

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

А. В. Медведев А. В. Демидов К. Э. Разумеев

**КРУЧЕНЫЕ НИТИ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ
ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА
ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПОЛНЕННЫХ ШНУРОВ**

2022

УДК 678.6:62-762

ББК 37.732-3

M15

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор СПбГУАП

А. С. Коновалов;

доктор технических наук, профессор КГУ Н. А. Смирнова

Медведев, А. В.

M15

Кручение нити из оксида алюминия отечественного производства для высокотемпературных наполненных шнуров: монография / А. В. Медведев, А. В. Демидов, К. Э. Разумеев. — Санкт-Петербург: ФГБОУВО «СПбГУПТД», 2022. — 214 с.

ISBN 978-5-7937-2301-5

Монография обобщает результаты исследований в области текстильных материалов для высокотемпературных уплотнений из оксида алюминия отечественного производства.

УДК 539.434:677.494

ББК 35.732-3

ISBN 978-5-7937-2301-5

© ФГБОУВО «СПбГУПТД», 2022

© Медведев А. В., 2022

© Демидов А. В., 2022

© Разумеев К. Э., 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	8
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	9
ВВЕДЕНИЕ.....	12
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ И АББРЕВИАТУР.....	15
ГЛАВА 1 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	17
1.1 Обоснования выбранного направления исследования.....	17
1.2 Исследование и анализ рынка материалов для теплоизоляционных и уплотнительных материалов.....	19
1.3 Классификация и методы получения керамических волокон и нитей.....	22
1.4 Нити из оксида алюминия зарубежного производства, получаемые по золь-гель методу.....	27
1.5 Нити из оксида алюминия отечественного производства получаемые, по золь-гель методу.....	30
1.5.1 Нити из оксида алюминия, разработанные АО «НПО Стеклопластик».....	30
1.5.2 Нити из оксида алюминия, разрабатываемые ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ.....	33
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ НИТЕЙ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ.....	35
2.1. Исследование структуры поверхности разрушения элементарных нитей.....	35
2.2. Исследование структуры оболочки элементарных нитей.....	40
2.3 Исследование структуры поверхности элементарных нитей.....	45

ГЛАВА 3	ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА НИТЕЙ ИЗ ОКСИДА	
	АЛЮМИНИЯ.....	50
3.1.	Основные свойства элементарных нитей.....	50
3.1.1.	Диаметр элементарных нитей.....	50
3.1.2.	Механические свойства элементарных нитей.....	54
3.2.	Основные свойства комплексных нитей.....	58
3.2.1.	Поперечные размеры и линейная плотность комплексных нитей.....	58
3.2.2.	Механические свойства комплексных нитей.....	59
3.2.2.1.	Влияния скорости перемещения зажима разрывной машины на разрывную нагрузку комплексных нитей.....	60
3.2.2.2.	Масштабный эффект механических свойств комплексных нитей.....	61
3.3.	Характеристики внешнего трения комплексных и крученых нитей	64
3.3.1.	Характеристики внешнего трения, определяемые методом наклонной плоскости.....	65
3.3.2.	Характеристики внешнего трения, определяемые методом скольжения нити по стальному цилиндрическому телу трения.....	71
ГЛАВА 4	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ	
	ИССЛЕДОВАНИЯ КРУЧЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ НИТЕЙ...	74
4.1.	Основные принципы работы и устройство стенда кручения по способу отдельной подачи нитей в зону формирования.....	75
4.2.	Кручение по способу отдельной подачи нитей в зону формирования.....	79
4.3.	Исследование образования порока штопорная крутка при кручении по способу отдельной подачи нитей в зону формирования.....	94

4.4.	Исследование влияния на натяжение нити параметров сматывания с входной бобины.....	97
4.4.1.	Анализ и оценка погрешностей измерения натяжения нитей....	98
4.4.2.	Измерение натяжения нити на универсальном стенде.....	103
4.4.3.	Динамика сматывания нитей с вращающейся катушки.....	107
ГЛАВА 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ВЫРАБОТКИ КРУЧЕНЫХ НИТЕЙ.....		
5.1.	Анализ структуры и механических свойств зарубежных крученых нитей из оксида алюминия для высокотемпературных наполненных шнуров.....	112
5.2	Теоретические и экспериментальные аспекты проектирования и выработки одиночных крученых нитей.....	116
5.2.1.	Исследование влияния натяжения при кручении на разрывную нагрузку крученых нитей	116
5.2.2.	Исследование влияния крутки на разрывную нагрузку одиночных крученых нитей.....	118
5.2.3.	Выработка одиночных крученых нитей экспериментальной партии.....	119
5.2.4	Диаметр одиночных крученых нитей экспериментальной партии.....	120
5.2.5.	Неровнота по линейной плотности и пороки одиночных крученых нитей.....	121
5.2.6.	Разрывная нагрузка одиночных крученых нитей.....	124
5.3.	Теоретические и экспериментальные аспекты проектирования и выработки однокруточных и многокруточных нитей.....	127
5.3.1.	Однокритериальная оптимизация круток.....	127
5.3.2.	Расчет разрывной нагрузки крученых нитей	128

5.3.3.	Выработка и определение разрывной нагрузки однокруточных и многокруточных нитей экспериментальной партии.....	133
5.3.4.	Выработка и определение механических свойств однокруточных и многокруточных нитей опытной партии.....	136
ГЛАВА 6.	ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВЫРАБОТКА ШНУРОВ НАПОЛНЕННЫХ ИЗ КРУЧЕНЫХ НИТЕЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ.....	142
6.1.	Высокотемпературные наполненные шнуры зарубежного производства.....	143
6.2.	Высокотемпературные наполненные шнуры отечественного производства.....	146
6.3.	Проектирование высокотемпературных наполненных шнуров	148
6.4.	Выработка наполненного шнура из крученных нитей на основе оксида алюминия отечественного производства.....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		155
.....		
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....		156
ТАБЛИЦЫ.....		170
ИЛЛЮСТРАЦИИ.....		175
ПРИЛОЖЕНИЕ № 1	«Временные технические условия. Нити крученые из оксида алюминия» (ВТУ – 2020).....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ № 2	«Временный технологический регламент на комплекс научно-исследовательских работ по выработке опытной партии крученных нитей из оксида алюминия» (ВТР № 1 -2020).....	184
ПРИЛОЖЕНИЕ № 3	«Временный технический регламент на комплекс научно-исследовательских работ по выработке .экспериментальной партии шнуров наполненных	

из керамических крученых нитей» (ВТР № 2 -
2020)..... 195

....

ПРИЛОЖЕНИЕ № 4 Протоколы испытаний крученых нитей из оксида
 алюминия выработанных, по способу
 отдельной подачи нитей в зону формирования..... 203

ПРИЛОЖЕНИЕ № 5 Протоколы испытаний крученых нитей из оксида
 алюминия выработанных, по способу
 совместной подачи в зону формирования..... 210

АННОТАЦИЯ

Монография обобщает результаты исследований в области текстильных материалов для высокотемпературных уплотнений из оксида алюминия отечественного производства. Объектом исследования данной монографии является технология производства крученых нитей из оксида алюминия. Актуальность и новизна содержания монографии заключается в том, что в открытых зарубежных источниках отсутствуют сведения о технологии производства крученых нитей из оксида алюминия и уплотнений в виде наполненных шнуров, а отечественные исследования, проводимые с середины 1980-х, не завершались практическим результатом.

Результатом выполненных исследований является научно обоснованная технология производства крученых нитей из оксида алюминия для высокотемпературных наполненных шнуров в соответствии с объемом знаний и пониманием процессов, происходящих в объекте исследования на сегодняшний день.

Разработка технологии производства крученых нитей из оксида алюминия и практическая реализация производства высокотемпературных наполненных шнуров имеет важное хозяйственное значение.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Возрастающая необходимость снижения энергопотребления и защиты оборудования от высоких температур стимулирует разработку современных высокотемпературных уплотнений из керамических текстильных материалов на основе оксида алюминия. Вопрос обеспечения промышленности высокотемпературными волокнистыми уплотнениями из оксидов тугоплавких металлов отечественного производства поставлен более тридцати лет назад. Но первые практические результаты появились только в последние десять лет.

В первую очередь это относится к технологии производства крученых нитей из оксида алюминия для высокотемпературных наполненных шнуров, разрабатываемой в рамках Федеральной целевой программы (ФЦП) «Разработка, восстановление и организация производства стратегических, дефицитных и импортозамещающих материалов и малотоннажной химии для вооружения, военной и специальной техники на 2009-2011 годы и на период до 2015 года».

Керамические текстильные материалы – абсолютно новый продукт для отечественного текстильного материаловедения и технологии текстильных материалов. В открытых зарубежных источниках отсутствуют сведения о технологии производства крученых нитей из оксида алюминия, а отечественные исследования не были доведены до практической реализации.

Монография является первой попыткой обобщения материалов исследований в области керамических текстильных материалов, начатых в МГТУ им. А.Н. Косыгина в 2009 году и продолженной в последующие годы в АО «НПО Стеклопластик», ФГБОУ ВО РГУ им. А.Н. Косыгина и ФГБОУ ВО СПбГУПТД.

В первой главе проведен анализ рынка керамических текстильных материалов, основных тенденций развития объекта исследования, анализ и оценка уровня технологической готовности объекта исследования.

Во второй главе приведены результаты исследования структуры поверхности разрушения, структуры оболочки и структуры поверхности элементарных нитей из оксида алюминия.

Исследование структуры поверхности разрушения элементарных нитей осуществлялось методами фрактографии и включало в себя оценку вида излома, исследование размеров, вида и формы структурных элементов поверхности разрушения. Фактографический анализ поверхности разрушения отечественных нитей из оксида алюминия проводили по изображениям полученными методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Проведено исследование внутренних дефектов и дефектов поверхности элементарных нитей из оксида алюминия отечественного производства.

Исследование структуры оболочки элементарных нитей методом ИК – спектроскопии показало, что материал оболочки элементарных нитей – аморфный оксид алюминия. Это объясняет различие в механических свойствах оболочки и сердцевины элементарных нитей. Характер поверхности разрушения элементарных нитей показывает, что при растяжении до разрыва элементарной нити в первую очередь происходит разрушение более хрупкой сердцевины, а затем более прочной и более пластичной оболочки. Это связано с тем, что аморфный оксид алюминия имеет сложную субкристаллическую структуру, состоящую из микрокристаллических включений оксида алюминия с размерами от нескольких микрон до десятков ангстрем.

Методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) проведено исследование структуры поверхности элементарных нитей из оксида алюминия отечественного и зарубежного производства. Исследование включало в себя определение геометрических параметров и взаимное расположение микронеровностей на исследуемой поверхности.

В третьей главе исследованы основные свойства элементарных и комплексных нитей. Анализ зависимости прочности от диаметра элементарных нитей и зависимости разрывной нагрузки от зажимной длины комплексных нитей показал бóльшую дефектность и неоднородность механических свойств

испытываемых образцов отечественных элементарных и комплексных нитей по сравнению с образцами зарубежного производства.

Исследованы зависимости характеристик внешнего трения комплексных и крученых нитей из оксида алюминия – коэффициента трения и стабильности коэффициента трения от параметров фрикционного контакта: значения параметра Ra стальных образцов, давления в зоне контакта, аспектного отношения текстуры поверхности пар трения, скорости скольжения нити по стальному телу трения.

В четвертой главе проведены теоретические и экспериментальные исследования кручения по способу отдельной подачи нитей в зону формирования. Проведены исследования особенности формирования крученой нити, образования порока штопорная крутка, особенностей нового способа кручения и его отличия от традиционных способов кручения по способу совместной подачи нитей в зону формирования. Исследовано влияние на натяжение нити параметров сматывания с входной бобины.

В пятой главе рассмотрены теоретические и экспериментальные аспекты проектирования и выработки крученых нитей по способу отдельной подачи в зону формирования. Исследована структура керамических крученых нитей зарубежного производства. Исследованы основные свойства крученых нитей отечественного производства. Выполнен расчет разрывной нагрузки крученых нитей. Адекватность и точность расчета разрывной нагрузки подтверждена экспериментально. Выработана опытная партия крученых нитей из оксида алюминия, обладающих комплексом свойств, необходимых для выработки наполненных шнуров.

В шестой главе выполнено проектирование и разработаны параметры технологического режима выработки высокотемпературных наполненных шнуров. Выработан высокотемпературный наполненный шнур с оплеткой и наполнителем из крученых нитей оксида алюминия отечественного производства.

ВЕДЕНИЕ

Сегодня невозможно представить узлы и агрегаты энергетического, металлургического оборудования, ракетно-космической техники (РКТ) без защиты от высоких температур. К современным теплоизоляционным и уплотнительным материалам предъявляются требования к длительной эксплуатации при температурах до 1600°С в окислительной атмосфере. Материалами служат оксидная керамика (оксиды алюминия и циркония) и безоксидная керамика (карбид кремния, нитрид алюминия). По номенклатуре материалы представлены волокнами, рублеными комплексными нитями (штапельными волокнами), ровингом и кручеными нитями.

Объем данного исследования ограничивается текстильными материалами из тугоплавких оксидов металлов и не рассматривает текстильные материалы из безоксидной керамики. Рынок высокотемпературной изоляции (High Temperature Insulation– НТИ) включает в себя несколько сегментов, среди которых в первую очередь для выполняемого исследования представляют интерес керамические волокна (Ceramic Fibers) и керамический текстиль (Ceramic Textils).

Некоторым специалистам режет слух такой термин как керамический текстиль, но, тем не менее это устоявшееся и широко используемое наименование керамических волокнистых материалов, полученных с применением технологий текстильной промышленности на текстильном оборудовании. Объем производства текстильных материалов из керамических волокон и нитей измеряется десятками и сотнями тонн и относится к малотоннажной химии. Производство керамических текстильных материалов развернуто в наиболее промышленно развитых странах: США, Японии, Англии и ряде других. И это нашло свое отражение в некотором преимуществе указанных стран в энергетической и аэрокосмической отраслях

промышленности. Необходимо отметить, что в качестве прекурсоров для выработки волокон и нитей применяются материалы с низким количеством примесей и, соответственно высокой стоимостью. Применяемое оборудование, как правило, узкоспециализированное, что повышает издержки производства. В конечном счете это находит свое отражение в высокой стоимости керамических текстильных материалов. Экспорт керамических текстильных материалов в Российскую Федерацию находится под запретом.

Несмотря на то, что исследования в области отечественных материалов из тугоплавких окислов металлов проводятся более тридцати пяти лет, практические результаты были получены только в последние десять лет. Основным отличием выполняемых в настоящее время исследований от проводившихся ранее в нашей стране является то, что разработка технологии производства крученых нитей проводится в тесной взаимосвязи с исследованием технологических свойств нитей из оксида алюминия отечественного производства. Совместные теоретические и экспериментальные исследования сотрудников АО «НПО Стеклопластик», ФГБОУ ВО РГУ им. А.Н. Косыгина, ФГБОУ ВО СПбГУПТД и ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ заложили научно-технический задел в области текстильных изделий технического назначения, работающих при температурах до 1600°C, а технология производства крученых нитей из оксида алюминия находится на третьем уровне готовности технологии – УГТЗ.

Исследования, начатые в 2009 году в МГТУ им. А.Н. Косыгина и проводимые в настоящее время в АО «НПО Стеклопластик», ФГБОУ ВО РГУ им. А.Н. Косыгина и ФГБОУ ВО СПбГУПТД, показали, что крученые нити из оксида алюминия при достигнутом уровне характеристик физико-механических свойств позволяют использовать их с высокой эффективностью в различных областях промышленности.

Керамические нити – новый материал для отечественной текстильной науки, в связи с этим проводились комплексные материаловедческие

исследования. Рассмотрены теоретические и экспериментальные аспекты проектирования и выработки крученых нитей из оксида алюминия. Исследования были направлены на разработку научно обоснованной технологии производства крученых нитей из оксида алюминия для высокотемпературных наполненных шнуров с достижением УГТ4. На этом уровне развития технологии необходимо продемонстрировать ее работоспособность на достаточно подробных макетах разрабатываемых устройств на лабораторном оборудовании и в лабораторных условиях.

Совокупность задач, решаемых в проводимом исследовании, направлена на осуществление цели исследования – разработке технологии производства крученых нитей из оксида алюминия отечественного производства для высокотемпературных наполненных шнуров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ И АББРЕВИАТУР

Сокращение	Расшифровка сокращения
ФЦП	– Федеральная целевая программа
РЭМ	– Растровая электронная микроскопия
СЗМ	– Сканирующая зондовая микроскопия
РКТ	– Ракетно-космическая техника
МТКС	– Многоразовая транспортная космическая система
ГЛА	– Гиперзвуковой летательный аппарат
УГТ	– Уровень готовности технологии
ПАВ	– Поверхностно – активные вещества
ИК	– Инфракрасный
АОА	– Аморфный оксид алюминия
ГОСТ	– Государственный стандарт
ТУ	– Технические условия
ПЛК	– Программируемый логический контроллер
ИВК	– Измерительно-вычислительны комплекс
ПК	– Персональный компьютер
ИКП	– Измерительный канал прибора
ПФЭ	– Полный факторный эксперимент
ВТУ	– Временные технические условия
ТР	– Технический регламент
ВТР	– Временный технологический регламент
ЕАЭС	– Евразийский экономический союз
ТО	– Техническое описание
HTI	– High Temperature Insulation
NASA	– National Aeronautics and Space Administration
3D	– 3-Dimensional
DARPA	– Defense Advanced Research Projects Agency
NASP	– National Aerospace Plane
NGLT	– Next Generation Launch Technology
RCF	– Refractory Ceramic Fiber
ASTM	– American Society of Testing and Materials
ГГц	– Гигагерц

МПа	– Мегапаскаль
ГПа	– Гигапаскаль
кг/м ³	– Килограмм на метр в кубе
мм/мин	– Миллиметр в минуту
°С	– Градус по шкале Цельсия
К	– Градус по шкале Кельвина

ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Обоснование выбранного направления исследования

Возрастающие требования к защите оборудования от высоких температур и снижению энергопотребления стимулируют разработку высокотемпературной теплоизоляции и уплотнений. Материалами служат оксид кремния (кремнезем, кварц), тугоплавкие оксиды и карбиды, т.е. оксидная керамика и безоксидная керамика. Применение каждого из этих классов волокнистых материалов – оксидной и безоксидной керамики имеет свои преимущества и недостатки. Так, например, волокнистые материалы из карбида кремния обладают исключительной стойкостью к термическому удару, что делает их незаменимыми при производстве наполненных шнуров для авиакосмической отрасли. Однако они резко теряют эксплуатационные характеристики из-за частичного окисления уже при 1200°C. Температура длительной эксплуатации материалов для высокотемпературных наполненных шнуров представлена на рис. 1.

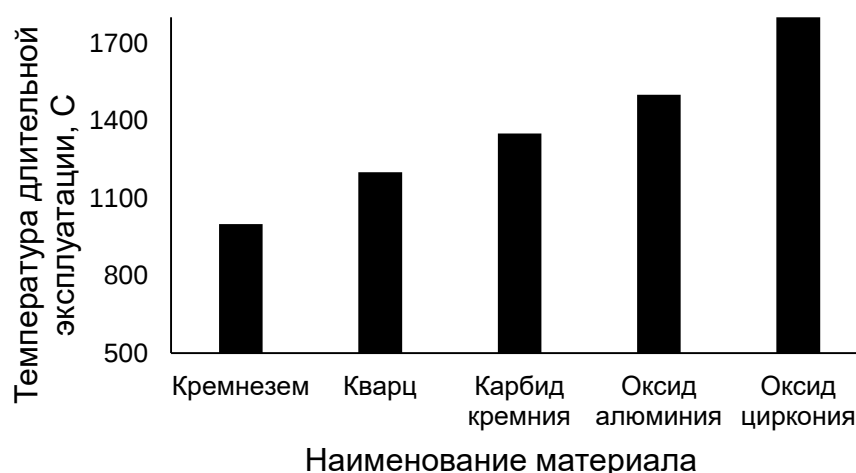


Рис. 1. Температура длительной эксплуатации материалов для высокотемпературных наполненных шнуров

Потребность в высокотемпературных уплотнениях как элементах тепловой защиты возникла с началом разработки многоразовых транспортно – космических систем (МТКС) и продолжается в настоящее время. Исследования и разработки в этой области проводятся во всех промышленно развитых странах, но наиболее впечатляющих успехов добились в США реализовав проект орбитального беспилотного космолана «Boing X-37».

С целью создания гиперзвуковых летательных аппаратов в 1980-х годах National Aeronautics and Space Administration (NASA) была принята программа National Aerospace Plane (NASP), одной из задач которой являлась разработка высокотемпературных уплотнений, предназначенных для предотвращения проникновения теплового потока в зазоры между теплозащитой корпуса и подвижными элементами конструкции гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА). В области высокотемпературных гибких уплотнений предусматривались исследования по разработке и оптимизация конструкции уплотнений, которые проводились NASA в несколько этапов. На первом этапе работ проводились эксперименты по подбору материалов – кандидатов для гибких высокотемпературных уплотнений из наполненных шнуров. Среди кандидатов на применение в наполненных шнурах были рассмотрены нити из оксидной и безоксидной керамики. На следующих этапах, исследовались трибологические свойства материалов – кандидатов среди керамических нитей для высокотемпературных уплотнений на воздухе и в среде водорода при температуре до 1000°C. На основании проведенных исследований по совокупности факторов потери прочности и износостойкости при высоких температурах для дальнейших исследований были выбраны нити из оксида алюминия 3M™ Nextel™ 440 3 и 3M™ Nextel™ 550 производства 3M Company, так как данные нити продемонстрировали лучшие характеристики долговечности, чем нити из карбида кремния Nicalon S производства Nippon Carbon.

Анализ рынка текстильных материалов из тугоплавких оксидов металлов, охранных документов и научно-технических источников показал, что крученые

нити из тугоплавких оксидов металлов и для гибких высокотемпературных уплотнений производят фирмы ведущих промышленно развитых стран мира: 3M Company, E.I. du Pont de Nemours Company, Unifrax – США, Mitsui Mining, Sumimoto Chemical – Япония, Hiltex Semi-Products – Нидерланды и другие.

В Российской Федерации перед ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ поставлены задачи по координации исследований в области производства крученых нитей из оксида алюминия для высокотемпературных наполненных шнуров.

Патентно-технические исследования подтвердили актуальность научных исследований в данной области. Нити из оксида алюминия в настоящее время являются безальтернативным материалом для наполненных шнуров с рабочей температурой до 1600°C, применяемых в энергетической, металлургической, ракетно-космической и атомной отраслях промышленности.

1.2. Исследование и анализ рынка материалов для теплоизоляционных и уплотнительных материалов

Объем данного исследования ограничивается волокнами, нитями и текстильными материалами из тугоплавких оксидов металлов и не рассматривает волокна и материалы из безоксидной керамики.

