нитей при намотке сердцевины проведен эксперимент, в котором удельное натяжение нитей при намотке на оправку варьировалось от 0,056 до 0,5 сН/текс, удельное натяжение нити при обмотке сердцевины оставалось постоянным и равнялось 0,566 сН/текс. В эксперименте для намотки сердцевины использованы кремнеземные крученые нити марки

K11С6–180. Обмотка выполнялась крученой нитью K11С6–180, шаг обмотки 15 мм. Удельное натяжение нитей при намотке на оправку, плотность и общая пористость кольцевого волокнистого уплотнения, удельное натяжение нити при обмотке 0,566 сН/текс представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Удельное натяжение нитей при намотке, плотность и пористость кольцевого волокнистого уплотнения

Наименование параметра	Удельное натяжение нити при намоте, сН/текс								
	0,056	0,111	0,167	0,222	0,278	0,333	0,389	0,444	0,500
Плотность, кг/м ³	523	584	701	841	988	1080	1209	1302	1417
Пористость, %	74,57	71,60	65,92	59,11	51,96	47,50	41,20	36,70	31,10

Максимальная плотность волокнистого уплотнения равна разнице между плотностью материала уплотнения и плотностью газа в порах между волокнами и элементарными нитями. Плотность кремнеземных материалов равна 2056 кг/м³. Максимальная плотность сердцевины кольцевого уплотнения, полученная расчетным путем, равна 1967 кг/м³, а общая пористость равна 4,3%.

Установлено, что возможна выработка кольцевых уплотнений, имеющих низкие отклонения по плотности и общей пористости, равными 1411 кг/м³ и 31,39% (таблица 10), 1417 кг/м³ и 31,1 % (таблица 11). Плотность кольцевых уплотнений составляет около 70% от теретически возможной, и увеличение натяжения нитей при намотке на оправку и обмотке не приводят к значительному изменению плотности и общей пористости.