Рынок высокотемпературной изоляции (High Temperature Insulation – HTI) включает в себя несколько сегментов, среди которых в первую очередь представляют интерес керамические волокна (Ceramic Fibers) и керамический текстиль (Ceramic Textils). По номенклатуре материалы представлены волокнами, рублеными комплексными нитями (штапельными волокнами), ровингом и кручеными нитями.

Рынок керамических волокон для HTI в 2012 году по объему производства составил 353,9 тыс. т, а по объему продаж 1733,4 миллионов долларов США. Как

ождается с 2013 по 2020 год рост составит до 7,5% в год [1]. Реальный ежегодный рост по объему производства составил 8,2% [2].

Керамические текстильные материалы вырабатывают из нитей, в основном получаемых по золь-гель технологии. За такими материалами закрепилось наименование тугоплавкие керамические волокна – Refractory Ceramic Fiber (RCF). Материалы из RCF имеют низкую теплопроводность, высокую стойкость к тепловому удару, высокое электрическое сопротивление и коррозионную стойкость.

Мировой рынок керамического текстиля прогнозируется на уровне 132,5 млн. долларов США к 2021 году по сравнению с 74,5 млн. долларов США в 2015 году и рост на уровне 9,94% в год за период с 2013 по 2020 год [1]. Ежегодный реальный рост рынка керамического текстиля составил 10,2% [2].

На рынке материалов промышленного и специального применения из RCF наиболее заметна 3M Company (США). На рис. 2 представлена номенклатура текстильных материалов из оксида алюминия, производимых 3M Company под торговой маркой 3M™ Nextel™: крученые нити (1), ленты (2), шнуры (3) и ткани (4) [3].



Рис. 2. Номенклатура текстильных материалов, производимых 3M Company

По мнению ряда исследователей [2, 4, 5, 6] рост рынка керамических текстильных материалов сдерживается высокой стоимостью и невысокими объемами производства. Производство комплексных нитей – малотоннажное и составляет 10-20 т/год (Sumitomo, 3M Company). «E.I. du Pont de Nemours and Company» ввела в эксплуатацию завод мощностью 500 т нитей в год [7].

В табл. 1 представлена цена за один килограмм крученых нитей из оксида алюминия производства 3M Company для партии более ста килограммов [4, 5].

Табл. 1. Цена за один килограмм крученых нитей из оксида алюминия производства 3M Company

Марка нитей	Количество элементарных нитей	Линейная плотность		Цена за 1 кг, евро
		Денье	Текс	
3M™ Nextel™ 312	750	1800	200	260
3M™ Nextel™ 440	750	2000	222	500
3M™ Nextel™ 550	750	2000	222	590
3M™ Nextel™ 610	400	1500	167	790
	750	3000	333	600
	2550	10000	1111	440
3M™ Nextel™ 720	400	1500	167	790
	750	3000	333	600

По данным, представленным в работе [5], цена крученых нитей 3M™ Nextel™ 610 линейной плотностью 3000 денье (333 текс) в три раза выше цены комплексных нитей аналогичной марки и линейной плотности.

В Российской Федерации на рынке высокотемпературных уплотнений представлены наполненные шнуры из кварцевых, кремнеземных и алюмосиликатных материалов.

Текстильные материалы из тугоплавких оксидов металлов с рабочими температурами выше 1200°C не производятся, но отечественная промышленность проявляет большой интерес к данной продукции. Отсюда следует, что основным направлением исследований является разработка технологии производства крученых нитей из оксида алюминия отечественного производства для оплетки и наполнителя наполненных шнуров.

По результатам изучения открытых источников определены направления исследований, отличающиеся особой значимостью:

1. Основные требования к крученым нитям из оксида алюминия для высокотемпературных наполненных шнуров.
2. Структура и свойства крученых нитей из оксида алюминия для высокотемпературных наполненных шнуров.
3. Технология производства крученых нитей оксида алюминия.
4. Основные требования к механическим и эксплуатационным свойствам высокотемпературных наполненных шнуров.
5. Разработка структуры и технология производства высокотемпературных наполненных шнуров с оплеткой и наполнителем из крученых нитей оксида алюминия.

Основными тенденциями развития в области керамических крученых нитей является повышение механических свойств крученых нитей. Повышение механических свойств обеспечивается совершенствованием технологии производства комплексных и крученых нитей.

Основными тенденциями развития в области уплотнений из высокотемпературных наполненных шнуров является повышение герметичности, износостойкости, срока эксплуатации и надежности.

1.3. Классификация и методы получения керамических волокон и нитей

Керамические волокна и нити – это все неметаллические волокна и нити (оксидные и безоксидные) за исключением волокон и нитей, полученных из расплавов стекол. В научной литературе закрепилось наименование тугоплавкие керамические нити, охватывающее большую группу материалов: керамику карбидную (на основе SiC), нитридную (на основе AlN), алюмооксидную (на основе Al₂O₃), циркониевую (на основе ZrO₂) и др.

В литературе в единый класс выделяют не только волокна и нити из чистого оксида алюминия, но и материалы с его высоким содержанием. Классифицировать данные материалы можно по нескольким признакам [8]:

1. По степени кристалличности: монокристаллические, поликристаллические, аморфные.

2. По химическому составу: выделяют волокна и нити из чистого оксида алюминия, и содержащие более 99% оксида алюминия; волокна, содержащие 65% и более процентов оксида алюминия, остальное составляют другие тугоплавкие оксиды, как правило, оксид кремния. В состав данных материалов дополнительно могут входить оксиды циркония, бора, щелочных и щелочноземельных металлов.

3. По длине: непрерывные и дискретные.

4. По методу получения: выделяют прямые и косвенные методы. В первом случае получают непосредственно волокна и нити или их предкерамические предшественники. К этим методам относят получение из расплава оксидов (шихты из нескольких оксидов) и золь-гель метод. К косвенным методам относят метод пропитки текстильных материалов соединениями тугоплавких металлов и выщелачивания легкоплавких оксидов.

5. По способу формования: экструзионные, дутьевые, механические методы (с применением центрифуг), электроформование.

Известно несколько методов получения керамических нитей:

– из расплава, подобно минеральным и стеклянным волокнам.

пропиткой текстильных материалов из органических нитей и пряжи соединениями металлов, образующих тугоплавкие оксиды с дальнейшим отжигом (relic process).

1. Выщелачиванием легкоплавких оксидов.

2. Золь-гель метод.

Исследования по получению нитей из чистых оксидов и их соединений показали, что длинноволокнистые структуры могут быть получены только из оксида кремния или на основе бинарных систем SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , HfO_2 , CeO_2 и

ThO₂ [9]. Получить нити из чистых оксидов в стеклообразном состоянии, предназначенные для текстильной переработки и выпуска серийной продукции, никому не удалось. Экспериментально получены комплексные нити из расплавов, содержащих 50 – 80% Al₂O₃, до 4 % SiO₂, 20 – 40% CaO, 0,1 – 3% MgO, которым присущи низкие механические свойства [10]. Химических состав и свойства нитей, получаемых из расплава, представлены в табл. 2.

Табл. 2. Химический состав и свойства нитей, получаемых из расплава

Химический состав, %				Температура кристаллизации, °С	Диаметр элементарных нитей, мкм	Прочность, Мпа	Модуль Упругости, ГПа
Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂				
54,8	38,9	2,5	3,8	1500	216	600	46,6
60,8	39,1	0,1	-	1700	225	500	-
80,2	19,8	-	-	1800	117	1100	-

Основным поставщиком текстильных материалов, полученных методом пропитки, является фирма Zircar Zirconia Inc. (США). Продукция этой фирмы охватывает широкий спектр как по химическому составу: оксид алюминия, оксид циркония, оксид иттрия, оксид цезия и оксид гафния, так и по видам продукции: тканые и трикотажные полотна, а также войлок [11].

Процесс получения текстильных материалов методом пропитки (relis process) включает в себя пропитку текстильного материала соединениями тугоплавких оксидов металлов и нагревание пропитанного материала в окислительной атмосфере. Основные свойства и характеристики тканей, производства Zircar Zirconia Inc., представлены в табл. 3 [11].

Табл. 3. Свойства тканей из тугоплавких оксидов металлов производства Zircar Zirconia Inc.

Наименование параметра	Y ₂ O ₃	CeO ₂	HfO ₂
Диаметр элементарных нитей, мкм	15	15	15
Плотность, г/см ³	4,86 – 5,05	7,65	9,68
Прочность на разрыв, г/см ширины	198	18-28	55 -100
Температура плавления, °С	2410	2400	2780

Метод выщелачивания легкоплавких оксидов разработан ВНИИ стеклопластика и стекловолокна (ВНИИСПВ) в конце 1950-х годов с целью получения кремнеземных нитей с химическим составом: SiO_2 – 94– 96%, Al_2O_3 – 3,5 – 4,0%. В развитии данного способа были получены алюмокремнеземные нити, с химический составом: SiO_2 – 28%; Al_2O_3 – 72 %. Прочность комплексных нитей из натрий алюмоборосиликатного стекла после выщелачивания составляла 300 – 500 МПа. После термообработки прочность повышалась до 800 МПа [12, 13]. Свойства алюмокремнеземных нитей ВНИИСПВ представлены в табл. 4 [14].

Табл. 4 – Свойства алюмокремнеземных нитей ВНИИСПВ

Наименование параметра	Свойства
Диаметр элементарных нитей, мкм	8–10
Прочность, МПа	800
Температура спекания, °С	1700
Температура плавления, °С	1910
Плотность, кг/м ³	200–240
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,04

В промышленных масштабах производство керамических нитей основано на переработке золь и гелей на основе соединений, содержащих оксидообразующие элементы. Эти методы объединены под названием золь-гель метод. Золь-гель метод используют лидеры рынка керамических текстильных материалов компании 3M Company, Mitsui Mining, Sumimoto Chemical, Hiltex Semi-Products и другие. Как следует из названия метода золь-гель, необходимой стадией является получение золя гидратированного оксида алюминия, из которого формуют первичные комплексные нити. В целом, золь-гель метод получения комплексных нитей включает следующие стадии:

1. Приготовление прядильного раствора – золя, с добавками полимеров и поверхностно-активных веществ (ПАВ);
2. Формование с получением предкерамических (первичных) нитей;
3. Термообработка первичных нитей.

На рис. 3 представлена технологическая схема получения комплексных нитей из оксида алюминия [15].

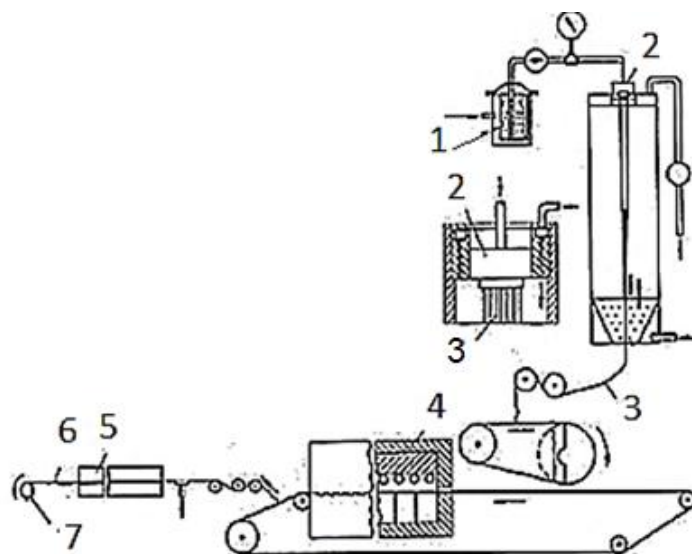


Рис. 3. Технологическая схема получения комплексных нитей из оксида алюминия

Раствор необходимой вязкости из напорного бака 1 подается к фильере 2, расположенной в верхней части сушильного контейнера. Первичные нити 3 поступают в низкотемпературную 4, а затем в высокотемпературную печь 5. После чего комплексные нити 6 наматываются на бобину 7. Важным фактором, определяющим устойчивость производства первичных нитей, является снижение обрывности нити, которая, в основном, зависит от интервала рабочей вязкости золя и скорости намотки на бобину 7. Термообработку первичных нитей проводят в несколько стадий и при невысоких скоростях нагрева [16]. Это позволяет равномерно удалять растворитель и органические компоненты из нитей и, как следствие, минимизировать образование трещин и пор. На первой стадии при термообработке до 600°C происходят термические превращения полимерной матрицы и диссоциация солей с образованием оксидов металлов. На второй стадии при термообработке выше 600°C осуществляются структурные превращения оксидов и изменение их физико-химических свойств. Комплексные нити состоят из элементарных нитей, имеющих диаметр от 3 мкм

до 25 мкм [17], так как в большинстве случаев из соображений охраны здоровья диаметр ограничен 3 мкм [18].

1.4. Нити из оксида алюминия зарубежного производства, получаемые по золь-гель методу

Основой большинства керамических нитей, получаемых в промышленных масштабах, является оксид алюминия. В табл. 5 представлен химический состав свойства элементарных нитей из оксида алюминия зарубежного производства [3, 19].

Табл. 5. Химический состав и свойства нитей из оксида алюминия зарубежного производства

Производитель, марка	Химический состав	d , мкм	σ , МПа	E , ГПа
3M Company, 3M TM Nextel TM 312	64% Al ₂ O ₃ , 24% SiO ₂ , 14% B ₂ O ₃	10-12	1700	152
3M Company, 3M TM Nextel TM 440	70% Al ₂ O ₃ , 28% SiO ₂ , 2% B ₂ O ₃	10-12	2000	190
3M Company, 3M TM Nextel TM 550	73% Al ₂ O ₃ , 27% SiO ₂	10-12	2000	193
Hiltex Technical Textiles, ALF 72/28	72% Al ₂ O ₃ , 28% SiO ₂	7	1800	190

Свойства комплексных нитей из оксида алюминия производства 3M Company представлены в табл. 6 [3].

Табл. 6. Свойства комплексных нитей 3MTM NextelTM 3M Company

Марка	Число элемент. нитей	Линейная плотность, денье/текс	Разрывная нагрузка, Н	Удельная разрывная нагрузка сН/текс
3M TM Nextel TM Roving 312	400	900/100	40,18	43,00
3M TM Nextel TM Roving 440	400	1000/111	40,18	36,19
3M TM Nextel TM Roving 550	400	1000/111	40,18	36,19

Свойства крученых нитей из оксида алюминия производства 3M Company представлены в табл. 7 [3].

Табл. 7. Свойства крученых нитей 3M™ Nextel™ 3M Company

Марка	Структура	Линейная плотность, денье/текс	Разрывная нагрузка, Н	Удельная разрывная нагрузка сН/текс
3M™ Nextel™ Plied Yarn 312	1/2	1800/200	84,28	42,14
3M™ Nextel™ Plied Yarn 440	1/2	2000/222	89,18	40,17
3M™ Nextel™ Plied Yarn 550	1/2	2000/222	93,10	41,94

Уплотнения из нитей 3M™ Nextel™ 312, 3M™ Nextel™ 440, 3M™ Nextel™ 550 предназначены для применения в авиационно-космический промышленности в виде наполненных шнуров. Керамические нити 3M™ Nextel™ 550 не содержат бор и, соответственно, не имеют стеклообразной фазы, присутствующей в 3M™ Nextel™ 312, и в большей степени сохраняют свою прочность при высокой температуре. На рис. 4 предоставлены данные по изменению предела прочности от температуры для нитей из оксида алюминия 3M™ Nextel™ 312 и для нитей из оксида алюминия 3M™ Nextel™ 550. За 100% принята прочность при 500°C [20].

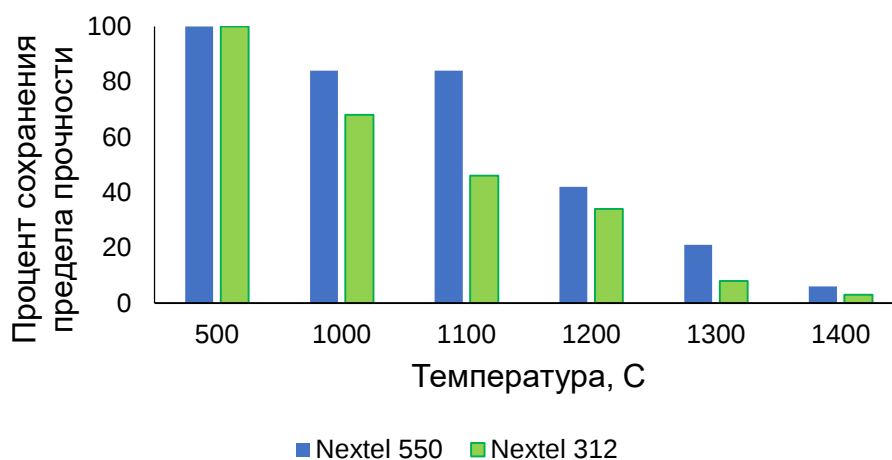


Рис. 4. Изменение предела прочности нитей из оксида алюминия от температуры

Свойства комплексных нитей производства Hiltex Technical Textiles (Нидерланды) представлены в табл. 8 [19]. Свойства крученых нитей производства Hiltex Technical Textiles (Нидерланды) представлены в табл. 9 [19].

Табл. 8. Свойства комплексных нитей ALF Hiltex Technical Textiles

Марка	Число элементарных нитей	Линейная плотность, денье/текс	Разрывная нагрузка, Н	Удельная разрывная нагрузка сН/текс
ALF 60/40	200	600/67	26,9	40,15
ALF 72/28	200	600/67	28,4	42,38

Табл. 9. Свойства крученых нитей ALF Hiltex Technical Textiles

Марка	Структура	Линейная плотность, денье/текс	Разрывная нагрузка, Н	Удельная разрывная нагрузка сН/текс
ALF S-1280DA/S=60/40	1/2	1200/134	45,82	34,2
ALF S-1920DA/S=72/28	1/2	1200/134	48,98	36,56

Повышение температуры эксплуатации и механических свойств нитей из тугоплавких оксидов всегда было приоритетной задачей разработчиков новых теплозащитных и уплотнительных материалов. В ряде патентов фирмы 3M Company предложены способы получения нитей из оксида циркония по золь-гель методу [21, 22], но для коммерческого применения 3M Company их не производит.

Как было сказано выше, керамические текстильные материалы в основном изготавливают из нитей, полученных по золь-гель методу. С использованием золь-гель метода связаны эксперименты по производству отечественных нитей из оксида алюминия.

1.5. Нити из оксида алюминия отечественного производства получаемые, по золь-гель методу

1.5.1. Нити из оксида алюминия, разработанные АО «НПО Стеклопластик»

Основными поставщиком высокотемпературных теплозащитных и уплотнительных материалов в РФ является АО «НПО Стеклопластик» (до 1983 г. ВНИИСПВ) – крупнейший, а по некоторым направлениям единственный в России научно-производственный центр, реализующий полный цикл: «исследование – разработка – производство».

В 1981 г. по инициативе Героя Социалистического Труда заместителя директора по научной части ВНИИСПВ М.С. Аслановой начаты поисковые работы по разработке технологии получения поликристаллических нитей из оксида алюминия по золь-гель методу. Этими исследованиями занялась группа сотрудников сектора №3 отдела неорганических специальных волокон: В.А. Чернов, Л.Ф. Ильяшенко, Н.Т. Кулаков и др. под руководством директора ВНИИСПВ Н.Н. Трофимова. В качестве соисполнителя к работе был привлечен ВНИИ химических реактивов и особо чистых химических веществ.

Для получения прядильного раствора был разработан способ синтеза моноацетата алюминия, стабилизированного борной кислотой. В 1985 г. в лаборатории неорганических специальных волокон были получены образцы нитей из оксида алюминия [23].

Процесс включал в себя следующие стадии:

1. Приготовление водного раствора моноацетата алюминия и связующего.
2. Приготовление водной суспензии дисперсного наполнителя (ультрадисперсного порошка оксида алюминия с размером частиц от 0,1 до 5 мкм).

3. Получение прядильного раствора с заданными технологическими свойствами.
4. Формование.
5. Сушка при температуре 100-200°C.
6. Термообработка по программе:

I стадия –нагрев до температуры 600-800°C;

II стадия – нагрев до температуры 1100-1200°C.

После первой стадии термообработки нити имели аморфную, а после второй поликристаллическую структуру. Процессы разложения, протекающие в нитях при термообработке, кристаллизацию и фазовые превращения исследовали методами термического и рентгеноструктурного анализа. Термостабильность образцов оценивали по разрушающему напряжению при растяжении элементарных нитей после термообработки. После термообработки при 1300°C элементарные нити по прочности (≈ 1000 МПа) не уступали нитям 3М™ Nextel™ 312, подвергнутым термообработке в аналогичных условиях. Химический состав и свойства нитей из оксида алюминия, разработанные АО НПО «Стеклопластик», представлены в табл. 10 [24].

Табл. 10. Химический состав и свойства нитей из оксида алюминия, разработанных в АО «НПО Стеклопластик»

Химический состав, %			Диаметр элементарных нитей, мкм	Плотность, кг/м ³	Прочность при растяжении, МПа		Модуль упругости, ГПа
Al ₂ O ₃	SiO ₂	B ₂ O ₃	9-10	2680	20°C	1300°C	150
62	24	14			1400	1000	

Исследования проведенные сотрудниками НПО «Стеклопластик» в 1987-1992 гг, позволили обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований способов подготовки прядильных растворов, формования комплексных нитей и полиморфных модификаций оксида алюминия в зависимости от условий термообработки [25-29]. В табл. 11 представлены

физико-механические свойства нитей из оксида алюминия, разработанных в АО «НПО Стеклопластик» в 1987-1992 гг [28].

Табл. 11. Химический состав и свойства нитей из оксида алюминия, разработанных в АО «НПО Стеклопластик» в 1987-1992 гг

Химический состав, %			Диаметр элементарных нитей, мкм	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа
Al ₂ O ₃	SiO ₂	B ₂ O ₃				
70	28	2	10-12	2680	1400	150
99	-	-	15-25	3050	1900	220
85	15	-	9	3950	1510	387
95	5	-	3	3200	2600	250

В конце 1980-х годов начались исследования по получению нитей с рабочей температурой до 1800°C на основе оксида алюминия и оксида циркония, но по ряду обстоятельств эти исследования не были завершены.

1.5.2. Нити из оксида алюминия, разрабатываемые ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ

Всероссийский институт авиационных материалов («ВИАМ») – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, разрабатывающее и производящее материалы для авиационно-космической техники.

Исследования по выработке нитей на основе оксида алюминия были развернуты в начале 1980-х годов под руководством В.Н. Грибкова и Б.В. Щетанова. Сотрудниками «ВИАМ» выполнен большой объем исследований

по формированию и термобработке комплексных нитей из оксида алюминия [30]. Достигнув определенных положительных результатов, работы свернули в начале 1990-х годов и возобновили только в 2000-х годах по ФЦП «Национальная технологическая база» и ФЦП №2 «Разработка, восстановление и организация производства стратегических, дефицитных и импортозамещающих материалов и малотоннажной химии для вооружения, военной и специальной техники на 2009 – 2011 годы и на период до 2015 года». «ВИАМ» в настоящее время проводит исследования по разработке технологии производства нитей из оксида алюминия для гибких высокотемпературных уплотнений [31, 32]. Свойства элементарных нитей из оксида алюминия представлены в табл. 12 [31].

Табл. 12. Химический состав и свойства элементарных нитей из оксида алюминия, разрабатываемые «ВИАМ»

Химический состав, %		Диаметр элементарных нитей, мкм	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа
Al ₂ O ₃	SiO ₂				
85	15	7-14	2700	1720	152

В 2009 году к разработке технологии получения крученых нитей из оксида алюминия для гибких высокотемпературных уплотнительных материалов в рамках ФЦП №2 приступил коллектив сотрудников МГТУ им. А.Н. Косыгина возглавляемый д.т.н., профессором кафедры прядения А.Ф. Капитановым. Непосредственное участие в проведении исследования принимали к.т.н., доцент кафедры технологии текстильного машиностроения Жариков Е.И., к.т.н., доцент кафедры текстильного материаловедения Курденкова А.В., к.х.н., доцент кафедры аналитической и коллоидной химии Щукина Е.Л., зав. учебной лабораторией кафедры технологии текстильного машиностроения Медведев А.В., аспиранты и студенты старших курсов кафедры прядения, возглавляемой д.т.н., профессором Разумеевым К.Э.

Проведенные исследования заложили научно-технический задел для разработки керамических текстильных изделий, работающих при температурах не менее 1600°C [33, 34, 35].

Основным отличием выполняемых в настоящее время исследований от проводившихся ранее в нашей стране является то, что разработка технологии производства крученых нитей проводилась в тесной взаимосвязи с исследованием технологических свойств комплексных и крученых нитей из оксида алюминия отечественного производства.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ НИТЕЙ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

2.1. Исследование структуры поверхности разрушения элементарных нитей

Исследование структуры поверхности разрушения элементарных нитей осуществлялось методами фрактографии и включало в себя оценку вида излома, исследование размеров, вида и формы структурных элементов поверхности разрушения. Фактографический анализ поверхностей разрушения отечественных нитей из оксида алюминия проводили по изображениям полученными методами растровой электронной микроскопии (РЭМ). Изображения получены на рентгеновском электронном микроскопе DSM-960 Opton [36]. Исследованы наиболее типичные поверхности излома элементарных нитей оксида алюминия, перпендикулярные и под углом 45° к оси элементарной нити, образованные одной трещиной на поверхности (рис. 5, а) и рис. 5, б) и образованные одновременно двумя отдельными трещинам (рис. 5, в), связанными плоскостью высокого напряжения сдвига.

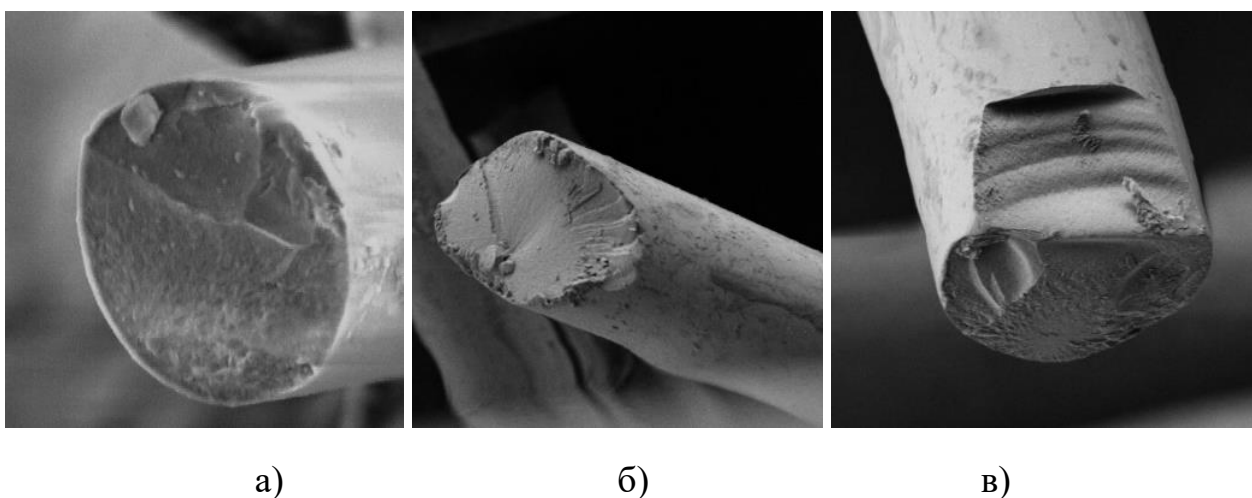


Рис. 5. Типичные поверхности разрушения элементарных нитей из оксида алюминия

В процессе разрушения элементарной нити при достижении предела текучести на поверхности разрушения остаются следы в виде линий Людерса – Чернова. Направление указанных линий соответствует площадкам, на которых при разрушении образца возникают наибольшие касательные напряжения. На рис. 6 отмечены дефекты структуры элементарной нити, расположенные в сердцевине – 1, на поверхности – 2 и на границе поверхность – сердцевина – 3, стрелкой обозначена одна из линий Людерса-Чернова.

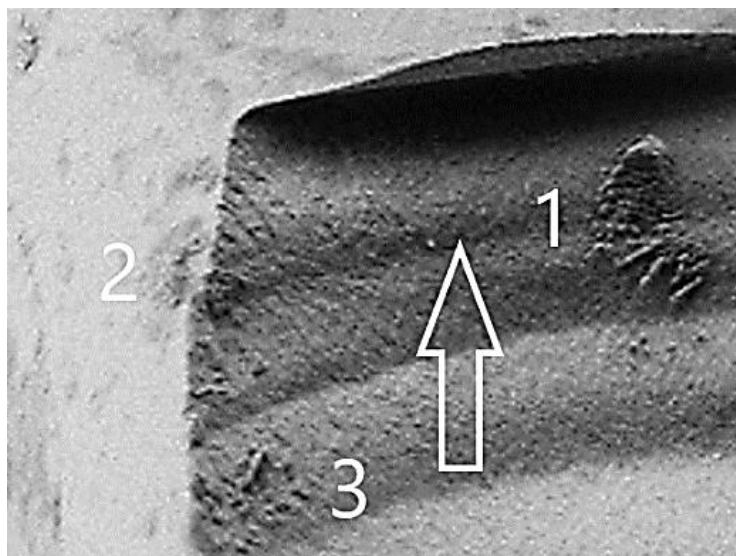


Рис. 6. Дефекты структуры элементарной нити и линии Людерса – Чернова

Проведены исследования причин возникновения внутренних дефектов и дефектов поверхности элементарных нитей отечественного производства, представленных на рис. 7.

Причиной возникновения внутренних дефектов является некачественная фильтрация (рис. 7, а) и недостаточная дегазация формовочного раствора (рис. 7, б и рис. 7, в). Дефекты типа капля (рис. 7, а) представляет собой отдельные капли формовочного раствора на поверхности элементарной нити, возникающие вследствие изменения продольного градиента скорости формования нити. Поверхностные поры образуются при удалении газообразных продуктов при термообработке. При этом непосредственно под формирующейся

оболочкой нити возникает газовый пузырь, создающий концентратор напряжения.

Дефекты типа контакт (рис. 7, г) возникают при контакте элементарных нитей в процессе формирования и термообработки.

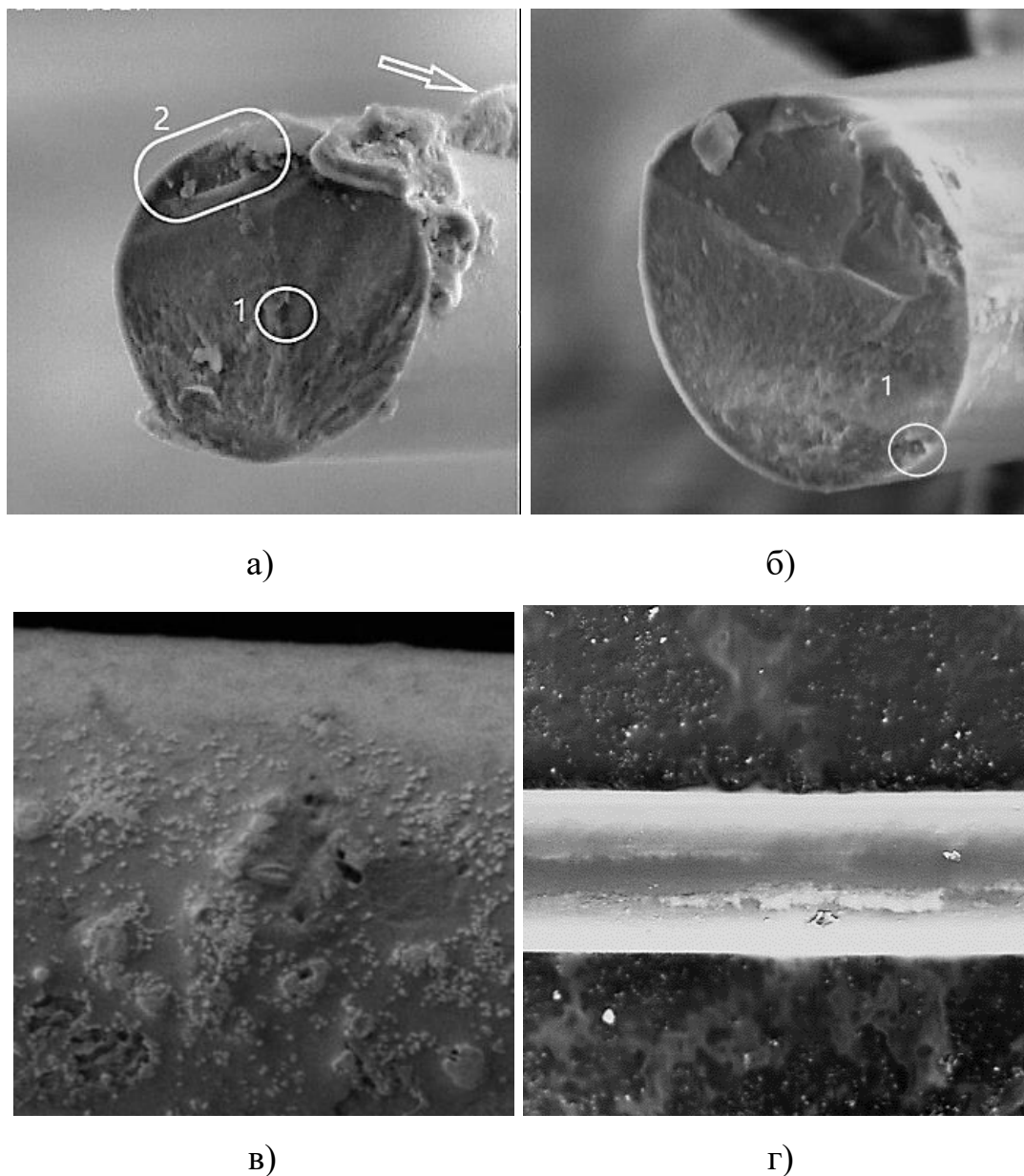


Рис.7. Внутренние дефекты и дефекты поверхности элементарных нитей

Наличие участков с открытой пористостью приводит к высокой удельной поверхности элементарных нитей. Согласно исследованиям Б.В. Щетанова [30], удельная поверхность отечественных элементарных нитей составляет не менее

0,75 м²/г, тогда как для нитей 3M™ Nextel™ 3M Company данный показатель составляет не более 0,2 м²/г [3].

Анализ изображений поверхности разрушения элементарных нитей оксида алюминия, полученных на рентгеновском электронном микроскопе DSM-960 Opton с увеличением от 10000 кратного до 20000 кратного, показал наличие неоднородности структуры в поперечном сечении. Неоднородность структуры выражается в наличии оболочки и сердцевины элементарной нити. Толщина оболочки, исследованной по изображениям, полученным методом растровой электронной микроскопии, составляет от 0,3 до 0,6 мкм.

На микрофотографии, представленной на рис. 8, а и 8, б хорошо видна оболочка (обозначена стрелками) и сердцевина элементарной нити из оксида алюминия. На рис. 8, б разрушение элементарной нити произошло с выкрашиванием сердцевины (место 1), но часть оболочки только надорвана и не потеряла связь оболочкой нити (место 2).

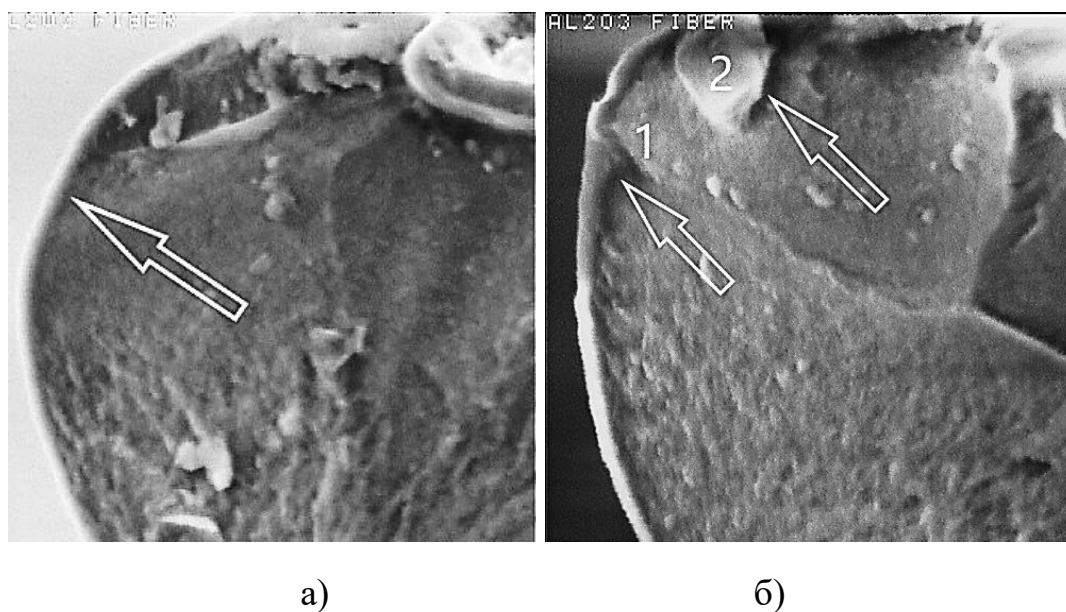
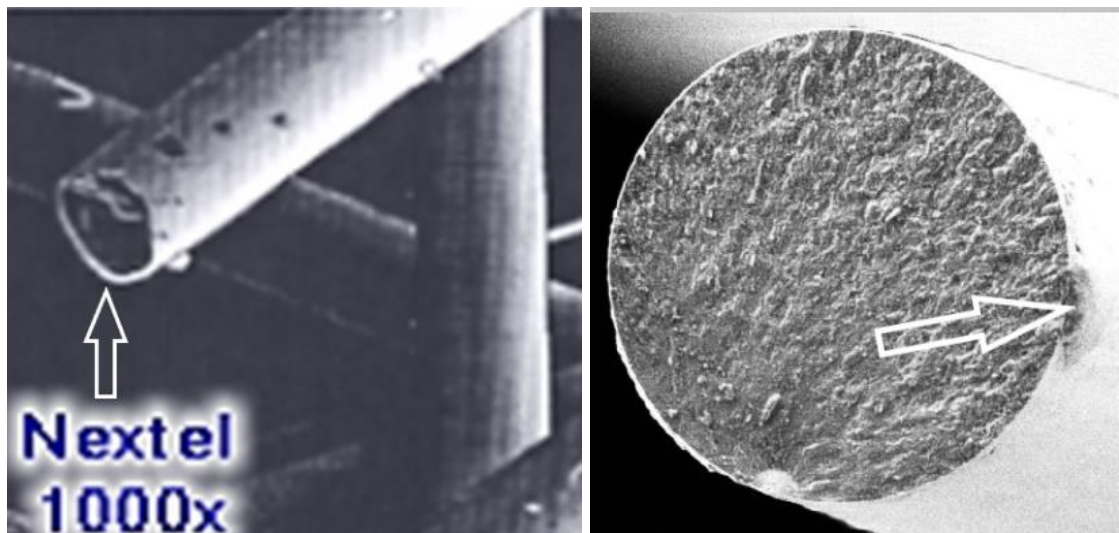


Рис. 8. Оболочка и сердцевина элементарных нитей из оксида алюминия

Керамические нити 3M™ Nextel™, производства 3M Company, обладают аналогичной структурной неоднородностью в поперечном сечении. Причем, как нити с аморфной структурой марки 3M™ Nextel™ 312 [37], так и поликристаллические нити марки 3M™ Nextel™ 720 [38]. На рис. 9, а

представлено изображение элементарной нити 3M™ Nextel™ 312, оболочка элементарной нити обозначена стрелкой. На рис. 9, б представлено изображение элементарной нити 3M™ Nextel™ 720, под сколом оболочки (обозначено стрелкой) видна сердцевина нити.



а)

б)

Рис. 9. Оболочка и сердцевина элементарных нитей 3M™ Nextel™ 312 (а) и 3M™ Nextel™ 720 (б)

Анализ поверхности разрушения элементарных нитей показал, что при растяжении до разрыва в первую очередь происходит разрушение более хрупкой сердцевины, а затем более прочной и более пластичной оболочки. Таким образом, для элементарных нитей из оксида алюминия характерен совмещенный вид излома: пластичный оболочки и хрупкий сердцевины.

Разрушение сердцевины элементарной нити имеет характерный хрупкий излом с расслоением материала сердцевины. На рис. 10, а представлена микрофотография поверхности разрушения элементарной нити с 20 000 кратным увеличением, на которой можно видеть, что сердцевина элементарной нити имеет слоистую структуру в осевом направлении.

На рис. 10, б представлена микрофотография поверхности разрушения элементарной нити с 20 000 кратным увеличением. Поверхность разрушения состоит из отдельных зерен либо групп сросшихся зерен. От образца к образцу

зерна имеют большой разброс по размерам от 200 до 700 нм, форма зерен в основном овальная. Сердцевина состоит из групп зерен, составляющих «мозаичную структуру» поверхности разрушения.

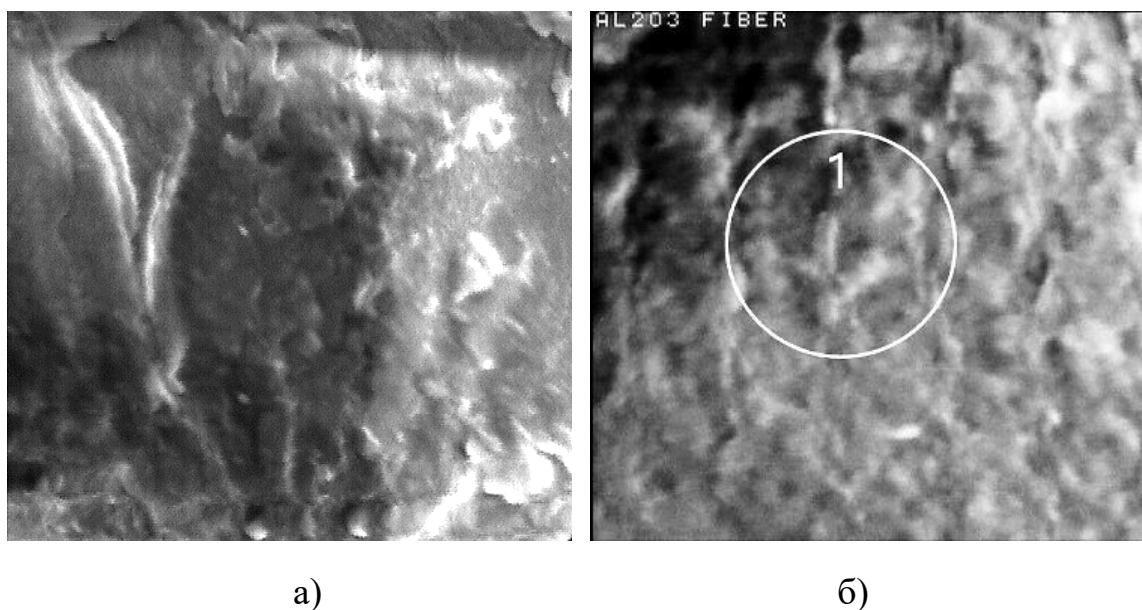


Рис. 10. Слоистая структура сердцевины элементарной нити (а) и структурный элемент поверхности разрушения (б)

На рисунке 10, б выделен структурный элемент – 1, представляющий собой четыре сросшихся зерна (два зерна размерами 200×400 нм и два зерна с размерами 250×600 нм). Возникновение «мозаичной структуры» сердцевины элементарных нитей является следствием возникающих в элементарных нитях остаточных напряжений при термообработке, а размеры структурных элементов могут зависеть от режимов термообработки.

2.2 Исследование структуры оболочки элементарных нитей

На изображениях, полученных методами РЭМ, даже при 20 000 кратном увеличении не различимы структурные элементы оболочки элементарной нити. Если вопрос о химическом составе оболочки не вызывает сомнения, то вопрос о

ее структурно – фазовом состоянии остается открытым. Так как отсутствует характерный для кристаллических структур хрупкий вид излома по методу исключения, остается предположить, что оболочка может состоять из аморфного оксида алюминия (АОА).

Исследование поверхности элементарных нитей методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) показало на поверхности элементарных нитей наличие регулярной структуры полусферической и конусообразной формы с поперечными размерами до 100 нм [39]. Подобная структура характерна для неорганических рентгеноаморфных веществ, в частности, типичному представителю неорганических минералоидов – опалу [40]. На рис. 11, а представлено СЗМ – изображение поверхности опала [40]. На рис. 11, б представлено СЗМ – изображение поверхности элементарной нити из оксида алюминия, полученное на сканирующем мульти-микроскопе СММ – 2000 и обработанное с использованием программы СММ – 2000 – 15 – winXP.