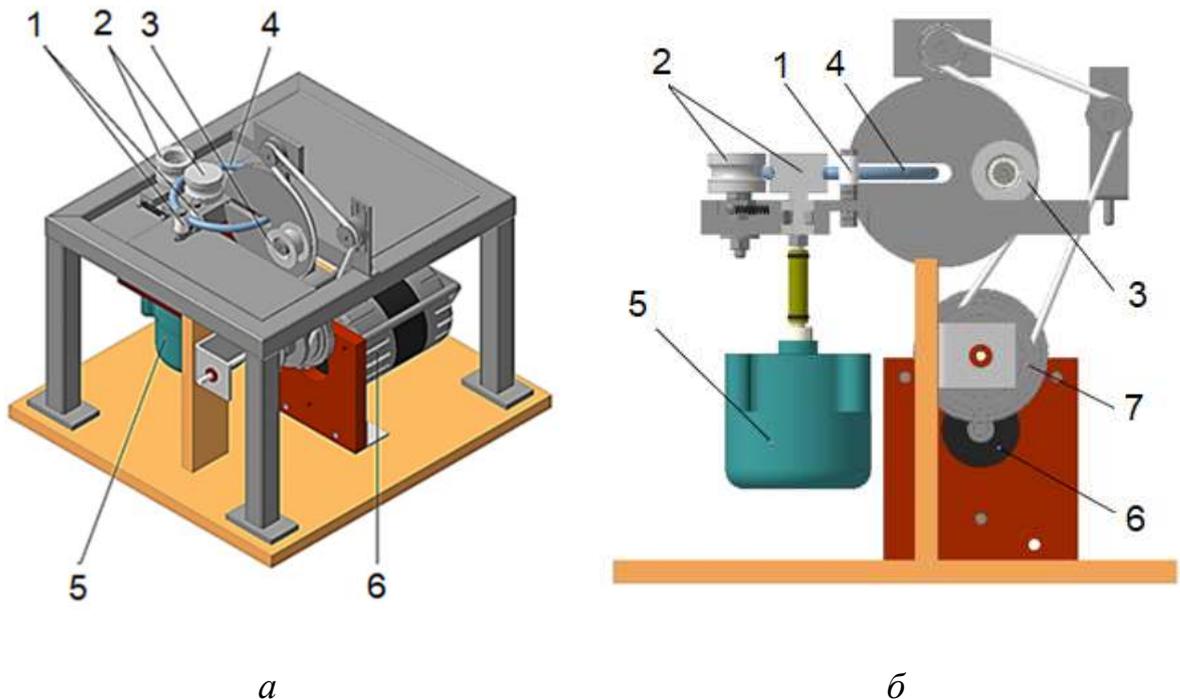


Рисунок 13 – Схематическое изображение обмоточного станка (а) и узла обмотки сердцевины (б)

Формирование сердцевины кольцевого волокнистого уплотнения выполняется намоткой на оправку, намотка нити на оправку параллельная, т.е. шаг витков между соседними нитями равен толщине нити. После завершения намотки сердцевина снимается с оправки и устанавливается в обмоточный станок (рисунок 13, а). Сердцевину 4 устанавливают в направляющих роликах 1 и транспортирующих роликах 2, расположенных на столе обмоточного станка. Транспортирующие ролики имеют проточку по размерам и форме поперечного сечения кольцевого уплотнения. Один из транспортирующих роликов – ведущий ролик кинематически связан с приводом 5, другой прижимает сердцевину с заданным усилием к ведущему ролику. Усилие прижима сердцевины к ведущему ролику выбирается исходя из жесткости сердцевины. Транспортирующие ролики предназначены для перемещения сердцевины относительно шпули 3 с лентой или нитью, расположенной на обмоточной головке (рисунок 13, б). Обмотка сердцевины выполняется кручеными нитями или лентой, размещенными на шпуле обмоточной головки. Блок сменных шкивов 7 привода 6 позволяет изменять шаг обмотки в заданных пределах (рисунок 13, б).

Кольцевые уплотнения, изготовленные по патенту, разработанному автором, имеют предельные отклонения по размерам поперечного сечения, наружному и внутреннему диаметрам до 0,1 мм. Контроль внутреннего диаметра $\text{Ø}40\text{H}9$ кольцевого волокнистого уплотнения $\text{Ø}56 \times \text{Ø}40 \times 8$ осуществлялся калибром-пробкой, проходной стороной (рисунок 14, а) и непроходной стороной (рисунок 14, б).

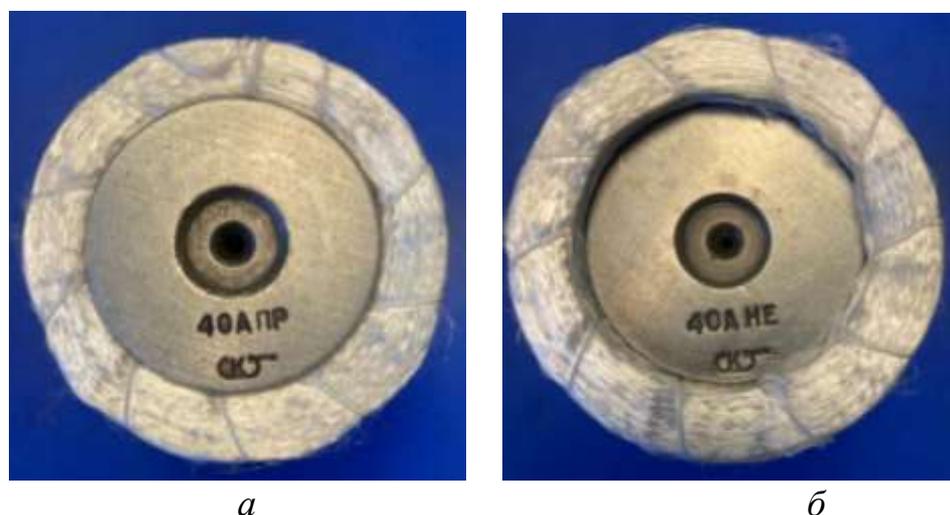


Рисунок 14 – Контроль внутреннего диаметра $\text{Ø}40\text{H}9$ кольцевого уплотнения калибром – пробкой, проходной стороной (а) и непроходной стороной (б)

Низкая величина предельных отклонений повышает эксплуатационные свойства кольцевых волокнистых уплотнений по сравнению со шнурами наполненными, позволяет повысить точность установки, унифицировать и выполнить условия взаимозаменяемости. Еще одним преимуществом кольцевых волокнистых уплотнений является большой диапазон размеров, форм поперечного сечения.

Микроструктура порового пространства высокотемпературного шнура наполненного марки ШКН(Н)–1–8 с наполнителем из кремнеземных нитей К11С6–180 и высокотемпературного кольцевого волокнистого уплотнения Ø56×Ø40×8 с сердцевинной из кремнеземного ровинга марки КР11С6–900 исследовалась методом компьютерной микротомографии (mCT) при разрешении съемки 1 ÷ 2 мкм. Морфометрические показатели по результатам анализа томографических данных получены при помощи программы CTan (CT analyzer 1.18.4.0 – штатном программном обеспечении, поставляемом производителем томографов ©Bruker SkyScan). Морфометрические параметры, определяемые с помощью компьютерной томографии в объемной структуре: толщина пор, закрытая пористость, открытая пористость, общая пористость.

Общая пористость – доля пор (%) в исследуемом объеме при разрешении съемки 1 – 2 мкм. Получение числовых показателей для твердой фазы и пористости выполнено по результатам расчета сегментированной структуры объемом 1мм³, состоящей из томографических срезов (слоев). Выбранное разрешение томографического исследования позволяет детектировать структурные элементы и поры на уровне мезо и микропористости (2 мкм и крупнее). Определены размеры объемных структурных элементов с использованием метода расчета локальной толщины объемных структур (таблица 12).

Таблица 12 – Размеры объемных структурных элементов шнура наполненного и кольцевого волокнистого уплотнения методами mCT

Наименование параметра	Ед. изм.	Шнур наполненный	Кольцевое уплотнение
Количество слоев	шт.	501	1001
Закрытая пористость	%	$1,85 \times 10^{-4}$	$89,3 \times 10^{-4}$
Открытая пористость	%	76,91	76,83
Общая пористость	%	76,91	76,83

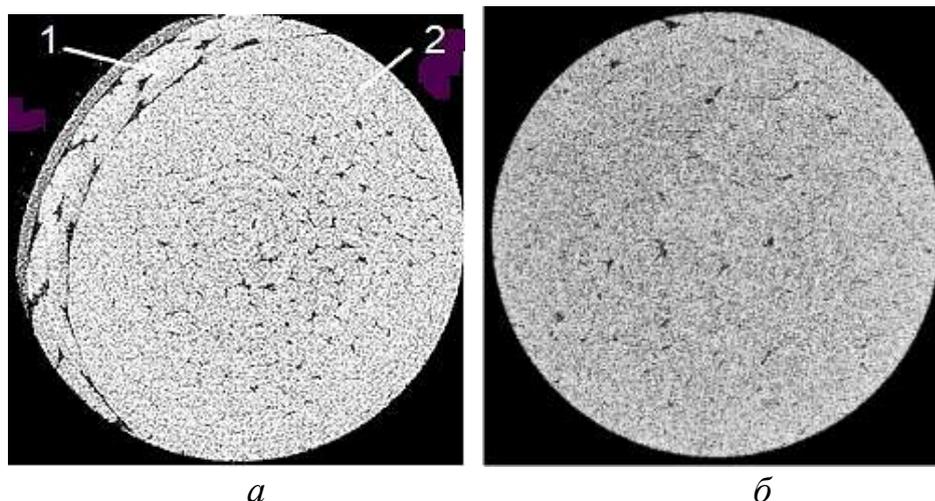


Рисунок 15 – Изображение сечения шнура наполненного (а) и кольцевого уплотнения (б)

Изображения сечения шнура наполненного (рисунок 15, а) и кольцевого уплотнения (рисунок 15, б), получены методом мСТ. На рисунке 15, а: 1 – оплетка шнура, 2 – наполнитель шнура.