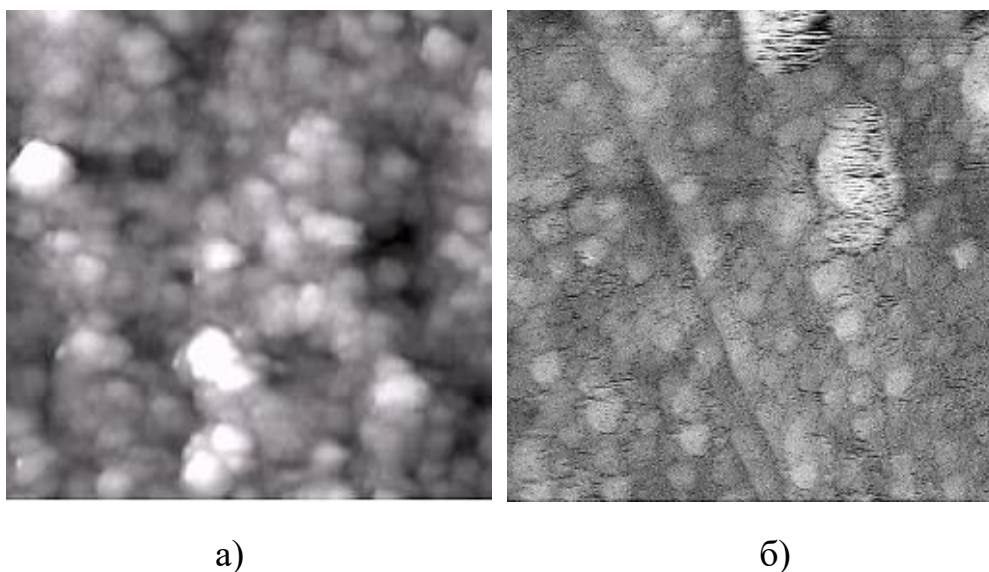


Рис. 11. Регулярная структура на поверхности опала (а) и элементарной нити из оксида алюминия (б)

Исследования строения поверхности неорганических рентгеноаморфных веществ, проведенное методами СЗМ, показали, что распределение вершин (пиков), составляющих регулярную структуру на поверхности приморских

опалов, имеет вид, близкий к нормальному [40]. На рис. 12 представлена гистограмма плотности распределения пиков на поверхности элементарных нитей из оксида алюминия отечественного производства «ВИАМ» (рис. 12, а) и зарубежного производства 3M™ Nextel 720™ 3M Company (рис. 12, б) [39].

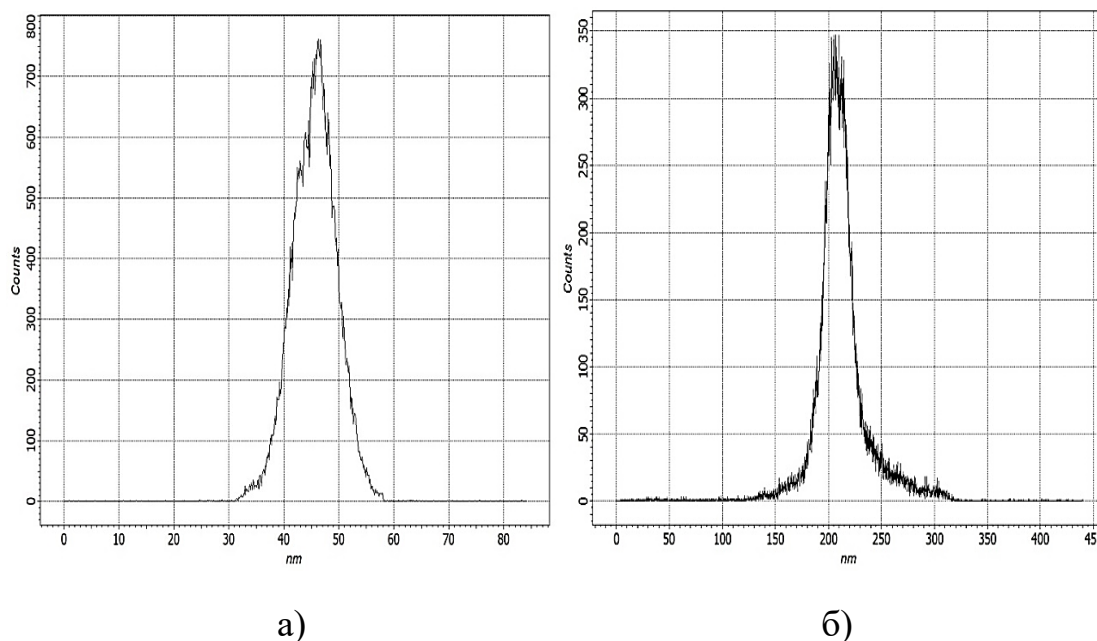


Рис. 12. Гистограмма плотности распределения пиков на поверхности элементарных нитей из оксида алюминия «ВИАМ» (а) и 3M™ Nextel 720™ 3M Company (б)

Степень асимметрии кривой плотности распределения можно оценить с помощью показателя (коэффициента) асимметрии. Коэффициент асимметрии плотности распределения пиков на поверхности отечественных и зарубежных нитей менее 0,1 [39], т.е. асимметрия не значительна, а распределение близко к нормальному.

Авторами работы [41] показано, что в исходном состоянии и после отжига при температурах до $T = 973 \text{ K}$ (699°C) все исследованные оксиды являлись рентгеноаморфными. Термообработку отечественных нитей из оксида алюминия проводят при температуре $550 \pm 10^\circ \text{C}$. Завершающей контрольной операцией производства является контроль рентгенофазового состава на рентгеновском дифрактомере. Рентгенофазовый состав должен быть

рентгеноаморфным [31], что подтверждается полученными рентгенограммами. На рис. 13 представлены рентгенограммы нитей из оксида алюминия отечественного производства [42].

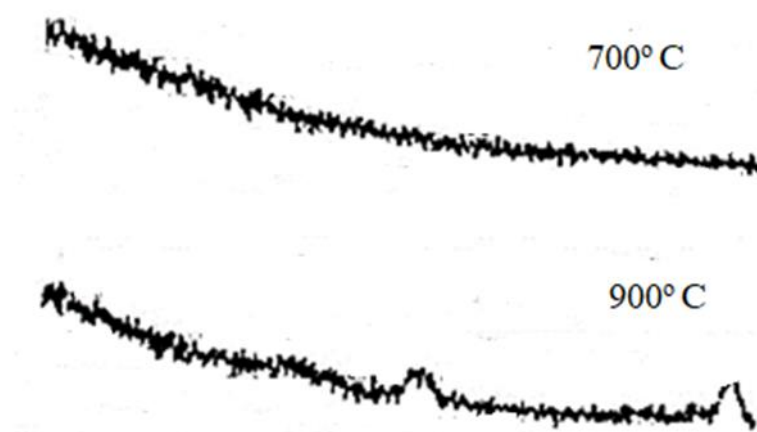


Рис. 13. Рентгенограммы нитей из оксида алюминия отечественного производства

Согласно исследованиям [43] АОА имеет сложную субкристаллическую структуру, состоящую из микрокристаллических включений оксида алюминия с размерами от нескольких микрон до десятков ангстрем.

Авторами работы [44] получена новая форма АОА в виде полых трубок длиной 4 – 6 см и диаметром 20 – 300 мкм, за счет нагревания в токе газа (водород, гелий, воздух) при нормальном давлении частично гидролизованного AlCl_3 . Дифрактограмма образца, а также данные локальной дифракции электронов свидетельствуют о том, что материал трубок аморфен.

Исследование ИК – спектра отечественных нитей из оксида алюминия, полученного на ИК спектрометре SPECOR DM–80 VEB Carl Zeiss Jena (рис. 14), показало, что поглощение наблюдается между 4000 и 3240 см^{-1} . Первый локальный минимум находится на 3420 см^{-1} , второй локальный минимум соответствует 2340 см^{-1} . Третий локальный минимум поглощения соответствует 1624 см^{-1} и поглощение становится полным после 616 см^{-1} , за исключением

небольшой области слабого поглощения при $408\text{--}350\text{ см}^{-1}$. ИК-спектр нитей из оксида алюминия отечественного производства в координатах «Т пропускания в % – см^{-1} », представленный на рис. 14 имеет большое сходство ИК-спектрами аморфного оксида алюминия в виде полых трубок [44] и анодных пленок [45].

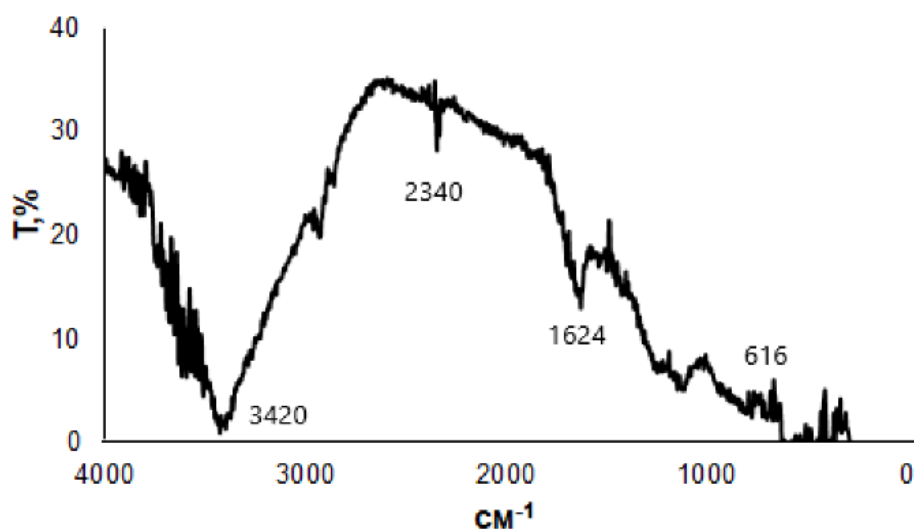


Рис. 14. ИК – спектр в координатах «Т пропускания в % – см^{-1} » нитей из оксида алюминия отечественного производства

Инфракрасный спектр для любого химического соединения имеет совершенно определенный характер. При сравнении соединений идентичность их ИК – спектров поглощения почти всегда указывает на идентичность соединений. В табл. 13 представлены частоты поглощения, характерные для образцов оксида алюминия.

Табл. 13. Частоты поглощения образцов оксида алюминия.

Образец	Частоты поглощения см^{-1}			
Нить из оксида алюминия	616	1624	2340	3420
АОА в виде полых трубок	690	1638	2310	3350
АОА в виде анодных пленок	666	1635	2362	3386

Сопоставление ИК – спектра отечественных нитей из оксида алюминия с ИК – спектрами аморфного оксида алюминия (АОА) в виде полых трубок и анодных пленок, приведенными в табл. 13, и результатов рентгенофазового

анализа показывают, что материал оболочки элементарных нитей – аморфный оксид алюминия.

2.3. Исследование структуры поверхности элементарных нитей

Исследование структуры поверхности включает в себя определение параметров шероховатости поверхности, высоту пиков и впадин неровностей, соотношение геометрических элементов шероховатости, которые определяют фрикционное взаимодействие твердых тел. Трение и износ при контакте текстильных нитей с нитепроводящими деталями текстильных машин в значительной степени связаны с микронеровностями, которые присутствуют на поверхности контактирующих тел. В настоящее время вопросы контакта нитепроводящих деталей с пряжей и нитями достаточно исследованы, в то время как параметры шероховатости поверхности волокон и нитей, а также связь параметров шероховатости поверхности с характеристиками внешнего трения текстильных материалов недостаточно исследованы.

Исследование структуры поверхности элементарных нитей из оксида алюминия проводилось методом сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) на атомно-силовом микроскопе Ntegra Prima (NT – MDT) [39]. Исследовано по восемь СЗМ – изображений для каждого из образцов элементарных нитей: №1 – «ВИАМ», №2 – 3MTM NextelTM 720, №3 – РХТУ им. Д.И. Менделеева. Методами СЗМ получены значения параметров структуры шероховатой поверхности элементарных нитей представленные в табл. 14:

Ra – среднее арифметическое отклонение оцениваемого профиля;

Rq – среднеквадратическое отклонение оцениваемого профиля;

Sa – среднее арифметическое значение высоты поверхности;

Sq – среднеквадратическое значение высоты поверхности.

Табл. 14. Параметры структуры поверхности элементарных нитей

Размер СЗМ-изображения, мкм	Образец №1				Образец №2				Образец №3			
	<i>Ra</i> , нм	<i>Rq</i> , нм	<i>Sa</i> , нм	<i>Sq</i> , нм	<i>Ra</i> , нм	<i>Rq</i> , нм	<i>Sa</i> , нм	<i>Sq</i> , нм	<i>Ra</i> , нм	<i>Rq</i> , нм	<i>Sa</i> , нм	<i>Sq</i> , нм
2,5 x 2,5	9,4	8,1	2,2	2,8	42	34,6	5,1	11	189	174	49,8	77,1
3,0 x 3,0	58	48	9,5	11	45	35,9	45	7,3	226	181	55,7	69,0
3,0 x 3,0	60	57	14,0	16,7	59,1	48,6	5,7	12,1	341,2	278,6	88,0	107,2
3,0 x 3,0	54	46	12	14	211	202	12,4	18,6	347	286	153	183
3,0 x 3,0	52	41	9,2	11	212	187	30	42	376	284	84	103
3,5 x 3,5	45	37	3,2	4,1	612	542	65	81	392	30	72	86
3,5 x 3,5	14	11	3,0	4,0	619	554	47	62	318	288	63	56
4,0 x 4,0	18	15	4,0	5,1	373	297	53	68	571	421	255	278

На рис. 15 представлены 3D СЗМ – изображения поверхности элементарных нитей: образца №1 – 15, а, образца №2 – 15, б, образца №3 – 15, в.

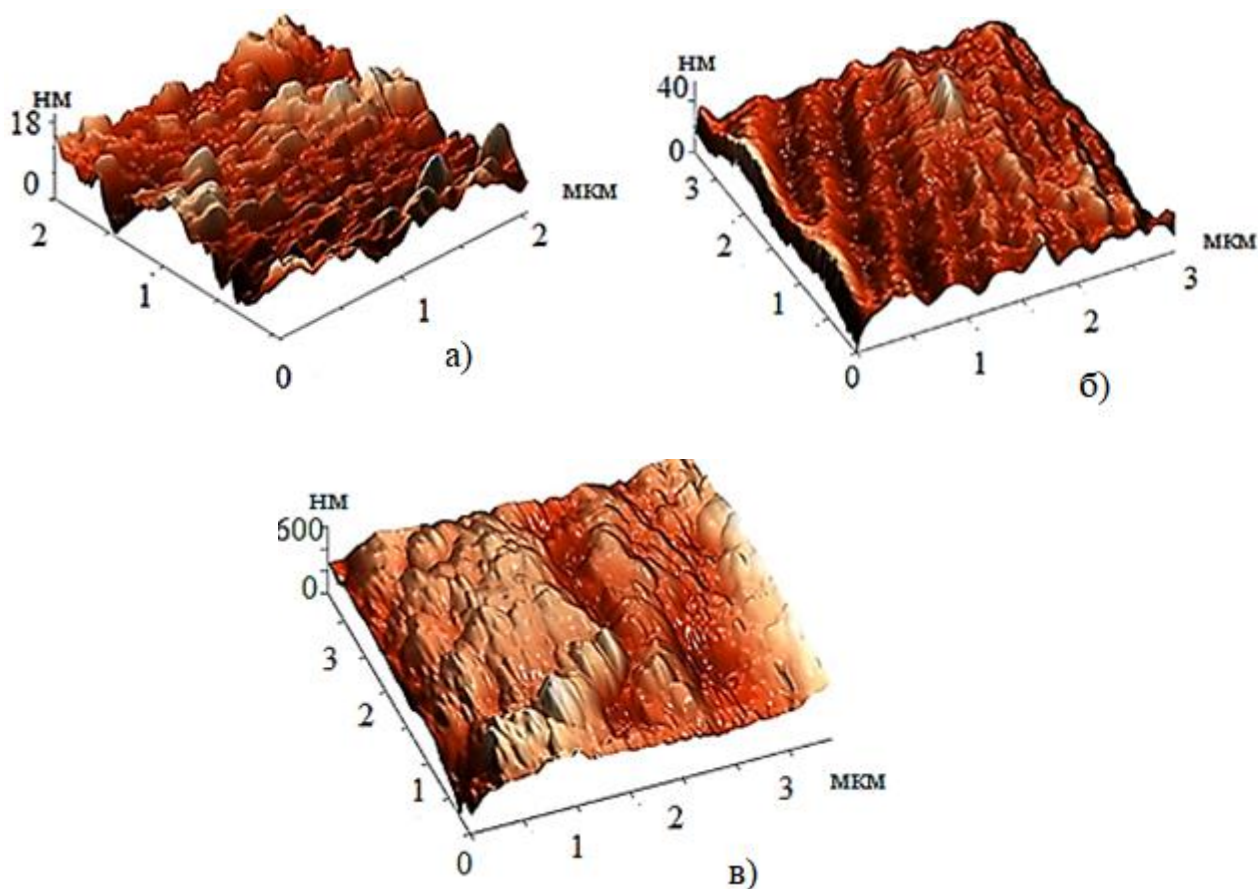


Рис. 15. 3D СЗМ – изображения поверхности образцов элементарных нитей: образец №1 – (а), образец №2 – (б), образец №3 – (в).

Исследование структуры поверхности образцов элементарных нитей из оксида алюминия показало, что при прочих равных условиях контактное взаимодействие отечественных нитей (образец №1) с рабочими органами машин и между собой будет выше, так как большему числу пиков – точек контакта поверхностей соответствует и большее число адгезионных мостиков.

На характеристики внешнего трения в значительной мере влияет распределение материала по высоте шероховатого слоя контактирующих поверхностей. Для статистического анализа и представления характеристик шероховатых поверхностей используют опорную кривую профиля (ОКП), которая характеризует ряд эксплуатационных свойств (герметичность и теплообмен) контактирующих поверхностей. На рис. 16 представлен профиль шероховатой поверхности (Section), гистограмма распределения высоты элементов профиля $Z(t)$ (Hist.) и опорная кривая профиля (Bearing) элементарной нити из оксида алюминия.

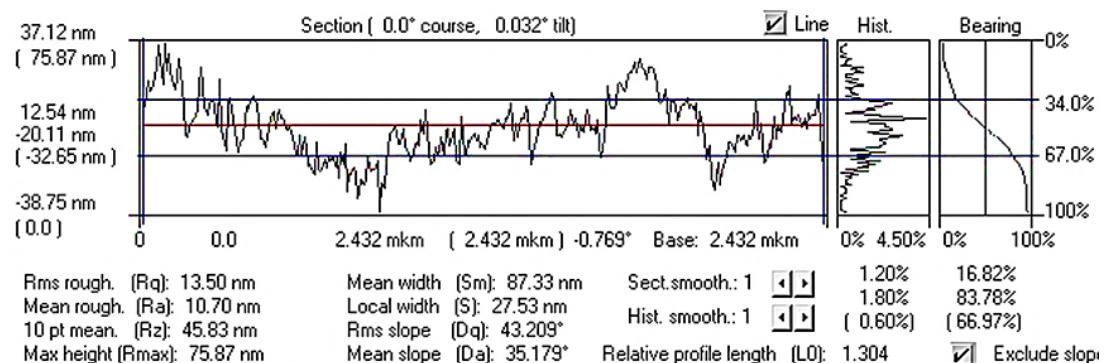


Рис. 16. Профиль шероховатой поверхности, гистограмма распределения высоты элементов профиля $Z(t)$ и опорная кривая профиля поверхности элементарной нити из оксида алюминия

На рис. 17 представлена топографическая характеристика поверхности (Section), гистограмма распределения высоты элементов профиля $Z(t)$ (Hist.) и опорная кривая профиля (Bearing) расположения высоты элементов профиля $Z(t)$ с координатами x и y на поверхности элементарной нити из оксида алюминия.

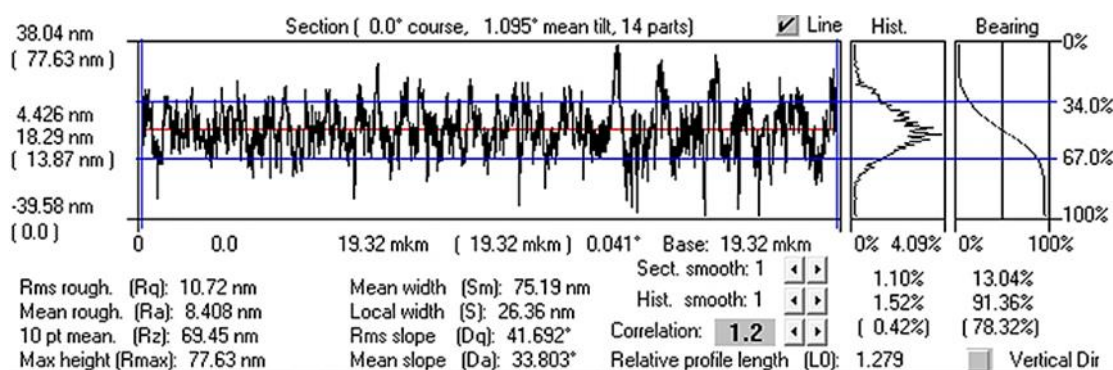


Рис. 17. Топографическая характеристика поверхности ограниченного масштаба, гистограмма распределения высоты элементов профиля $Z(t)$ на поверхности ограниченного масштаба и опорная кривая профиля расположения высоты элементов профиля $Z(t)$ с координатами x и y на поверхности элементарной нити из оксида алюминия

Параметры и термины структуры поверхности элементарной нити из оксида алюминия, приведенных на рис. 16 и рис. 17, представлены в табл. 15.

Табл. 15. Параметры и термины структуры поверхности элементарной нити из оксида алюминия

Параметр	Термин
Mean rough (Ra)	Среднее арифметическое отклонение оцениваемого профиля
Rms rough (Rq)	Среднеквадратичное отклонение оцениваемого профиля
10 pt mean	Высота неровностей профиля по 10 точкам
Max height (Rmax)	Наибольшая высота профиля
Mean width (Sm)	Средний шаг неровностей
Local width (S)	Средний шаг местных выступов профиля
Rms slope (Dq)	Среднеквадратичный уклон
Mean slope (Da)	Средний наклон
Sect.smooth	Сглаживание по сечению
Hist. smooth	Сглаживание гистограммы
Relative profile length	Относительная длина профиля

Параметры профиля и поверхности элементарной нити из оксида алюминия, представленные на рис. 16 и рис. 17, получены на сканирующем

мульти-микроскопе СММ - 2000, СЗМ - изображения обработаны с использованием программы СММ - 2000 - 15 - winXP.

Большие возможности для описания шероховатости поверхности, т.е. для описания случайных величин, значения которых ограничены конечным интервалом, открывает применение бета-распределение. Пусть распределение случайной величины X задается плотностью вероятности f_X , имеющей вид:

$$f_X(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, \quad (1)$$

где α и $\beta > 0$ произвольные фиксированные параметры;

$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx$ – бета-функция.

Параметры функции плотности бета-распределения находятся из выражений:

$$\alpha(\bar{X}, S^2) = \frac{(1-\bar{X})\bar{X}^2}{S^2} - \bar{X}, \quad (2)$$

$$\beta(\bar{X}, S^2) = \frac{\bar{X}(\bar{X}-1)}{S^2} + \bar{X} - 1, \quad (3)$$

где $\bar{X}$ – выборочное среднее;

S^2 – выборочная дисперсия.

При вычислении параметров α и β бета-распределения опорной кривой профиля шероховатости принимается:

$$\bar{X} \triangleq Ra \quad (4)$$

$$S^2 \triangleq Rq, \quad (5)$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение оцениваемого профиля;

Rq – среднеквадратическое отклонение оцениваемого профиля.