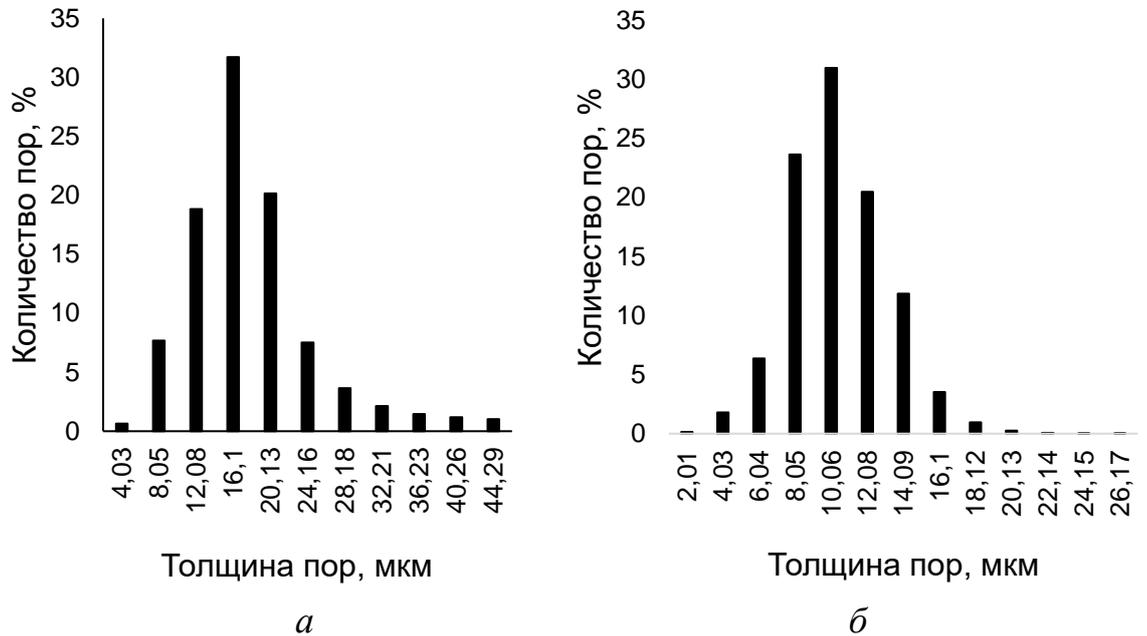


Рисунок 16 – Гистограммы распределения пор по толщине в исследованном объеме шнура наполненного (а) и кольцевого уплотнения (б)

Анализ гистограммам распределения пор по толщине в исследованном объеме шнура наполненного марки ШКН(Н) –1–8 (рисунок 16, а) и кольцевого волокнистого уплотнения $\text{Ø}56 \times \text{Ø}40 \times 8$ (рисунок 16, б) показал, что 97% пор шнура наполненного имеют толщину от 4,30 до 44,29 мкм, тогда как у кольцевого уплотнения 97% пор имеют толщину от 2,1 до 16,1 мкм.