При вычислении параметров α и β бета-распределения опорной кривой профиля расположения высоты элементов профиля $Z(t)$ с координатами x и y на поверхности принимается:

$$\bar{X} \triangleq Sa \quad (6)$$

$$S^2 \triangleq Sq, \quad (7)$$

где Sa – среднее арифметическое значение высоты поверхности;

Sq – среднеквадратическое значение высоты поверхности.

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА НИТЕЙ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

3.1. Основные свойства элементарных нитей

Марка отечественных комплексных и крученых нитей из оксида алюминия, приводимых в данном исследовании, дается в соответствии с «Временные технические условия. Нити из оксида алюминия крученые» (ВТУ – 2020, ПРИЛОЖЕНИЕ №1).

3.1.1. Диаметр элементарных нитей

Измерение диаметра элементарных нитей в комплексных нитях марки ОА–11–20, ОА–12–25, ОА–13–30 линейной плотностью 20, 25, 30 текс соответственно проводилось на оптическом микроскопе Altami Polar 3, программа обработки изображений Altami Studio 3.05. На рис. 18 представлен процесс измерения диаметра элементарной нити.

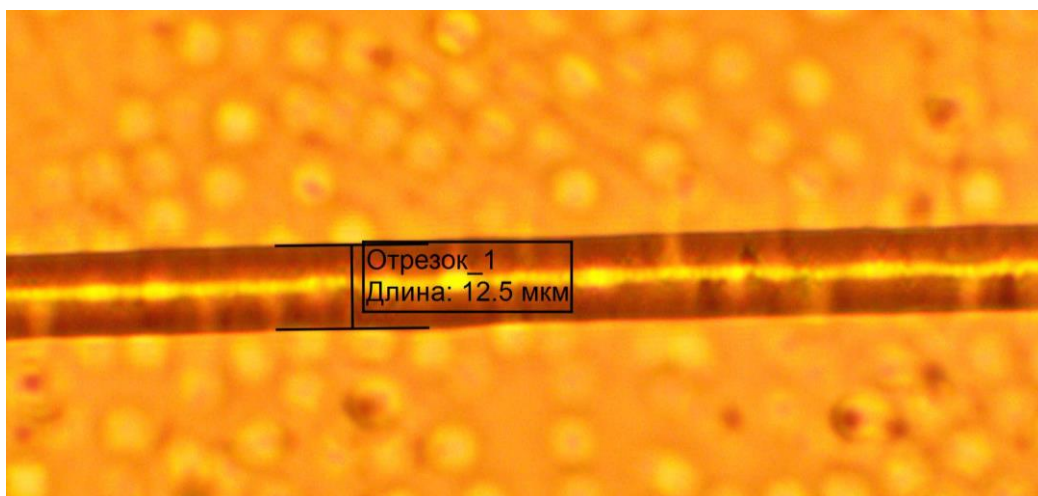


Рис. 18. Процесс измерение диаметра элементарной нити

В табл. 16 представлены результаты измерения диаметра элементарных нитей в комплексных нитях марки ОА–11–20, ОА–12–25, ОА–13–30.

Табл. 16. Результаты измерения диаметра элементарных нитей

Наименование параметра	Марка элементарных нитей		
	ОА–11–20	ОА–12–25	ОА–13–30
Максимальное значение, мкм	12,98	15,20	15,9
Минимальное значение, мкм	8,63	8,07	12,1
Среднее значение, мкм	10,93	11,94	13,12
Среднее квадратическое отклонение	0,94	1,68	1,24
Коэффициент вариации	0,0859	0,141	0,0943

На рис. 19 представлена гистограмма распределение элементарных нитей по диаметру в комплексных нитях марок ОА–11–20 (рис. 19, а), ОА–12–25 (рис. 19, б), ОА–13–30 (рис. 19, в).

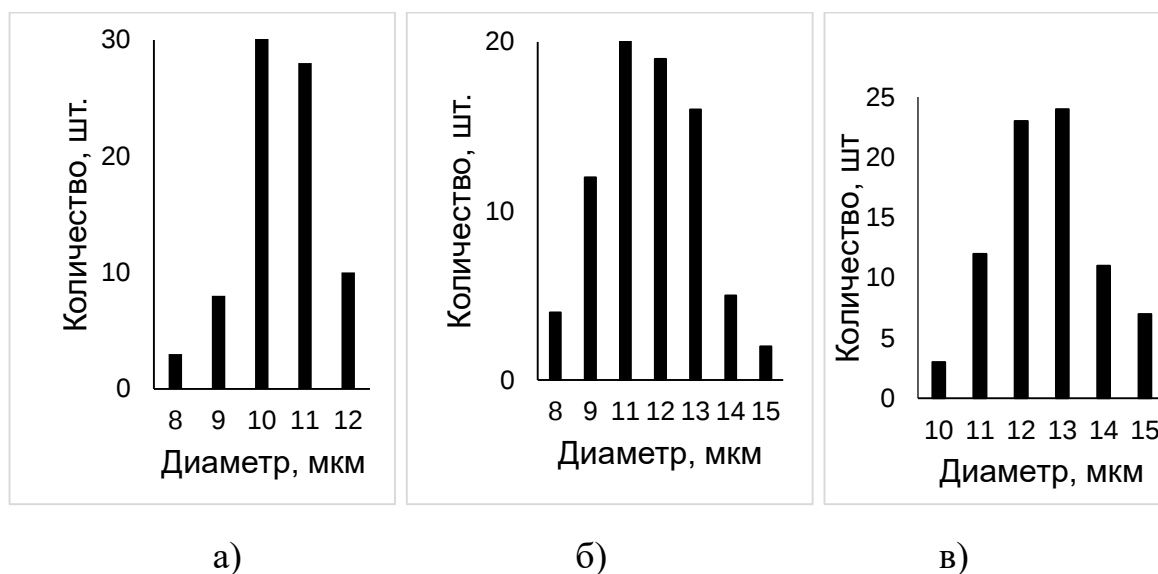


Рис. 19. Гистограмма распределения по диаметру элементарных нитей в комплексных нитях

Распределение числовой случайной величины – это функция, которая однозначно определяет вероятность того, что случайная величина принимает заданное значение или принадлежит к некоторому заданному интервалу.

Нормальное распределение (распределение Гаусса) всегда играло центральную роль в теории вероятностей, так как возникает в результате

воздействия большого числа независимых или слабо зависимых факторов [46]. В связи с большим количеством факторов, действующих при формировании комплексных нитей, можно предположить, что закон распределения элементарных нитей по диаметру в комплексных нитях является близким к нормальному.

С целью проверки отклонения распределения вероятностей диаметра элементарных нитей в комплексной от нормального распределения проведены расчеты по ГОСТ Р ИСО 5479-2002 [47]. Проверку проводили с использованием направленных критериев, которые относятся к характеристикам асимметрии и эксцесса распределения вероятностей наблюдений:

– $\sqrt{\beta_1}$ – асимметрия совокупности;

– β_2 – кривизна совокупности.

Статистические критерии на асимметричность $\sqrt{b_1}$ и кривизну b_2 представлены в следующем виде:

$$|\sqrt{b_1}| = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} \quad (8)$$

$$b_2 = \frac{m_4}{m_2^2} \quad (9)$$

где m_2, m_3, m_4 – моменты второго, третьего и четвертого порядка соответственно.

Направленный критерий проверки на асимметричность, использующий статистику $\sqrt{b_1}$, применяется как для случаев $m_3 > 0$, так и для случаев $m_3 < 0$. В обоих случаях решение принимается в пользу отклонения нулевой гипотезы при уровне значимости $\alpha = 0,05$, когда статистика $|\sqrt{b_1}|$ превышает p – квантиль для $p = 1 - \alpha$. Значения статистики $|\sqrt{b_1}|$ для $\alpha = 0,05$ и объема выборки $n = 80$ приведены в табл. 8 [47].

При использовании направленного критерия проверки на кривизну, если вычисленное значение b_2 превышает критическое значение $p = 1 - \alpha = 0,95$ при объеме выборки n , то нулевая гипотеза должна быть отклонена при

определенном уровне значимости $\alpha = 0,05$. Значения статистики b_2 для $\alpha = 0,05$ и объема выборки $n = 80$ приведены в табл. 9 [47].

Результаты вычисления моментов второго, третьего, четвертого порядков и статистических критериев $\sqrt{b_1}$ и b_2 для независимых измерений диаметра элементарных нитей комплексных нитей марки ОА–11–20, ОА–12–25, ОА–13–30 представлены в табл. 17 [48].

Табл. 17. Результаты вычисления моментов второго, третьего, четвертого порядков, статистических критериев $\sqrt{b_1}$ и b_2

Статистические характеристики	Марка комплексной нити		
	ОА–11–20	ОА–12–25	ОА–13–30
Среднее значение, мкм	10,93	11,94	13,12
Среднее квадратическое отклонение	0,94	1,68	1,24
Коэффициент вариации	0,0859	0,141	0,0943
Момент второго порядка, m_2	0,87	3,06	1,51
Момент третьего порядка, m_3	-0,16	- 1,42	0,11
Момент четвертого порядка, m_4	2,33	20,09	6,26
Статистический критерий на асимметричность, $\sqrt{b_1}$	0,20	0,27	0,06
Табличное значение статистического критерия на асимметричность, $ \sqrt{b_1} _{\text{табл.}}$	0,43	0,43	0,43
Статистический критерий на кривизну b_2	3,08	2,15	2,76
Табличное значение статистического критерия на кривизну, b_2 табл.	3,80	3,80	3,80

Как можно видеть из данных, представленных в табл. 18 при $\alpha = 0,05$, то есть для $p = 1 - \alpha = 0,95$ и объема выборки $n = 80$, критическое значение статистики критерия $|\sqrt{b_1}|_{\text{табл.}}$ равно 0,43, т.е. более, чем вычисленные значения: 0,2; 0,27 и 0,06 для комплексных нитей марки ОА–11–20, ОА–12–25, ОА–13–30 соответственно. Значит, нулевая гипотеза нормального распределения не отклоняется при выбранном уровне значимости.

Как можно видеть из данных, представленных в табл. 18 при $\alpha = 0,05$, то есть для $p = 1 - \alpha = 0,95$ и объема выборки $n = 80$ критическое значение статистики критерия b_2 табл., равно 3,8, т.е. более, чем вычисленные значения:

2,15 и 2,76, для комплексных нитей марки ОА–11–20, ОА–12–25, ОА–13–30 соответственно. Значит, нулевая гипотеза нормального распределения не отклоняется при выбранном уровне значимости.

3.1.2. Механические свойства элементарных нитей

На сегодняшний день комплексные нити из оксида алюминия «ВИАМ» производятся в лабораторных условиях. Физико-механические свойства зарубежных нитей, вырабатываемых в условиях промышленного производства, несколько превышают аналогичные характеристики отечественных нитей. В табл. 18 представлены разрывная нагрузка (Pp), диаметр (d), предел прочности (σ) элементарных нитей зарубежного производства 3M™ Nextel™ 720 [38], 3M™ Nextel™ 610 [49] и отечественного производства «ВИАМ».

Табл. 18. Разрывная нагрузка, диаметр и предел прочности элементарных нитей зарубежного и отечественного производства

Наименование параметра	3M™ Nextel™ 610 (образец А0168)			3M™ Nextel™ 720 (образец А0174)			Отечественная нить «ВИАМ»		
	Pp , сН	d , мкм	σ , МПа	Pp , сН	d , мкм	σ , МПа	Pp , сН	d , мкм	σ , МПа
Среднее значение	31,5	11,3	3077	23,5	12,2	1964	8,6	11,9	865,9
Среднее квадратическое отклонение	3,88	0,52	348	3,46	0,56	287	0,38	1,68	248,53
Коэффициент вариации	0,12	0,046	0,113	0,147	0,045	0,146	0,044	0,14	0,287

Большие значения коэффициента вариации по прочности характерны для оксидных и углеродных нитей, получаемых после термической обработки первичных нитей. Неровнота механических свойств является существенным

недостатком оксидных и углеродных нитей, так, например, коэффициент вариации по прочности углеродных нитей может достигать 0,6 [50]. Большой коэффициент вариации по пределу прочности отечественных нитей вызван несовершенством технологии производства. Но, как можно видеть, коэффициент вариации по пределу прочности отечественных элементарных нитей более 20%, но менее 33%, в таком случае изменчивость вариационного ряда можно считать значительной, но однородной.

На основании статистического анализа прочности твердых тел показано, что предел прочности элементарных нитей в зависимости от диаметра элементарных нитей описывается показательной функцией и аппроксимируется прямой линией в логарифмических координатах [50]:

$$\ln \bar{Y} = A_Y - B_Y \ln d, \quad (10)$$

где $\bar{Y}$ – среднее значение предела прочности;

d – диаметр элементарной нити;

A_Y – коэффициент регрессии, определяющий местоположение линии в осях координат;

B_Y – коэффициент регрессии, измеряющий среднее отношение отклонения результативного признака от его средней величины к отклонению факторного признака от его средней величины на одну единицу его измерения, т.е. наклон линии.

Экспериментально определенные коэффициенты регрессии A_Y и B_Y для элементарных нитей из оксида алюминия зарубежного и отечественного производства представлены в табл. 19.

Табл. 19. Коэффициенты регрессии A_Y и B_Y для элементарных нитей из оксида алюминия зарубежного и отечественного производства

Коэффициенты уравнения	3M™ Nextel™ 720		Отечественная нить «ВИАМ»
	Образец A080	Образец A0174	
A_Y	7,57	7,83	7,59
B_Y	- 0,475	- 1,075	- 1,67

На рис. 20 представлена зависимость предела прочности от диаметра элементарных нитей 3M™ Nextel™ 720 3M Company [38] (рис. 20, а) и «ВИАМ» (рис. 20, б) в логарифмических координатах.

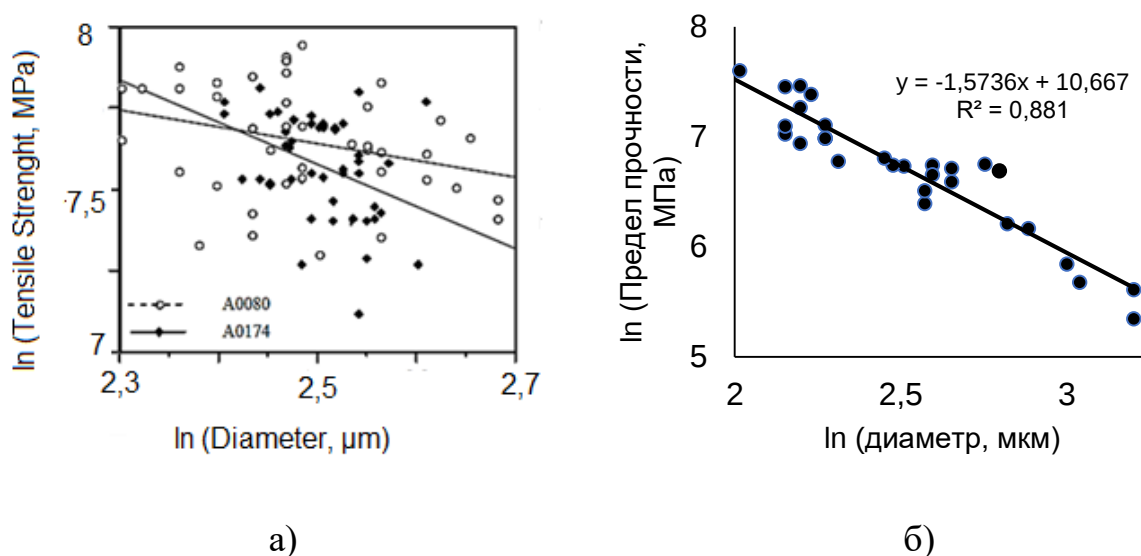


Рис. 20. Зависимость предела прочности от диаметра элементарных нитей из оксида алюминия 3M™ Nextel™ 720 3M Company (а) и «ВИАМ» (б) в логарифмических координатах

Входящие в уравнение регрессии (10) коэффициенты зависят от степени дефектности образцов и связаны с характеристиками неравномерности (коэффициентом вариации) соответствующих показателей свойств. Бóльшая величина этих коэффициентов соответствует увеличению дефектности и неоднородности испытываемых образцов.

С целью определения степени связанности случайных величин определена функциональная зависимость между диаметром и прочностью элементарных нитей в виде коэффициента корреляции $r(X; Y)$. Коэффициент корреляции между диаметром элементарной нити и пределом прочности равен минус 0,8981, при отрицательных коэффициентах корреляции между случайными величинами X и Y увеличение одного показателя (d) влечет за собой уменьшение другого (σ), что соответствует теории прочности твердых тел. Чем меньше коэффициент вариации вариационного ряда диаметра элементарных нитей в комплексной, тем

выше её разрывная нагрузка. Это связано с тем, что при равных условиях испытаний при растяжении до разрыва в первую очередь будут разрушаться элементарные нити бóльшего диаметра, имеющие невысокую прочность.

Известно, что для хрупких материалов (стеклянных и керамических) прочность с уменьшением диаметра элементарной нити увеличивается. Зависимость предела прочности от диаметра отечественных элементарных нитей из оксида алюминия представлена на рис. 21.

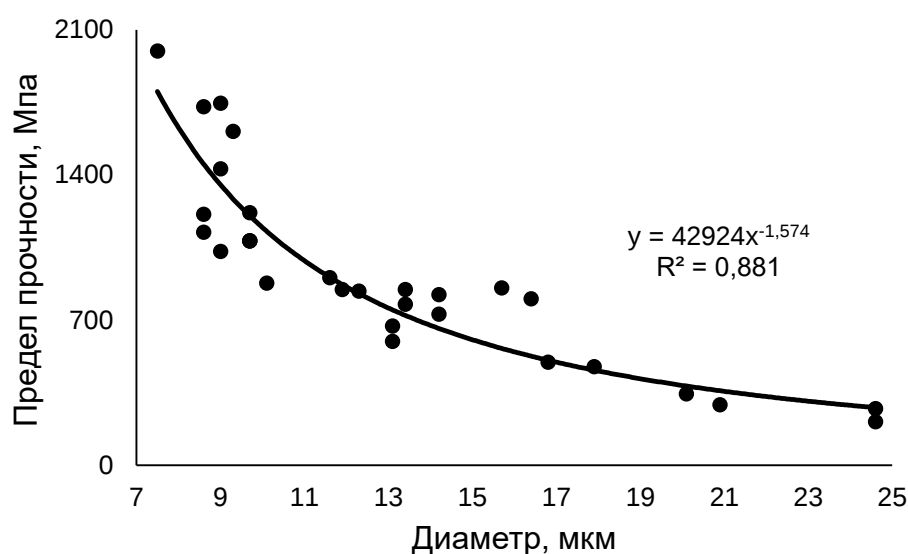


Рис. 21. Зависимость предела прочности от диаметра отечественных элементарных нитей

На рис. 21 можно выделить три области предела прочности элементарных нитей, в зависимости от диаметра:

- высокой от 1500 до 2000 МПа;
- средней от 700 до 1500 МПа;
- низкой от 350 до 700 МПа.

3.2. Основные свойства комплексных нитей

3.2.1. Поперечные размеры и линейная плотность комплексных нитей

Поперечник комплексных нитей измеряли на микроскопе Discovery V12 ZEISS. Измерения производились на образцах комплексных нитей марок ОА–11–20, ОА–12–25, ОА–13–30 линейной плотностью 20, 25 и 30 текс соответственно, длина каждого образца составляла 3 м. По длине каждого образца выполнено 30 измерений с шагом 10 см. Измерения проводились на нити, подвергнутой растяжению нагрузкой 20 сН до ее полного распрямления. Результаты измерений представлены в табл. 20.

Табл. 20. Результаты измерений поперечного размера комплексных нити

Наименование параметра	Марка комплексной нити		
	ОА–11–20	ОА–12–25	ОА–13–30
Максимальное значение, мм	0,41	0,42	0,44
Минимальное значение, мм	0,15	0,16	0,19
Среднее значение, мм	0,26	0,29	0,32
Среднее квадратическое отклонение	0,059	0,0574	0,0588
Коэффициент вариации	0,214	0,198	0,1838

Неровнота комплексных нитей по линейной плотности во многих случаях является определяющей величиной при оценке качества нитей. Попытка оценки неровноты по весу на единицу длины комплексной нити на приборе USTER TESTER 4-SE не была осуществлена в связи с низкими механическими свойствами нити. Линейная плотность образцов комплексной нити определялась по ГОСТ 6943.1 – 2015 [51]. Определение массы нитей проводилось на весах марки SHS A&D Company Limited, с точностью измерения до 0,0001 г. Длина отрезков 1 м, число отрезков 10 шт. Результаты измерений линейной плотности комплексных нитей оксида алюминия представлена в табл. 21.

Табл. 21. Результаты измерений линейной плотности комплексных нитей

Наименование параметра	Марка комплексной нити		
	ОА-11-20	ОА-12-25	ОА-13-30
Максимальное значение, текс	24,4	27,9	32,2
Минимальное значение, текс	17,1	21,13	25,71
Среднее значение, текс	20,4	24,3	28,8
Среднее квадратическое отклонение	4,7	5,1	4,8
Коэффициент вариации	0,2243	0,209	0,167

3.2.2. Механические свойства комплексных нитей

Нити из оксида алюминия являются новым объектом исследования и поэтому процесс испытаний для определения разрывной нагрузки и удлинения не регламентирован. С целью разработки методики определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве были проанализированы государственные стандарты на методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве ГОСТ 6611.2-73 [52] и ГОСТ 6943.10-2015 [53]. С точки зрения получения воспроизводимых результатов испытаний при проведении научно-исследовательских работ по разработке новых текстильных материалов наиболее предпочтителен ГОСТ 6611.2-73. Данный стандарт предусматривает следующие параметры проведения испытаний комплексных и крученых нитей: расстояние между зажимами разрывной машины 250 мм или 500 мм и средняя продолжительность процесса растяжения до разрыва нити 20 ± 3 с.

Скорость перемещения зажима разрывной машины подбирается для нитей таким образом, чтобы обеспечить указанное время разрыва образцов. Аналогичное требования 250 мм зажимная длина и время до разрыва образцов равное 20 ± 3 с устанавливается стандартом ASTM D2256 / D2256M - 10e1 [54], в соответствии с которым производятся испытания до разрыва керамических нитей, производимых 3M Company под торговой маркой 3MTM NextelTM.

Величина разрывной нагрузки текстильных нитей, полученная, на разрывных машинах в различных испытательных лабораториях, имеет бóльшую сходимость при одинаковом времени до разрыва и зажимной длине образцов.

3.2.2.1. Влияния скорости перемещения зажима разрывной машины на разрывную нагрузку комплексных нитей

Между скоростью перемещения зажима разрывной машины и разрывной нагрузкой комплексных и крученных нитей имеется определенная зависимость [55, 56]. С целью определения влияния скорости перемещения зажима разрывной машины на разрывную нагрузку проведены испытания керамических комплексных нитей. В эксперименте были использованы образцы комплексной нити марки ОА–12–25, зажимная длина образцов 250 мм. Скорость перемещения зажима разрывной машины 2 мм/мин, 4 мм/мин, 6 мм/мин, 8 мм/мин.