Проведены испытания кольцевых волокнистых уплотнений на герметичность. Испытания на герметичность выполнялось на многофункциональном испытательном стенде для гидравлических испытаний «СИП-03» в испытательной лаборатории АО НПО «УНИХИМТЕК». Организационная процедура испытаний, включающая порядок проведения предварительных испытаний, устанавливается техническими условиями (ТУ), программой и методикой испытаний изготовителя. В связи с отсутствием требований изготовителя испытания проводили по методике испытательной лаборатории АО НПО «УНИХИМТЕК», разработанной согласно ГОСТ 33257–2015. Результаты испытаний на герметичность относительно внешней среды высокотемпературного кольцевого волокнистого уплотнения представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты испытаний кольцевого уплотнения на герметичность

Количество уплотнений	Испытательная среда	Давление, МПа	Время выдержки, мин.	Утечка по уплотнению
4	Вода	2	10	Нет

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Рост мирового рынка высокотемпературной изоляции по объему производства продукции за период с 2016 по 2019 год составил 8,2% при прогнозе 7,5% в год. Рост мирового рынка текстильных керамических материалов показал за тот же период среднегодовой рост 10,2% при прогнозе 9,94%. Таким образом, проводимое исследование, направленное на развитие производства текстильных керамических материалов отечественного производства, является актуальным, а результаты востребованными.

2. Методами фрактографии исследована поверхность разрушения элементарных нитей. На поверхности разрушения исследована сердцевина, состоящая из отдельных зерен либо групп зерен размерам от 200 до 700 нм с открытой пористостью и более плотная оболочка. Толщина оболочки, исследованной по изображениям, полученным методом растровой электронной микроскопии, составляет от 0,3 до 0,6 мкм. Зависимости толщины оболочки от диаметра исследованных элементарных нитей не обнаружено.

3. Методами СЗМ получены значения параметров структуры шероховатой поверхности элементарных нитей: параметры структуры Ra , Rq и параметры поверхности Sa , Sq образцов отечественных и зарубежных элементарных нитей.

4. Параметры профиля поверхности элементарных нитей характеризует опорная кривая профиля. Плотность вероятности распределения опорной кривой профиля описывается бета-функцией. При вычислении параметров функции плотности бета-распределения α и β опорной кривой профиля шероховатости должны быть известны параметры шероховатой поверхности Ra , Rq и параметры поверхности Sa , Sq .

5. Результаты исследования зависимости характеристик внешнего трения комплексных и крученых нитей от параметров фрикционного контакта показали, что:

- коэффициент трения покоя снижается при уменьшении значения параметра шероховатости Ra стальных контрпар;
- коэффициент трения покоя снижается с увеличением нагрузки в зоне контакта;
- коэффициент трения движения возрастает с ростом скорости скольжения нити по стальному телу трения
- коэффициент трения покоя зависит нитей от пространственного параметра поверхности – аспектного отношения текстуры поверхности пар трения;
- стабильность коэффициента трения в проведенных экспериментах по определению коэффициента трения находится в пределах от 82 до 98%.

6. Установлены особенности силового взаимодействия стренг при кручении нитей по способу отдельной подачи, которые проистекают из того, что стренги на пороге крутки соединяются под углом оси крученой нити. В зоне формирования изменяются параметры крученой нити: диаметр, плотность, шаг винтовой линии, угол наклона осей стренг к оси крученой нити.

7. Плотность крученой углеродно-кварцевой нити в два сложения линейной плотностью 400 текс, выработанных по способу отдельной подачи в зону формирования, на 48% выше, чем у аналогичной нити, выработанных по способу совместной подачи в зону формирования.

8. Исследован процесс образования порока штопорная крутка нитей. Показано, что с целью предотвращения образования порока штопорная крутка необходимо контролировать неравномерность натяжения стренг при сматывании с входных бобин в пределах разрешающей способности тестера натяжения ТНН –100, равной 0,1 сН. С целью оценки степени дефектности крученой нити вследствие порока штопорная крутка предлагается применять коэффициент штопорности – отношение тангенса угла стренги с меньшим наклоном к оси крученой нити к тангенсу угла стренги с большим наклоном к оси крученой нити.

9. Проведены измерения натяжения нити в установившемся режиме сматывания с входной бобины. Независимость и стационарность рассмотренных выборок результатов измерения натяжения подтверждены двумя непараметрическими критериями: критерием «восходящих» и «нисходящих» серий и критерием квадратов последовательных разностей (критерий Аббе).

10. Анализ зависимости прочности от диаметра керамических элементарных нитей и разрывной нагрузки керамических комплексных нитей от зажимной длины образцов показал ббольшую дефектность и неоднородность механических свойств образцов отечественных нитей по сравнению с зарубежными.

11. Выполнен расчет разрывной нагрузки одиночных, однокруточных и многокруточных нитей. Подтверждена адекватность выбранного алгоритма расчета разрывной нагрузки керамических крученых нитей, вырабатываемых по способу отдельной подачи нитей в зону формирования. Разница между расчетной и фактической разрывной нагрузкой составляет от 3% до 15%.

12. На основании экспериментов по разработке и апробации параметров технологического режима выработки крученых нитей разработан «Временный технический регламент на выработку керамических крученых нитей по способу отдельной подачи нитей в зону формирования» (ВТР №1 – 2018). Выработка одиночных, однокруточные и многокруточные нитей опытной партии проводилась по ВТР №1 – 2018. Определены механические свойства керамических крученых нитей.

13. Выработаны многокруточные нити по способу совместной подачи нитей в зону кручения, характерному для этажных и кольцевых крутильных машин. Разрывная нагрузка крученых нитей, выработанных по способу отдельной подачи, превышает разрывную нагрузку нитей, выработанных по способу совместной подачи, на 92% для нитей марки ОА–12–25×1×2×2–100, на 83% для нитей марки ОА–11–20×1×3×2–120, на 103% для нитей марки ОА–13–30×1×4×2–240.

14. Теоретические и экспериментальные исследования по проектированию и выработке крученых нитей подтвердили возможность выработки керамических крученых нитей из отечественного сырья с заданными характеристиками

механических свойств. Достигнут четвертый уровень готовности технологии производства керамических крученых нитей.

15. Проведен расчет разрывной нагрузки нитей оплетки высокотемпературных шнуров наполненных исходя из величины действующих на шнур сжимающих нагрузок и напряженно-деформированного состояния нитей оплетки.

16. Проведены проектирование, выработка и исследование параметров структуры шнуров наполненных. Исследованы зависимости параметров структуры: плотности, коэффициента покрытия, коэффициента массового отношения от диаметра шнуров наполненных экспериментальной партии. Исследование параметров проводились с целью выработки шнуров наполненных заданной плотности и минимальными предельными отклонениями по диаметру.

17. Исследование параметров структуры шнуров наполненных показали, что необходимо введение нового параметра, характеризующего структуру шнуров наполненных – коэффициента массового отношения. Коэффициент массового отношения определяется отношением массы оплетки к массе наполнителя шнура наполненного. Коэффициент массового отношения может использоваться для анализа структуры и как нормируемый параметр при проектировании шнуров наполненных и других типов гибких высокотемпературных уплотнений.

18. На основании экспериментов по разработке и апробации параметров технологического режима выработки шнуров наполненных разработан «Временный технический регламент на выработку шнуров наполненных из керамических крученых нитей» (ВТР – 2019). Выработка шнура наполненного из отечественных керамических крученых нитей проводилась по ВТР – 2019.

19. Проведены исследования по определению критического диаметра шнура марки ШОАН(К) – 2,5. Отношение диаметра шнура марки ШОАН(К) – 2,5 к критическому диаметру равно 0,0612, что в 1,7 раза больше, чем у шнура наполненного тип АС1 производства Lewis Research Center (США). Таким образом, шнур ШОАН(К) – 2,5 в 1,7 раза более гибкий, чем шнур тип АС1.

20. Проведены проектирование и выработка высокотемпературных кольцевых волокнистых уплотнений. Рассмотрены вопросы обеспечения минимальных предельных отклонений по размерам поперечного сечения, наружному и внутреннему диаметрам уплотнения.