Разрывная нагрузка определялась по ГОСТ 6611.2 – 73 на разрывной машине «Инстрон» серии 4411, учитывались образцы, у которых время до разрыва составляло 20 ± 3 с. Скорость перемещения зажима разрывной машины и удельная разрывная нагрузка комплексных нитей марки ОА–12–25 представлены в таблице табл. 22.

Табл. 22. Скорость перемещения зажима разрывной машины и удельная разрывная нагрузка комплексных нитей

Наименование параметра	Скорость перемещения зажима разрывной машины, мм/мин			
	2	4	6	8
Количество испытаний	30	30	30	30
Число результатов с временем до разрыва 20 ± 3 с	8	24	25	4
Среднее значение, сН/текс	3,13	2,38	3,92	2,04
Среднее квадратическое отклонение	0,89	0,78	0,772	0,641
Коэффициент вариации	0,3534	0,3648	0,2305	0,3146

На основании данных, представленных в табл. 23, можно сделать вывод, что удельная разрывная нагрузка выше, а коэффициент вариации ниже при скорости перемещения зажима разрывной машины 6 мм/мин.

3.2.2.2. Масштабный эффект механических свойств комплексных нитей

Текстильные волокна и нити имеют разброс показателей механических свойств в группе испытываемых образцов, так называемую продольную неравномерность механических свойств в каждом из образцов. Следствием этого является существенная зависимость средней разрывной нагрузки от зажимной длины. С увеличением зажимной длины значение средней разрывной нагрузки уменьшается. Уменьшение характеристик механических свойств образцов с увеличением линейных размеров образцов при сохранении вида напряженного состояния образца принято называть масштабным эффектом прочностных характеристик и оценивать с использованием коэффициента вариации по соответствующей выборке случайных величин.

С целью исследования закономерностей изменения разрывной нагрузки и удлинения при растяжении до разрыва от размеров образцов проведены испытания комплексной нити марки ОА–12–25 на универсальной разрывной машине «Инстрон» серии 4411 [55, 56]. Зажимная длина образцов варьировалась от 10 до 500 мм, скорость перемещения зажима разрывной машины постоянная равная 2 мм/мин. Количество испытаний равно тридцати для каждой длины образцов. Зажимная длина образцов и удельная разрывная нагрузка при растяжении до разрыва комплексных нитей марки ОА–12–25 представлены в табл. 23.

Табл. 23. Зажимная длина образцов и удельная разрывная нагрузка комплексных нитей

Наименование параметра	Зажимная длина образцов, мм						
	10	25	100	200	300	400	500
Удельная разрывная нагрузка, сН/текс	17,04	16,80	8,78	7,30	6,05	5,98	3,94
Среднее квадратическое отклонение	4,61	2,86	3,34	1,37	2,63	1,27	0,59
Коэффициент вариации	0,271	0,170	0,380	0,188	0,434	0,212	0,149

Зажимная длина образцов и удлинение при растяжении до разрыва комплексных нитей марки ОА–12–25 представлены в табл. 24.

Табл. 24. Зажимная длина образцов и удлинение комплексных нитей

Наименование параметра	Зажимная длина образцов, мм						
	10	25	100	200	300	400	500
Удлинение, %	2,72	1,87	1,23	0,69	0,32	0,39	0,43
Среднее квадратическое отклонение	0,704	0,38	0,22	0,137	0,09	0,08	0,05
Коэффициент вариации	0,259	0,203	0,179	0,197	0,281	0,205	0,117

В рамках описываемого эксперимента при испытаниях на растяжение комплексных нитей из оксида алюминия выявлено, что значение коэффициента вариации по удельной разрывной нагрузке и удлинению в целом возрастает до достижения зажимной длины образцов, равной 300 мм, а затем начинает снижаться.

Нити из оксида алюминия, производимые 3М Comrapu испытываются на разрывную нагрузку с зажимной длиной образцов равной 250 мм [54]. Таким образом, для большей сходимости результатов испытаний при отработке технологии производства крученых нитей из оксида алюминия в дальнейшем необходимо определять разрывную нагрузку на образцах комплексных и крученых нитей с зажимной длиной 250 мм.

На основании статистического анализа прочности твердых тел показано, что зависимость разрывной нагрузки от зажимной длины образцов комплексных

нитей описывается показательной функцией и аппроксимируется прямой линией в логарифмических координатах [50]:

$$\ln \bar{Y} = A_X - B_X \ln L \quad (11)$$

где $\bar{Y}$ – среднее значение удельной разрывной нагрузки;

L – зажимная длина образца;

A_Y – коэффициент регрессии, определяющий местоположение линии в осях координат;

B_Y – коэффициент регрессии, измеряющий среднее отношение отклонения результативного признака от его средней величины к отклонению факторного признака от его средней величины на одну единицу его измерения (вариация y , приходящаяся на единицу вариации x , т.е. наклон линии).

На рис. 22 представлена зависимость удельной разрывной нагрузки от зажимной длины образцов зарубежных 3M™ Nextel™ 720 3M Company [38] и отечественных «ВИАМ» комплексных нитей из оксида алюминия в логарифмических координатах.

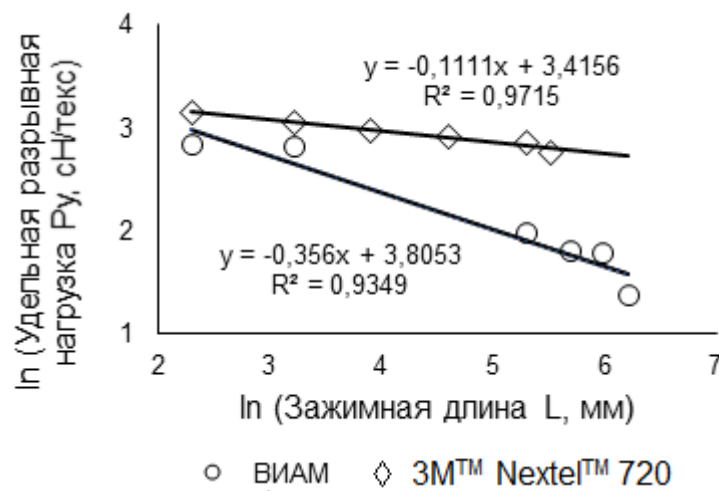


Рис. 22. Зависимость удельной разрывной нагрузки от зажимной длины образцов зарубежных и отечественных комплексных нитей из оксида алюминия и в логарифмических координатах

Экспериментально определенные коэффициенты регрессии A_Y и B_Y для комплексных нитей из оксида алюминия зарубежного и отечественного производства представлены в табл. 25.

Табл. 25. Коэффициенты регрессии A_Y и B_Y для комплексных нитей из оксида алюминия зарубежного и отечественного производства

Коэффициенты уравнения	3M™ Nextel™ 720	Отечественная нить «ВИАМ»
A_Y	3,2	3,1
B_Y	- 0,1176	- 0,3576

Входящие в уравнение регрессии (11) коэффициенты зависят от степени дефектности образцов и связаны с характеристиками неравномерности (коэффициентом вариации) соответствующих показателей свойств. Бóльшая величина коэффициента B_Y отечественных нитей соответствует увеличению дефектности и неоднородности испытываемых образцов.

3.3. Характеристики внешнего трения комплексных и крученных нитей

Характеристикой внешнего трения служит коэффициент трения. Характеристикой стабильности фрикционных свойств пары контактирующих тел является стабильность коэффициента трения, определяемая в процентах. Стабильность коэффициента трения определяется, как отношение среднего значения коэффициента трения к максимальному значению по результатам многократных измерений для данной пары трения при неизменных условиях проводимого эксперимента.

3.3.1 Характеристики внешнего трения, определяемые методом наклонной плоскости

Определение коэффициента трения покоя и стабильности коэффициента трения покоя пары «нить – сталь» осуществлялось методом наклонной плоскости по разработанной методике. [57]. Метод наклонной плоскости не потерял свою актуальность до сегодняшнего дня [58, 59].

В экспериментах использовались нити без замасливателя (вариант №1), нити, обработанные водной эмульсией препарата АВИБ-Б с концентрацией 8% (масс.) непосредственно после нанесения на нить (вариант № 2), с обработкой водной эмульсией препарата АВИБ-Б с концентрацией 8% (масс.) после сушки нитей (вариант №3) В качестве контрпар для комплексных и крученых нитей использовались образцы шероховатости цилиндрические ГОСТ 9378-93 [60] со значениями параметра Ra от 1,6 до 0,0125 мкм. Коэффициент трения покоя пары «комплексная нить – сталь» представлен в табл. 26.

Табл. 26. Коэффициент трения покоя пары «комплексная нить – сталь»

Номер варианта	Значения параметра шероховатости Ra стального образца, мкм							
	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,0125
1	0,19	0,23	0,25	0,29	0,31	0,32	0,35	0,36
2	0,19	0,22	0,24	0,28	0,29	0,32	0,38	0,39
3	0,21	0,24	0,26	0,30	0,32	0,33	0,39	0,41

Стабильность коэффициента трения покоя пары «комплексная нить – сталь» представлена табл. 27.

Табл. 27. Стабильность коэффициента трения покоя пары «комплексная нить – сталь»

Номер варианта	Значения параметра шероховатости Ra стального образца, мкм							
	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,0125
1	96,52	96,15	95,11	95,93	95,88	97,03	89,76	89,99
2	97,49	97,11	96,06	96,89	96,84	98,01	92,69	92,68
3	98,45	98,07	97,02	98,8	98,75	99,94	97,84	97,83

Коэффициент трения покоя пары «крученая нить – сталь» представлен табл. 28.

Табл. 28. Коэффициент трения покоя пары «крученая нить – сталь»

Номер варианта	Значения параметра шероховатости Ra стального образца, мкм							
	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,0125
1	0,25	0,34	0,43	0,51	0,54	0,57	0,59	0,59
2	0,24	0,32	0,40	0,49	0,51	0,54	0,56	0,58
3	0,26	0,36	0,45	0,55	0,58	0,60	0,63	0,64

Стабильность коэффициента трения покоя пары «крученая нить – сталь» представлен в табл. 29.

Табл. 29. Стабильность коэффициента трения покоя пары «крученая нить – сталь»

Номер варианта	Значения параметра шероховатости Ra стального образца, мкм							
	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,0125
1	95,88	96,67	95,43	94,99	95,01	96,93	90,55	91,48
2	97,12	97,43	96,79	96,03	96,97	98,69	94,32	93,42
3	98,79	98,10	97,68	98,28	98,96	99,86	98,01	98,03

Исследование зависимости характеристик внешнего трения пар «нить – нить» от нагрузки в зоне контакта для комплексных и крученых нитей проводили методом наклонной плоскости. Нити на плоскости и контрпаре в первой серии экспериментов располагались параллельно (серия №1), а во второй перпендикулярно (серия №2). Варьирование нагрузки осуществлялось за счет изменения веса контрпары (подвижного образца), точность определения веса контрпары 0,1 сН. Нагрузка на нить изменялась в пределах от 0,98 до 49 сН. Коэффициент трения покоя пары «комплексная нить – комплексная нить» под нагрузкой представлены в табл. 30. Коэффициент трения покоя пары «крученая нить – крученая нить» представлены в табл. 31.

Стабильность коэффициента трения покоя пары «комплексная нить – комплексная нить» и пары «крученая нить – крученая нить» снижается в зависимости от изменения нагрузки для вариантов №1, №2 и №3 комплексных и крученых нитей, но находится в пределах от 82 до 96%.

Табл. 30. Коэффициент трения покоя пары «комплексная нить – комплексная нить» под нагрузкой

Номер варианта	Нагрузка, сН					
	0,98	9,80	19,60	29,40	39,20	49,00
Серия №1						
1	0,64	0,39	0,33	0,31	0,31	0,31
2	0,73	0,46	0,36	0,34	0,29	0,27
3	0,57	0,43	0,30	0,30	0,33	0,34
Серия №2						
1	0,52	0,43	0,32	0,31	0,31	0,33
2	0,71	0,41	0,33	0,29	0,29	0,28
3	0,72	0,40	0,33	0,29	0,28	0,27

Табл. 31. Коэффициент трения покоя пары «крученая нить – крученая нить» под нагрузкой

Номер варианта	Нагрузка, сН					
	0,98	9,80	19,60	29,40	39,20	49,00
Серия №1						
1	0,76	0,66	0,62	0,60	0,58	0,54
2	0,81	0,71	0,66	0,65	0,63	0,59
3	0,73	0,64	0,59	0,58	0,56	0,49
Серия №2						
1	0,53	0,50	0,47	0,47	0,45	0,45
2	0,66	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54
3	0,66	0,62	0,60	0,58	0,56	0,56

Различия в коэффициенте трения покоя нитей, перемещавшихся во взаимно – перпендикулярных направлениях (серия №2), могут быть связаны с анизотропностью шероховатости на поверхности элементарных нитей. Необходимо отметить, что стабильность коэффициента трения для первого варианта второй серии меньше, чем для первого варианта первой серии.

В общем виде экспериментально установленную зависимость $\mu(N)$ можно записать в виде выражения, которое аппроксимируется степенной функцией

$$\mu(N) = KN^x \quad (12)$$

где K и x – коэффициенты, зависящие от условий фрикционного контакта;

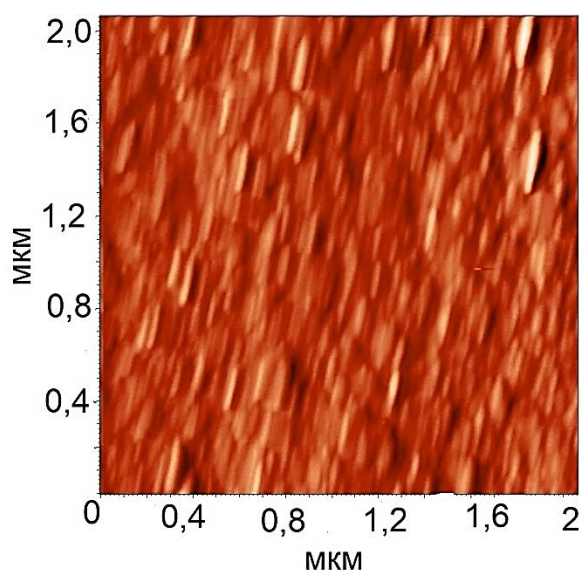
N – нормальная нагрузка в фрикционном контакте.

Коэффициенты уравнения регрессии, значения коэффициента детерминации R^2 и относительной средней квадратической ошибки $\delta f(x)$ представлены в табл. 32.

Табл. 32. Коэффициенты уравнения регрессии, значения коэффициента детерминации и относительной средней квадратической ошибки

Номер варианта	Математическая модель $\mu(N) = KN^x$							
	Комплексные нити				Крученые нити			
	K	x	R^2	$\delta_{f(x)}, \%$	K	x	R^2	$\delta_{f(x)}, \%$
Серия №1								
1	0,6462	-0,199	0,9615	3,25	0,7643	- 0,077	0,9319	4,56
2	0,8484	-0,275	0,9142	4,95	0,8188	- 0,074	0,9604	5,01
3	0,5822	-0,158	0,8148	2,78	0,7514	-0,089	0,8608	3,44
Серия №2								
1	0,5491	-0,147	0,8752	9,31	0,5379	- 0,043	0,9423	7,42
2	0,7262	-0,256	0,9829	6,63	0,6814	-0,051	0,8734	5,98
3	0,7352	-0,265	0,9899	4,23	0,6741	-0,043	0,9188	4,87

Анализ СЗМ – изображений и структурных элементов поверхности элементарных нитей дает основания предполагать, что шероховатость поверхности имеет не изотропный, а анизотропный характер. На рис. 23 представлено СЗМ – изображение участка элементарной нити из оксида



алюминия, полученные на атомно-силовом микроскопе Ntegra Prima (NT-MDT).

Рис. 23. СЗМ – изображение участка элементарной нити из оксида алюминия

Как можно видеть, неровности поверхности элементарных нитей расположены под углом к продольной оси элементарной нити, а отношение числа пиков по оси X к числу пиков по оси Y составляет два одному.

Таким образом, шероховатость поверхности имеет не изотропный, а анизотропный характер. Соответственно, взаимодействие с неровностями продольной и поперечной шероховатостей для анизотропных поверхностей будет иметь более сложный характер, чем для изотропных. Степень изотропности может быть выражена исходя из корреляционных свойств поверхности [61] или на основании исследования продольной и поперечной шероховатости инструментальными методами [62].

Пространственные и корреляционные свойства поверхности характеризуется автокорреляционной функцией $ACF(r)$, определяемую как усредненное по достаточно большой площади произведение высот рельефа в двух точках, отстоящих одна от другой на фиксированном расстоянии r :

$$ACF(\vec{r}) = \frac{1}{N_X N_Y} \sum_{n=0}^{N_X-1} \sum_{k=0}^{N_Y-1} Z(x_n + \tau_{Xm}, y_k + \tau_{Yq}) \cdot Z(x_n, y_k) \quad (13)$$

Из автокорреляционной функции определяется пространственный параметр поверхности Str – аспектное отношение текстуры (*texture aspect ratio*). Для поверхностей с изотропной шероховатостью поверхности имеет место $Str \rightarrow 1$, для поверхностей с ярко выраженной направленной структурой шероховатости $Str \rightarrow 0$. Поверхность элементарных нитей из оксида алюминия имеет величину Str порядка 0,454...0,465. Таким образом, шероховатость поверхности имеет выраженную направленную структуру шероховатости, т.е. анизотропную субмикрощероховатость. Исследования элементарных нитей методами СЗМ показали, что поверхность элементарных нитей имеет значение параметра шероховатости поверхности Ra от 0,010 до 0,060 мкм, т.е. субмикрощероховатую поверхность.

Большой практический интерес представляет определение характеристик внешнего трения нитей из оксида алюминия и образцов, имеющих известные параметры субмикрошероховатой поверхности. Контакт текстильных нитей с твердыми телами, имеющими субмикрошероховатые поверхности, недостаточно исследован.

Экспериментальное определение коэффициента трения покоя и стабильности коэффициента трения покоя пар «нить – образец с субмикрошероховатой поверхностью» проводили методом наклонной плоскости. В качестве контрпар использовались образцы, для которых $Str \rightarrow 1$, т.е. с изотропной шероховатостью поверхности (пластины плоские стеклянные и стекло предметное) и образцы, для которых $Str \rightarrow 0$, т.е. с анизотропной шероховатостью поверхности (концевые меры длины стальные):

– концевые меры длины стальные, значение параметра шероховатости

$Ra\ 0,016\ \mu\text{м}$;

– пластины плоские стеклянные, значение параметра шероховатости

$Ra\ 0,05\ \mu\text{м}$;

– стекло предметное для микропрепаратов, значение параметра шероховатости

$Ra\ 0,028\ \mu\text{м}$.

Нагрузка в контакте 24,5 сН. Контрпары с нитями в первой серии экспериментов располагались на образцах произвольно, во второй серии экспериментов – перпендикулярно направлению перемещения контрпары в первой серии.

Результаты экспериментально определенного коэффициента трения покоя и стабильности коэффициента трения покоя комплексных нитей и контрпар с субмикрошероховатыми поверхностями представлены в табл. 33.

Из данных, представленных в табл. 33, можно сделать вывод, что коэффициент трения зависит от ориентации нитей относительно направления скольжения подвижного образца и от аспектного отношения текстуры поверхности пар трения.

Табл. 33. Коэффициент трения покоя и стабильность коэффициента трения покоя комплексных нитей и контрпар с субмикрошероховатыми поверхностями

№ варианта	Концевая мера длины		Пластина стеклянная		Стекло предметное	
	Коэф. трения покоя	Стабильн. коэф. трения, %	Коэф. трения покоя	Стабильн. коэф. трения, %	Коэф. трения покоя	Стабильн. коэф. трения, %
Серия №1						
1	0,36	93,16	0,31	92,12	0,45	93,13
2	0,37	96,21	0,53	95,56	0,55	95,78
3	0,34	91,17	0,74	90,26	0,99	92,41
Серия №2						
1	0,45	94,18	0,32	92,12	0,46	94,46
2	0,95	87,46	2,78	88,42	3,90	91,25
3	0,53	84,27	0,51	83,88	0,87	90,28

3.3.2. Характеристики внешнего трения, определяемые методом скольжения нити по стальному цилиндрическому телу трения

Определение коэффициента трения движения нитей, скользящих по стальному цилиндрическому образцу, осуществлялось в ИЦ «Питон» АО «НПО Стеклопластик» на стенде для определения коэффициента трения движения по методике, разработанной исследовательским центром. Схема заправки нити на стенде представлена на рис. 24.

Стенд позволяет регулировать входное натяжение нити до 40 сН, устанавливать скорость скольжения по телу трения нити на выходную паковку 4, 8, 20, 50 и 100 м/мин. Тело трения – стальной цилиндр диаметром 10 мм со значением параметра шероховатости поверхности Ra 0,2 мкм, угол охвата нитью α равен 3,14 рад. Динамический коэффициент трения определяли с использованием крученой нити из оксида алюминия марки

ОА–13–30×1×4×2–240. Нить была обработана 8% водным раствором замасливателя АВИБ-Б, эксперимент проводился после сушки нитей.

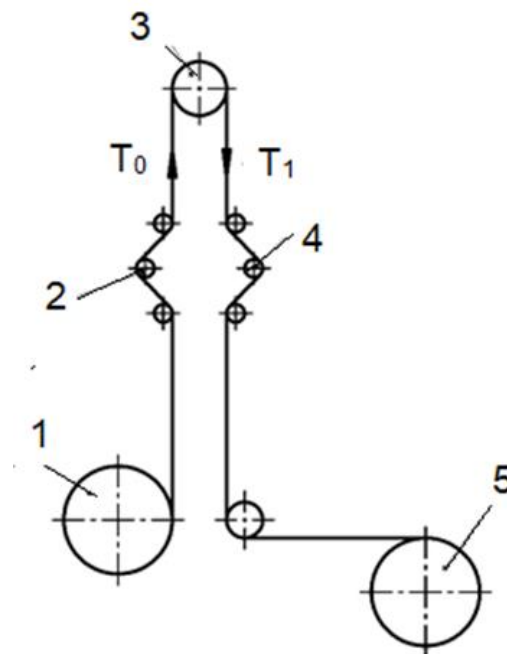


Рис. 24. Схема заправки нити на стенде для определения коэффициента трения движения

На рис. 24: 1 – входная паковка; 2 – тензометр ведомой ветви; 3 – тело трения; 4 – тензометр ведущей ветви; 5 – выходная паковка.

Обработка результатов измерения натяжения нитей T_0 в ведомой и T_1 ведущей ветвях осуществлялось согласно разработанной методике [63] с учетом погрешностей измерения [64]. Метод определения коэффициента трения движения основан на зависимости между входным и выходным натяжением гибкой нити, скользящей с постоянной скоростью по цилиндрической поверхности тела трения:

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right)}{\alpha} \quad (14)$$

Средние значения натяжения в ведомой и ведущих ветвях движущейся нити и коэффициент трения движения крученой нити из оксида алюминия представлены в табл. 34.