21. Проведены исследования микроструктуры порового пространства высокотемпературного шнура наполненного марки ШКН(Н) –1–8 плотностью 625 кг/м^3 и высокотемпературного кольцевого волокнистого уплотнения плотностью 614 кг/м^3 методами мСТ. Результаты исследования показали, что 97% пор шнура наполненного имеют толщину пор от 4,30 до 44,29 мкм, тогда как у кольцевого уплотнения 97% пор имеют толщину от 2,1 до 16,1 мкм.

22. Проведены испытания высокотемпературных кольцевых волокнистых уплотнений на герметичность. Кольцевые уплотнения обеспечивают герметичность относительно внешней среды до 2 МПа включительно.

23. Достигнут второй уровень технологии производства гибких высокотемпературных уплотнений из отечественных керамических крученых нитей.

24. Результаты диссертационного исследования использовались АО «Композит» при выполнении ОКР по теме «Разработка технологии изготовления работоспособных в окислительных средах теплоизоляционных материалов и герметизирующих гибких уплотнений для ГЛА и тракта ГПВРД, объемно – армированных структур эластичного шарнира поворотного управляемого сопла РДТТ», шифр НИР: «Сборка».

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Медведев, А.В. Шероховатость поверхности элементарных нитей из оксида алюминия/ А.В. Медведев, А.А. Серцова, К.Э. Разумеев // Стекло и керамика. – 2012. – №6– С. 17 – 23.

2. Исследование скорости растяжения на прочность нитей из тугоплавких волокон оксида алюминия/ А.В. Медведев, А.Ф. Капитанов, А.В. Курденкова, А.М. Зимичев [и др.] // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2013. – №1.– С. 163–165.

3. Медведев, А.В. Микроструктура поверхности излома элементарных нитей из оксида алюминия / А.В. Медведев, К.Э. Разумеев // Стекло и керамика. – 2012. –№2 – С. 1– 4.

4. Медведев, А.В. Крученые нити из оксида алюминия для изделий технического назначения/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев //Швейная промышленность. – 2014. – №2. – С. 18–20.

5. Медведев, А.В. Текстильные фильтры из оксида алюминия для фильтрационного рафинирования жидких металлов/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев, С.В. Матвеев //Технология металлов. –2015. – №3. – С. 29–33.

6. Медведев А.В. Крученые нити из оксида алюминия для термоэлектрической изоляции гибких термопар/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев, В.К. Разумеев //Швейная промышленность. – 2015. – №1, 2.– С. 29–33.

7. Медведев, А.В. Гибкие термопары с изоляцией из крученых нитей оксида алюминия для контроля воспроизведения температурного режима теплофизических экспериментов/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев //Технология металлов. –2015. – №6. – С. 33–38.

8. Сцепуржинская, З.Р. Влияние замасливателя на трибологические свойства фрикционной пары комплексная нить из оксида алюминия – сталь/ З.Р. Сцепуржинская, А.В. Медведев, К.Э. Разумеев// Химические волокна. –2016. – №1. – С. 52 – 54.