Зависимость коэффициента трения движения от скорости скольжения нити по стальному цилиндрическому телу трения представлена на рис. 25.

Табл. 34. Коэффициент трения движения крученной нити из оксида алюминия

Наименование параметра	Скорость скольжения нити, м/мин				
	4	8	20	50	100
Натяжение нити входной ветви, сН	4,66	11,95	19,27	27,39	32,87
Натяжение нити выходной ветви, сН	12,6	32,81	55,84	95,98	145,2
Коэффициент трения движения	0,3168	0,3217	0,3388	0,3994	0,4731
Стабильность коэффициента трения, %	93,27	97,13	98,03	94,25	92,47

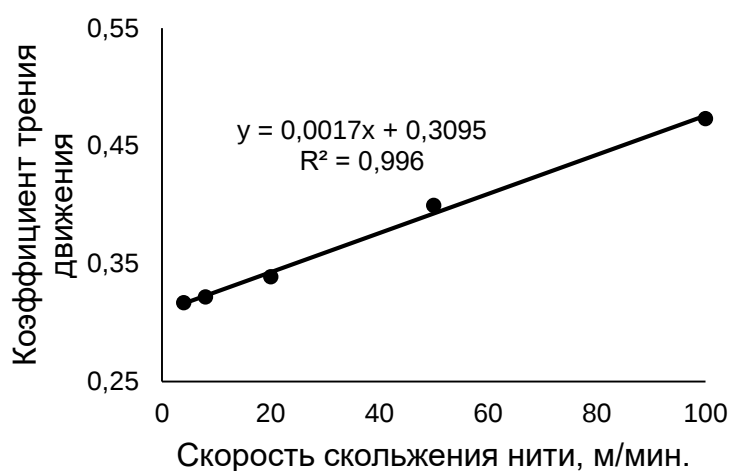


Рис. 25. Зависимость коэффициента трения движения от скорости скольжения нити по стальному цилиндрическому телу трения

В пределах измеряемых скоростей движения нити коэффициент трения движения возрастает пропорционально скорости, что является характерным для текстильных нитей различной природы.

ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРУЧЕНИЯ НИТЕЙ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Крученые нити и пряжа составляют основу производимой текстильной продукции. Широкий ассортимент сырья, используемого в пряже из волокон растительного и животного происхождения (хлопок, лен, шерсть) и нитей (полипропиленовых, стеклянных, углеродных), повлек за собой разработку специализированного оборудования текстильных предприятий по первичной переработке сырья. Кручение волокнистых продуктов выполняется для придания изделиям определенных полезных свойств. Применительно к волокнистым материалам кручением называют вид деформации, а также процесс, при котором эта деформация сообщается материалам. При общем сходстве, процессы кручения нитей из различных материалов имеет свои особенности, которые нашли свое отражение, в том числе и применяемом оборудовании.

Выработка крученых нитей на крутильных машинах имеет одну общую черту – нить в зону кручения подается в виде пучка из двух или нескольких параллельных (трощеных) нитей. Таким образом, трощеные нити подаются в зону формирования совместно, и, соответственно, способ может быть назван совместная подача нитей в зону формирования. Общим для осуществления процесса кручения на кольцевых и этажных крутильных машинах является наличие образованного нитью участка выпуклой формы, так называемого баллона. Натяжение нити в баллоне зависит от многих факторов: скоростного режима работы крутильной машины, вида, свойства и линейной плотности нити. Натяжение нити достигает в вершине баллона 35 сН, а на участке бегунок-паковка 60 сН [65, 66, 67].

Трудоемкость процессов перемотки, трощения и кручения предполагает стремление к объединению нескольких операций в одну. Таким примером может служить однопроцессная крутильная машина, в которой совмещены процесс

тращения и второго кручения [68]. В патенте на машину предусматривается применение веретен двойного кручения для первой крутки и устройство веретено-кольцо-бегунок, обеспечивающее вторую крутку.

4.1. Основные принципы работы и устройство станда кручения нитей по способу отдельной подачи нитей в зону формирования

Керамические нити – новый материал для отечественной текстильной науки. Отечественные комплексных нити из оксида алюминия имеют низкие механические свойства, не позволяющие использовать существующее крутильное оборудование [33]. Это потребовало разработки нового способа кручения, получившего название отдельная подача нитей в зону формирования и устройства для его реализации – экспериментальный стенд.

Основные технические решения по разработке технологии кручения из нитей оксида алюминия, проектированию и изготовлению экспериментального станда были апробированы и реализованы на первом этапе исследований в 2009-2012 гг.

Рассмотрим принцип работы экспериментального станда для кручения одиночных, однокруточных и многокруточных нитей. На рис. 26 представлено схематическое изображение экспериментального станда в варианте кручения одиночной нити (рис. 26, а), в варианте кручения однокруточных и многокруточных нитей в два сложения (рис. 26, б). Направление намотки нити указано стрелкой.

На крутильной платформе 2, которая является крутящим органом станда располагается бобинодержатель 3 с нитеносителем в виде картонной бобины (входной бобины) 4. Кручение нитей осуществляется при вращении платформы 2 вокруг собственной оси от привода 1 и наматывания нити на выходную бобину 6, осуществляемое от привода мотальной головки. С целью получения круток

различного направления, т.е. левой крутки (S) или правой крутки (Z) платформе придается вращательное движение вокруг ее собственной оси в направлении вращения по ходу часовой стрелки либо в направлении вращения против хода часовой стрелки. Частота вращения крутильной платформы и моторной головки ступенчатое, регулируется сменными шестернями и шкивами.

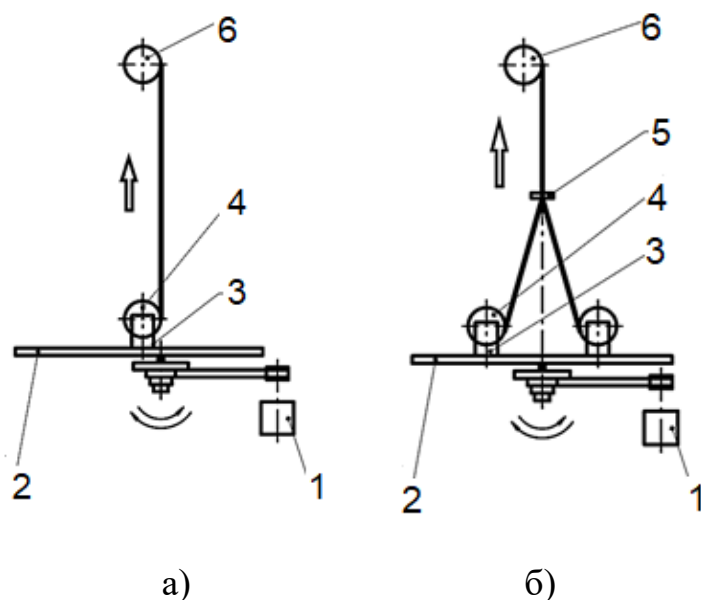
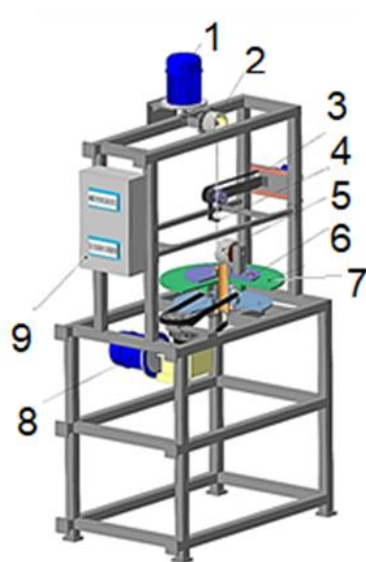


Рис. 26. Схематическое изображение экспериментального стенда в варианте кручения одиночной нити (а), однокруточных и многокруточных нитей в два сложения (б)

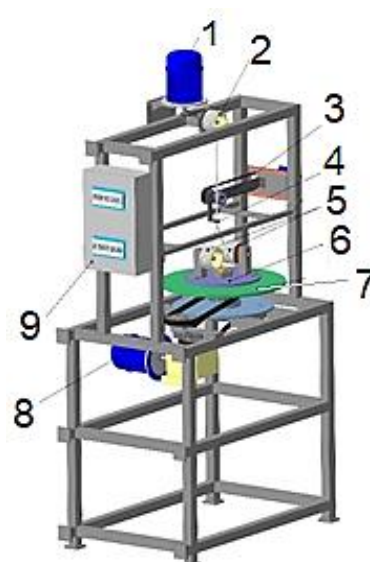
В соответствии с поставленной задачей исследования и на основании опыта, полученного при эксплуатации экспериментального стенда на первом этапе работ, спроектирован и изготовлен универсальный крутильно – перемоточный стенд (универсальный стенд). В основу проектирования были заложены требования по расширению функциональных возможностей, повышения жесткости конструкции и применения гибкой системы управления исполнительными механизмами. На рис. 27 представлены фотография (рис. 27, а), изображение универсального стенда в варианте кручения одиночной нити (рис. 27, б) и в варианте кручения однокруточных и многокруточных нитей в два сложения (рис. 27, в).



а)



б)



в)

Рис. 27. Фотография (а), изображение универсального стенда в варианте кручения одиночной нити (б) и в варианте кручения однокруточных и многокруточных нитей в два сложения (в)

На рис. 27 (б, в):

- | | |
|---------------------------------------|------------------------------|
| 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 | |

Расширение функциональных возможностей универсального стенда достигнуто установкой второй крутильной платформы, что позволяет перейти на новый уровень экспериментальных исследований в области гибких высокотемпературных уплотнений. Жесткость конструкции повышена за счет перехода от балочной к рамной конструкции.

Регулирование натяжения нити, сходящей с вращающейся катушки бобинодержателя, осуществляется созданием тормозящего момента между катушкой бобинодержателя 3 и шайбой 4 устройства для регулирования

натяжения нити (рис. 28, а). Схема сматывания нити с входной бобины представлена на рис. 28, б.

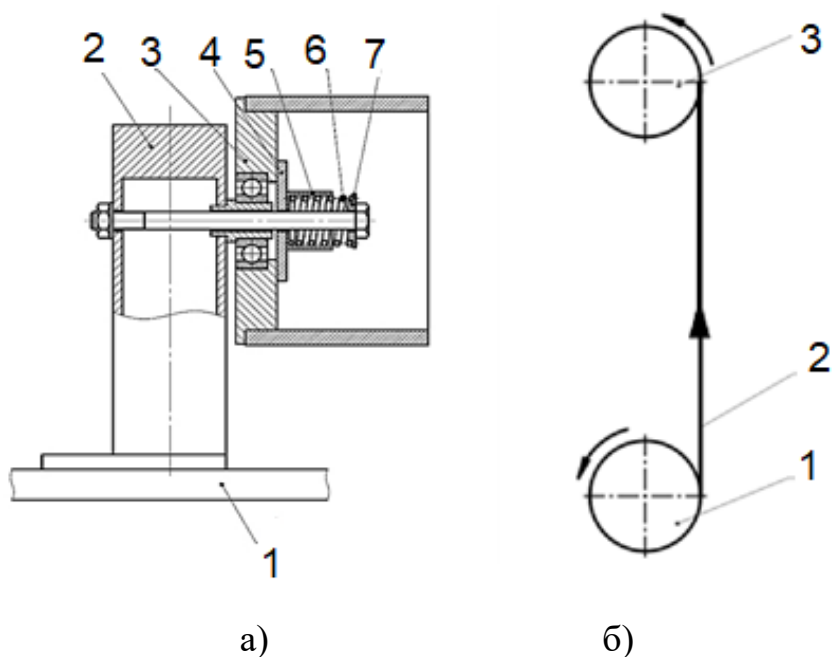


Рис. 28. Бобинодержатель с устройством натяжения нитей (а) и схема сматывания нити с входной бобины (б)

На рис. 28, а:

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 Крутильная платформа | 5 Демпфер |
| 2 Бобинодержатель входной бобины | 6 Пружина винтовая цилиндрическая сжатия |
| 3 Катушка бобинодержателя с бобиной | 7 Центрирующая тарелка |
| 4 Тормозная шайба | |

На рис. 28, б:

- | | |
|------------------|-------------------|
| 1 Входная бобина | 3 Выходная бобина |
| 2 Нить | |

Создаваемый тормозящий момент:

$$M_{\text{ТОРМ}} = T\mu R_{\text{ср}}, \quad (15)$$

где T — сила, создаваемая пружиной винтовой цилиндрической;

μ – коэффициент трения между катушкой бобинодержателя и шайбой;

$R_{\text{ср}}$ – средний радиус поверхности трения $R_{\text{ср}} = R_{\text{в}} + R_{\text{н}}/2$,

где $R_{\text{в}}$ и $R_{\text{н}}$ – внутренний и наружный радиус тормозной шайбы.

Частота вращения крутильной платформы и наматывающей головки регулируется векторными преобразователями частоты со встроенным PLC-контроллером модели E2-8300-SP5L. Программное обеспечение для управления преобразователем частоты и программирования встроенного программируемого логического контроллера (ПЛК) 8300 Drive Link. Управление и контроль состояния преобразователя частоты по последовательной линии связи RS-232/RS-485 от персонального компьютера (ПК) с использованием протокола MODBUS. Контроль частоты вращения крутильной платформы и наматывающей головки осуществляется тахометром часовым ТЧ-10-Р. Допускаемая погрешность измерения частоты вращения $\pm 1\%$, линейной скорости $\pm 2\%$.

4.2. Кручение по способу отдельной подачи нитей в зону формирования

Рассмотрим кручение по способу отдельной подачи нитей в зону формирования на примере однокруточной нити, состоящей из двух нитей (стренг). Способ отдельной подачи нитей заключается в том, что стренга №1 (AC) и стренга №2 (BC) сматываются с входных бобин 1 в точках A и B соответственно (рис. 29, а). На пороге крутки в вершине треугольника кручения ABC точке C стренги соединяются под углом $\alpha_1 + \alpha_2$ и начинается формирование крученой нити. В точке D крученая нить (CD) наматывается на выходную бобину 2. Формирование крученой нити 3 происходит вследствие силового взаимодействия стренг 1 и 2 с узлом формирования (указан стрелкой на рис. 29, б). Узел формирования представляет собой фторопластовую втулку,

установленную в оправке. Втулка узла формирования расположена по оси крутильной платформы.

Кручение является однопроцессным, т.е. процессы трощения и кручения совмещены.

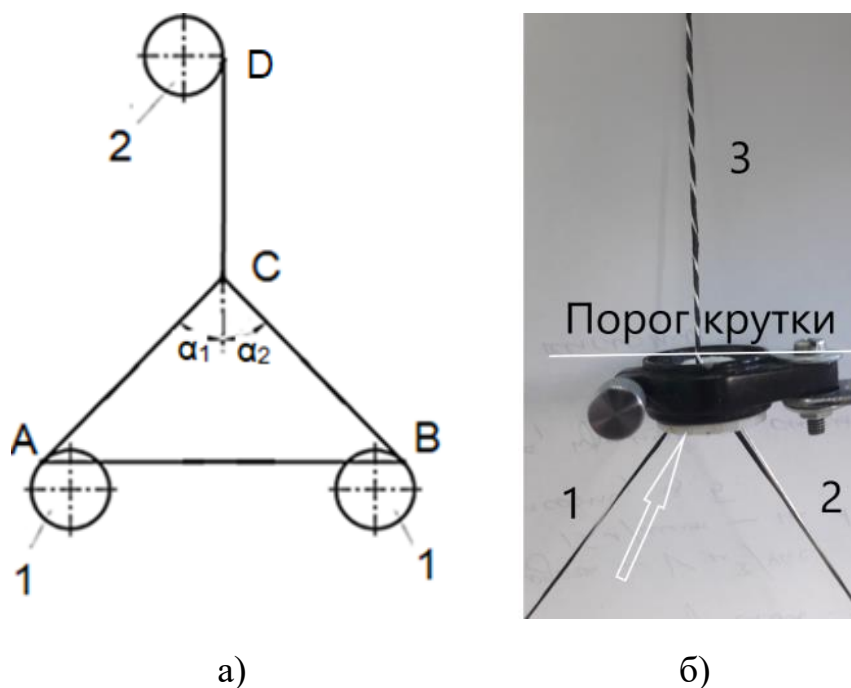


Рис. 29. Схематическое изображение способа отдельной подачи нитей в зону формирования (а), узел формирования и порог крутки (б)

Рассматриваемый способ кручения имеет некоторое сходство с кручением однокруточных нитей по способу А.М. Несслера [69]. Схематическое изображение способа кручения нитей по способу А.М. Несслера и образование треугольника кручения представлено на рис. 30.

Кручение нитей по способу А.М. Несслера заключается в том, что компоненты в виде самостоятельных мычек, проходя через вытяжной аппарат прядильной машины 2 без сложения, подаются к месту сдваивания. Мычки 1 выходят из передней вытяжной пары 2, соединяются в точке С с образованием треугольника кручения ABC и скручиваются вместе в нить, наматываемую на шпулю 3.

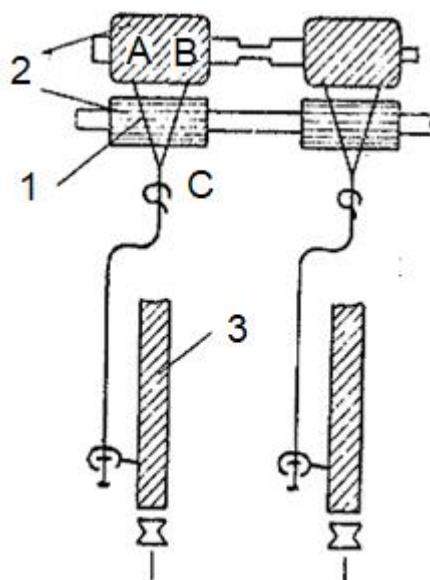


Рис. 30. Схематичное изображение кручения нитей
по способу А.М. Несслера

Г.В. Соколов провел анализ данного способа кручения, при этом отметив ряд характерных для него особенностей. Одной из особенностей однопроцессного способа кручения с образованием треугольника кручения является уплотняющий эффект крутки. Нити, выработанные по способу А.М. Несслера, при равных значениях крутки, имеют разрывную нагрузку больше, чем нить, выработанная по способу совместной подачи [70].

Уплотняющий эффект крутки пряжи и нитей при кручении по способу А.М. Несслера возникает вследствие особенности силового взаимодействия стренг в процессе формирования крученой нити. Можно сказать, что нитесоединение из вспомогательного, предназначенного для некоторого улучшения условий соединения стренг, превращается в неотъемлемый элемент крутильно-формирующего устройства с активным нитесоединением [71, 72, 73]. Процесс активного нитесоединения является характерным и при кручении нитей по способу отдельной подачи.

Согласно первому постулату кручения [70] действительная крутка при кручении нити возможна только при взаимном относительном угловом

смещении концевых поперечных срезов относительно ее геометрической оси крутящим органом.

Крутящим органом универсального стенда служит крутильная платформа (рис. 27, а), а формирующим – узел формирования (рис. 29, б). Число оборотов крутильной платформы, необходимых для завершения формирования крученой нити, зависит от величины крутки. Число оборотов крутильной платформы, необходимых для формирования однокруточной углеродно-кварцевой нитей линейной плотностью 400 текс, равно пяти для крутки 45 кручений/м (рис. 31, а) и равно двенадцати для крутки 127 кручений/м (рис. 31, б).

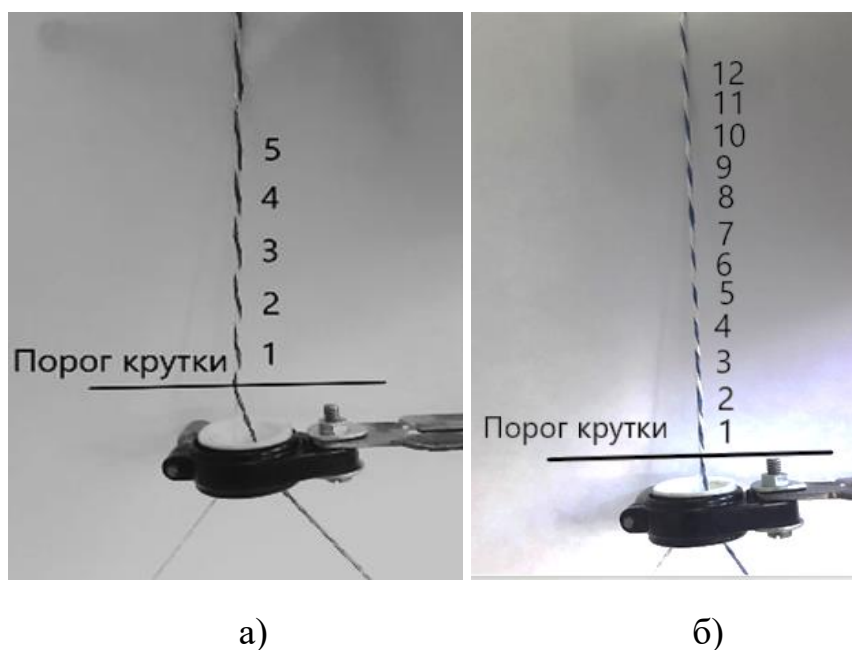


Рис. 31. – Число оборотов крутильной платформы, необходимых для завершения формирования однокруточных нитей с круткой 45 кручений/м (а) и 127 кручений/м (б)

Исследование кручения нитей по способу отдельной подачи нитей проводили на однокруточной нити из двух стренг. Первая стренга из углеродной нити УКН-М 3К линейной плотностью 200 текс, вторая стренга из кварцевого ровинга линейной плотностью 200 текс. Угол при вершине треугольника кручения на пороге крутки равен 76° (рис. 32).

Рассмотрим силовое взаимодействия двух стренг на пороге и за порогом крутки при выработке однокруточной углеродно-кварцевой нити в два сложения с круткой 127 кручений/м. Натяжение каждой из стренг равно 20 сН. На рис. 32 представлена схема силового взаимодействия стренг на пороге крутки. На пороге крутки в точке C происходит нитесоединение, которое сопровождается силовым взаимодействием стренг.