9. Медведев, А. Анализ и оценка погрешностей измерения натяжения нитей из оксида алюминия при перематке и кручении/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев// Химические волокна. –2016. – №1. – 66–69
10. Медведев, А.В. Исследование трибологических свойств фрикционной пары «комплексная нить из оксида алюминия –сталь»/ А.В. Медведев, З.Р. Сцепуржинская //Технология металлов. –2016. – №6. – С. 6–8.
11. Медведев, А.В. Измерение натяжения нити из оксида алюминия при перематке и кручении на экспериментальном стенде/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев //Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. – 2016. – №4. – С. 25–29.
12. Жариков, Е.И. Исследование удлинения при разрыве крученых нитей из оксида алюминия в условиях полнофакторного эксперимента по оптимизации круток/ Е.И. Жариков, А.В. Медведев// Химические волокна. – 2016. – № 5. – С. 81 – 83.
13. Жариков, Е.И. Исследование неравновесности крученых нитей из оксида алюминия в условиях оптимизации круток / Е. И. Жариков, А. В. Медведев // Химические волокна. – 2017. – № 1. – С. 42-44.
14. Medvedev, A.V. Absorption plasticization of alumina ceramic fiber//Polymer Science, Series D. – 2017, Volume 10. Issue 4. – p. 337–340.
15. Медведев, А.В. Особенности радиального сматывания нитей из оксида алюминия с вращающейся катушки/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев //Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. – 2017. – №2. – С. 88–90.
16. Медведев, А.В. Особенности изменения натяжения при сматывании нитей из оксида алюминия с вращающейся катушки/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев //Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. – 2017. – №2. – С. 161–165.
17. Медведев, А.В. Исследование структуры поверхности отечественных и зарубежных нитей из оксида алюминия профильными методами/ А.В. Медведев // Вестник СПГУТД. Серия 1. Естественные и технические науки. – 2017. – № 4. – С. 92–97.
18. Медведев, А.В. Исследование влияния шероховатости поверхности стальных образцов на смачиваемость замасливающей эмульсией/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 1– С. 191–197.
19. Медведев, А.В. Трибологические свойства комплексных нитей из оксида алюминия/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев //Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. – 2018. – № 1– С. 34–37.
20. Медведев, А.В. Исследование оптимальной шероховатости диска для замасливания нитей из оксида алюминия/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 2– С. 262-264.
21. Медведев, А.В. Динамический коэффициент трения крученых нитей из оксида алюминия/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев //Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. – 2018. – № 3– С. 69–72.

22. Медведев, А.В. Трибологические свойства комплексных нитей из оксида алюминия при контакте с субмикрощероховатыми поверхностями/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев // Химические волокна. – 2018. – № 5– С. 76–79.

23. Медведев, А.В. Исследование процесса формирования крученых нитей при способе с отдельной подачей нитей в зону кручения / А.В. Медведев, К.Э. Разумеев // Химические волокна. – 2019. – № 4– С. 49–52.

24. Медведев А.В. Анализ рынка материалов для гибкой высокотемпературной изоляции/ А.В. Медведев // Химические волокна. – 2020. – № 1. – С. 13–15.

25. Медведев, А.В. Фрактографический анализ элементарных нитей из оксида алюминия/ А.В. Медведев, Н.П. Симоненко // Известия вузов. Технология легкой промышленности. 2019. - №3, том 45. – С. 50 – 53.

26. Медведев, А.В. Проектирование крученых нитей из оксида алюминия для гибких высокотемпературных уплотнений/ А.В. Медведев // Известия вузов. Технология легкой промышленности. 2020. – №1, том 47. – С. 89 – 93.

27. Медведев, А.В. Шнур из крученых нитей оксида алюминия отечественного производства/ А.В. Медведев // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2020. – Том 48. №2 – С. 59 – 63.

28. Медведев, А.В. Исследование структурной неровности крученых нитей из оксида алюминия/ А. В. Медведев, А.В. Демидов, К.Э. Разумеев // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности.– 2020. Т. 50. №4. С. 16 – 20.

29. Медведев, А.В. Исследование геометрических характеристик элементарных нитей их оксида алюминия с применением направленных критериев/ А.В. Медведев, А.В. Демидов, К.Э. Разумеев. // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2020. Т. 49. №3. С. 51–55.

30. Медведев, А.В. Исследование и анализ корреляции параметров структуры и свойств крученых нитей из оксида алюминия/ А.В. Медведев, К.Э. Разумеев, Н.Е. Федорова// Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2020. – № 5 – С. 46–51.

31. Медведев, А.В. Структура и свойства оболочки элементарных нитей из оксида алюминия / А.В. Медведев // Химические волокна. – 2020. – № 5. – С. 33–36.

Патенты

32. Патент на изобретение RU 2722861, МПК F16J 15/18 (2020/02). Сальниковое высокотемпературное уплотнение/ Медведев А.В. – Опубл. 03.06.2020. Бюл. №16. – 7 с.