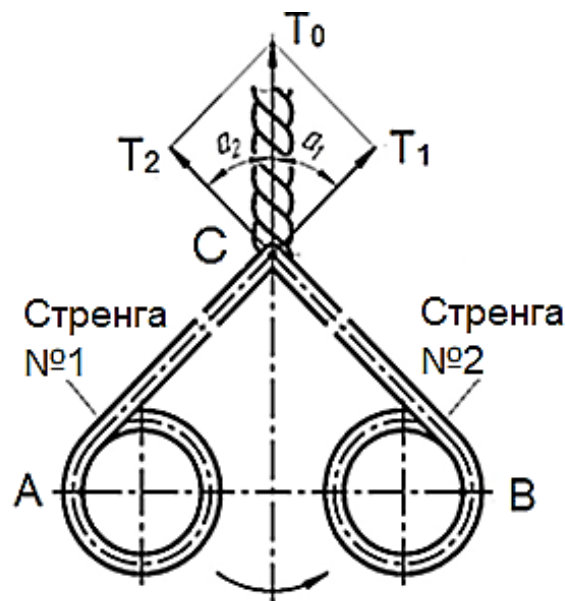


Рис. 32. Схема силового взаимодействия двух стренг на пороге крутки

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

Рассмотрим силовое взаимодействия двух стренг за порогом крутки. На рис. 33 представлена схема силового взаимодействия стренг в крученой нити за порогом крутки. Стренга №1 находится под натяжением с силой T_1 , стренга №2 находится под натяжением с силой T_2 . Силы T_1 и T_2 действуют параллельно результирующей силе T_0 . Вектора сил T_1 и T_2 приложены в точках O_1 и O_2 , расположенных на пересечении осей стренг №1 и №2 и плоскости, перпендикулярной оси крученой нити, сила T_0 приложена в точке A [74].

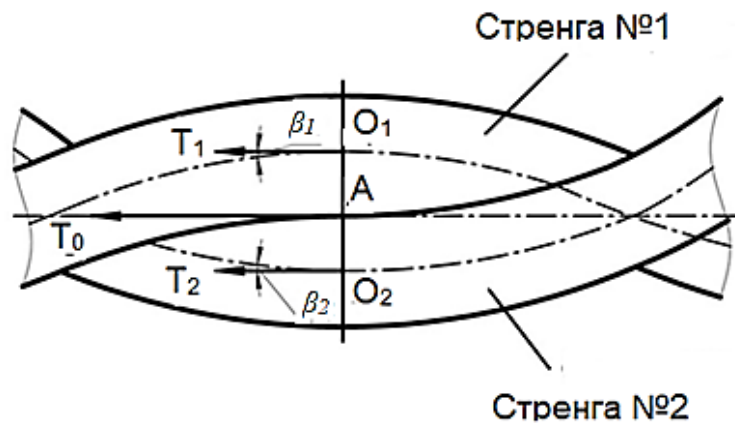


Рис. 33. Схема силового взаимодействия двух стренг за порогом крутки

В точке A на стренгу №1 действует сжимающая сила $T_2 \operatorname{tg} \beta_2$, на стренгу №2 действует сжимающая сила $T_1 \operatorname{tg} \beta_1$. В рассматриваемом случае после первого полного оборота крутильной платформы угол наклона стренг к оси крученой нити составит $\beta_1 = \beta_2 = 20^\circ 42'$ (табл. 35), и на каждую из стренг будет действовать сжимающая сила, равная 7,67 сН. В связи с тем, что в процессе формирования угол наклона осей стренг к оси крученой нити уменьшатся до значения $\beta_1 = \beta_2 = 18^\circ 57'$, после двенадцатого оборота крутильной платформы (табл. 35) на каждую из стренг будет действовать сжимающая сила, равная 6,8 сН.

В процессе формирования изменяются параметры крученой нити: диаметр (d_0 , мм), шаг крутки (h , мм), и угол наклона осей стренг (β , град) к оси крученой нити. Измерения d_0 и h проводилось на микроскопе Discovery V12 ZEISS. Необходимо отметить, что шаг винтовой линии крученой нити с числом круткой 127 кручений/м составляет 7,874 мм, а измеренный 7,7 мм. Таким образом, погрешность измерения шага винтовой линии составляет 2,26%.

Вычисление угла β проводилось по формуле [75]:

$$\operatorname{tg} \beta = 2\pi k R_2 t_2, \quad (16)$$

где k – коэффициент пропорциональности, величина которого для двух стренг принимается равной 0,54;

R_2 – радиус крученой нити;

$t_2 = 1000/h$ – число кручений на 1 метр.

Изменение параметров однокруточной углеродно-кварцевой нити линейной плотностью 400 текс в два сложения с круткой 127 кручений/м в процессе формирования представлены в табл. 35.

Табл. 35. Изменение параметров однокруточной углеродно-кварцевой нити с круткой 127 кручений/м в процессе формирования

Параметр	Число оборотов крутильной платформы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d_0	0,95	1,04	1,1	1,14	1,2	1,26	1,36	1,4	1,44	1,46	1,5	1,56
h	4,03	4,68	4,94	5,12	5,21	5,40	5,51	6,05	6,61	7,14	7,43	7,71
t_2	247	214	202	195	191	185	181	165	151	139	134	129
β	20,7	20,6	20,6	20,7	21,2	21,6	22,7	21,4	20,3	19,1	18,9	18,9

Изменение диаметра однокруточной нити линейной плотностью 400 текс в два сложения с круткой 127 кручений/м в процессе формирования представлена на рис. 34.

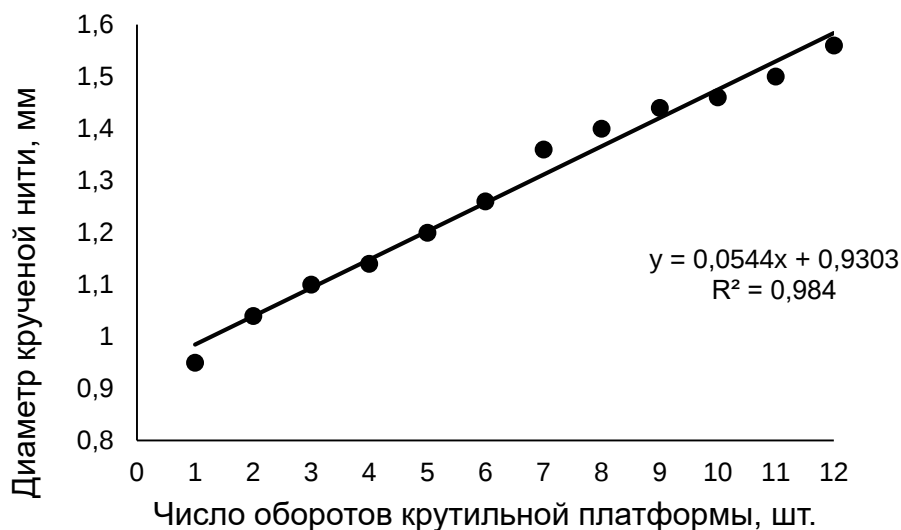


Рис. 34. Изменение диаметра однокруточной нити в процессе формирования

Изменение угла наклона осей стренг к оси однокруточной нити с круткой 127 кручений/м в процессе формирования представлено на рис. 35. Как можно видеть на рис. 35, изменение углов наклона стренг к оси однокруточной нити в процессе формирования крученой нити носит сложный характер.

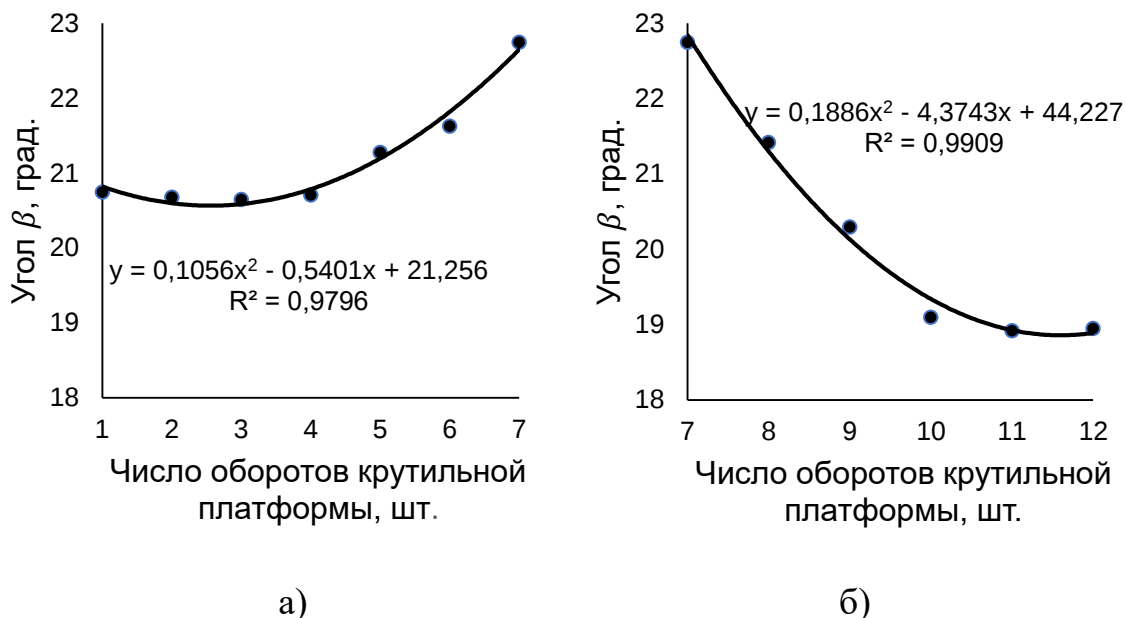


Рис. 35. Изменение угла наклона осей стренг к оси однокруточной нити в два сложения в процессе формирования с первого по седьмой (а) и с седьмого по двенадцатый оборот (б) крутильной платформы

Угол β возрастает от первого до седьмого витка (рис. 35, а), а затем от седьмого до двенадцатого витка снижается (рис. 35, б). Это вызвано тем, что на первом этапе формирования от первого до седьмого витка диаметр крученой нити увеличивается на 30% и одновременно с этим шаг винтовой линии увеличивается на 26%. На втором этапе формирования от седьмого до двенадцатого витка диаметр увеличивается только на 14%, а шаг на 40%.

Рассмотрим взаимодействие стренг однокруточной нити в два сложения с втулкой узла формирования. Нить подвергается крутке на участке CD (рис. 30, 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 (рис. 36).

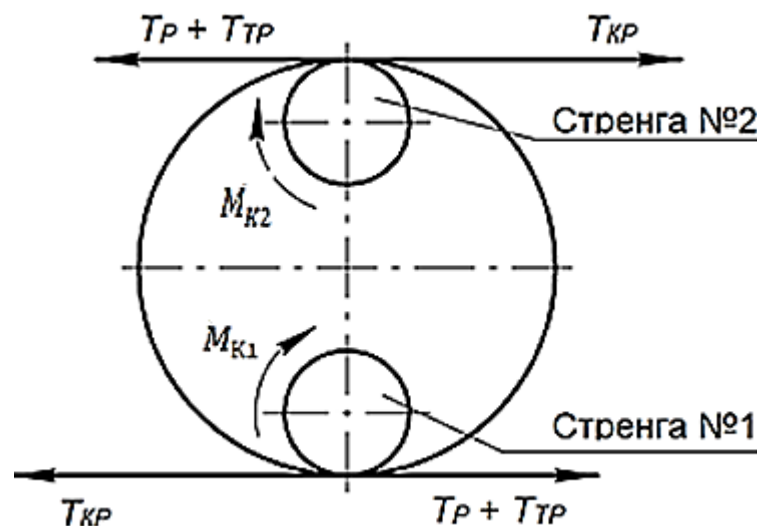


Рис. 36. Схематическое изображение силового взаимодействия стренг с втулкой узла формирования

Сила T_{KP} создает крутящий момент:

$$M_{K1} = M_{K2} = T_{KP} l \quad (17)$$

где M_{K1} , M_{K2} – крутящие моменты, действующие на каждую из стренг:

l – плечо силы, в рассматриваемом случае для стренг, расположенных на пороге крутки под углом α к оси крученой нити:

$$l = L_c / \cos \alpha, \quad (18)$$

где L_c – расстояние от точки контакта стренги с втулкой узла формирования до порога крутки;

α – угол между осью стренги и осью крученой нити в вершине треугольника кручения.

Из правила сложения моментов момент крученой нити в два сложения:

$$M_K = M_{K1} + M_{K2} \quad (19)$$

Деформация кручения элементарных нитей под действием крутящего момента M_K вызывает реактивный крутящий момент M_{PK} . Вычисление M_{PK} Г.В. Соколов рекомендует проводить по формуле [70]:

$$M_{PK} = \frac{\varphi G I_P}{L}, \quad (20)$$

где φ – угол закручивания, рад;

G – модуль сдвига;

I_P – полярным момент инерции;

L – длина нити в зоне кручения.

Момент M_{Tr} , создаваемый силой T_{Tr} , зависит от коэффициента трения покоя между элементарными нитями в стренгах, коэффициента трения движения между стренгами и втулкой узла формирования. Величина коэффициента трения покоя и коэффициента трения движения могут изменяться в зависимости от параметров фрикционного контакта.

Процесс формирования крученой нити из n числа стренг с точки зрения механической системы сопровождается уменьшением полной энергии по окончании процесса формирования крученой нити. Полная механическая энергия равна сумме потенциальной и кинетической энергий системы:

$$E = E_p + E_k \quad (21)$$

Потенциальная энергия упруго деформированного тела – энергия, обусловленная взаимодействием частей тела друг с другом. Она равна работе внешних сил по растяжению стренг на величину Δx :

$$E_p = \frac{k \Delta x^2}{2} \quad (22)$$

При вращении твердого тела относительно неподвижной оси его отдельные i точки, находящиеся на различном расстоянии от оси вращения, имеют различные скорости V_i . Поэтому для того, чтобы найти кинетическую энергию вращательного движения твердого тела, необходимо разбить это тело на элементарные объемы так, чтобы каждый элементарный объем можно было

рассматривать как материальную точку массой m_i , находящуюся на определённом расстоянии r_i от данной оси вращения. Тогда кинетическая энергия вращательного движения твердого тела E_k равна сумме кинетических энергий всех материальных точек массами m_i , имеющих угловую скорость вращения ω всех материальных точек:

$$E_k = \frac{J\omega^2}{2} \quad (23)$$

Согласно теореме Гюйгенса — Штейнера, момент инерции тела J относительно произвольной оси OO_1 равен сумме момента инерции этого тела J_c относительно оси, проходящей через центр масс тела параллельно рассматриваемой оси и произведения массы тела m на квадрат расстояния d между осями:

$$J = J_c + md^2 \quad (24)$$

где m – полная масса тела.

Момент инерции нити, которую можно представить в виде тонкого стержня AB (рис. 37), расположенного под углом α к оси крученой нити относительно оси OO_1 , равен [74]:

$$J_c = \frac{1}{3}ml^2 \cdot \sin^2 \alpha \quad (25)$$

отсюда следует, что момент инерции стренги относительно оси крученой нити:

$$J = \frac{1}{3}ml^2 \cdot \sin^2 \alpha + md^2 = m \left(\frac{1}{3}l^2 \sin^2 \alpha + \frac{1}{4}l^2 \sin^2 \alpha \right) = \frac{7}{12}ml^2 \sin^2 \alpha \quad (26)$$

соответственно, момент инерции двух стренг относительно оси крученой нити:

$$J = 1 \frac{1}{6}ml^2 \sin^2 \alpha \quad (27)$$

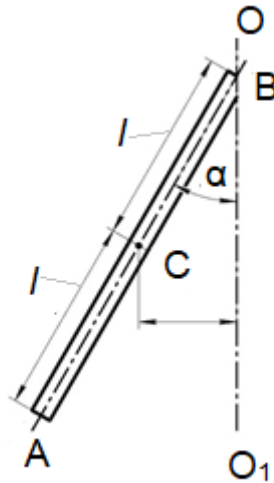


Рис. 37. Схема к определению момента инерции нити при сходе с бобины

Кинетическая энергия механической системы из n стренг будет уменьшаться вследствие изменения формы и размеров крученой нити и внешнего воздействия обусловленное силами трения, действующих в зоне формирования, а изменение полной механической энергии системы тел будет равно работе сил трения. Таким образом, можно наблюдать переходный процесс в механической системе как реакцию на приложенное к ней внешнее воздействие.

Протекание и продолжительность переходного процесса определяются его видом, особенностями механической системы и количеством содержащихся в ней инерционностей. Как было указано выше, формирование крученой нити происходит с переменным шагом. Шаг изменяется от величины обусловленной параметрами процесса кручения до значения, соответствующего величине крутки, определяемой выражением:

$$K = n_b/V_n, \quad (28)$$

где n_b – частота вращения крутильной платформы, мин^{-1} ,

V_n – линейная скорость сматывания нити с входной бобины.

В крученых нитях изменение формы поперечного сечения стренг приводит к изменению структуры крученой нити и угла наклона элементарных нитей в наружных и внутренних слоях крученой нити. Впервые изменение структуры

сечения крученой нити обосновал *L.R.G. Treloar* в работе «*Geometry of multi-ply yarns*» [76].

В ряде работ [70, 75, 77] авторы, анализируя процесс кручения нитей, вводят допущение об отсутствии поперечной деформации стренг в процессе кручения. С другой стороны, там же в работе [75] К.И. Корицкий показал, что стренги крученой нити в процессе кручения сминаются, и этот процесс необходимо учитывать при проектировании нитей. Поперечное сечение стренги в крученой нити близко к эллипсу. Коэффициент смятия К.И. Корицкий предлагает выражать через отношение между параметрами сечения стренги:

$$\eta = \sqrt{b/a} \quad (29)$$

где b – половина большой оси эллипса;

a – половина малой оси эллипса.

На рис. 38 представлено условное изображение поперечного сечения крученой нити в два сложения без учета смятия стренг (рис. 38, а) и с учетом смятия стренг (рис. 38. б).

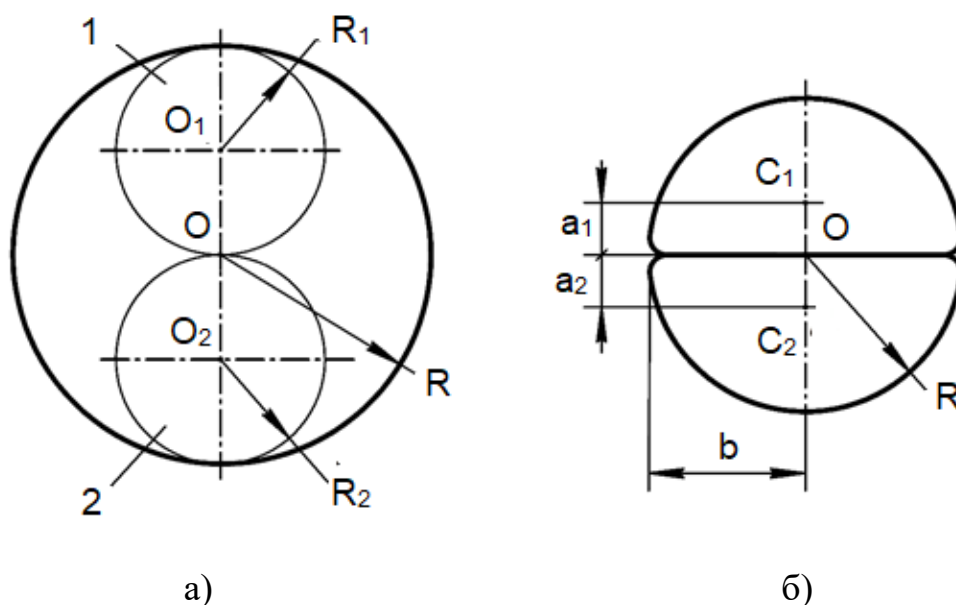


Рис. 38. Условное изображение поперечного сечения крученой нити в два сложения без учета смятия стренг (а) и с учетом смятия стренг (б)

На рис. 38: O – ось нити в два сложения, O_1 и O_2 – ось стренги №1 и стренги №2 соответственно, R_1 и R_2 – радиусы первой и второй стренг, R – радиус крученной нити в два сложения, C_1 и C_2 – геометрические центры стренги №1 и

с

т 3

р

д

я

н

и

$$X_C = \frac{2}{3} R \frac{\sin \alpha}{\alpha} \quad (30)$$

№

где R – радиус круга;

и

α – половина центрального угла в радианах;

р

X_C – расстояние от геометрического центра до центра круга.

е

д

о

л

в

н

и

я

т

н

Рис. 39. Определение геометрического центра кругового сектора

а

р

В табл. 36 приведены величины X_C для стренг в крученных нитях однокруточных нитей в два, три, четыре сложения, вычисленные по формуле (30).

Табл. 36. Координаты геометрического центра стренг

т

р

а

н

Число стренг в крученой нити	2	3	4
Координаты геометрического центра	0,425 R	0,551 R	0,601R

Смятие стренг в процессе формирования крученой нити приводит к увеличению плотности нитей. Плотность крученых нитей определяется по формуле [70]:

$$\gamma = \frac{T}{\pi d^2 250} \quad (31)$$

где d – диаметр окружности, описанный вокруг стренг в крученой нити;

T – линейная плотность крученой нити.

На рис. 40 представлено изменение плотности однокруточной углеродно-кварцевой нити линейной плотностью 400 текс в два сложения с круткой 127 кручений/м в процессе формирования.

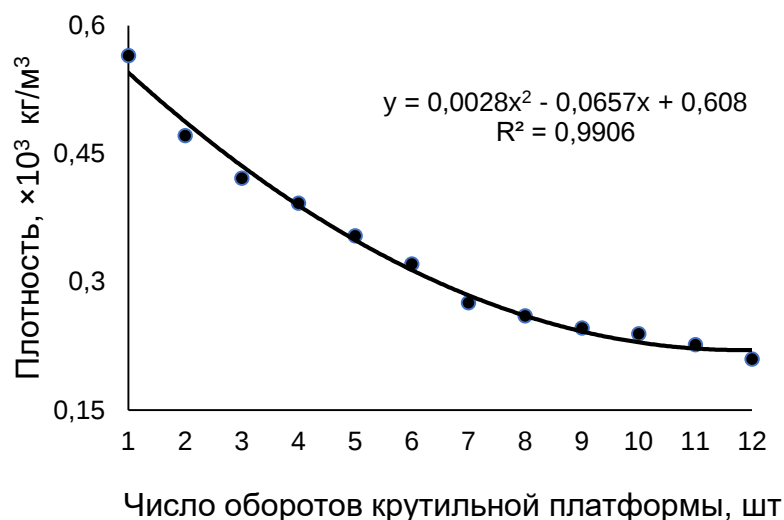


Рис. 40. Изменение плотности однокруточной углеродно-кварцевой нити в два сложения в процессе формирования

Диаметр крученой углеродно-кварцевой нити в два сложения с круткой 127 кручений/м, выработанной по способу совместной подачи, равен 1,9 мм, коэффициент смятия равен $\eta = 1,084$, плотность равна 141 кг/м³. Диаметр углеродно-кварцевой нити, выработанной по способу отдельной подачи, равен

1,56 мм, коэффициент смятия равен $\eta = 1,534$, плотность равна 209 кг/м^3 . 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.

4.3. Исследование образования порока штопорная крутка при кручении по способу отдельной подачи нитей в зону формирования

Оптимальная структура крученых нитей определяется ровнотой натяжения стренг при кручении и связанным с этим равенством углов наклона стренги №1 и стренги №2 к оси крученой нити: $\beta_1 = \beta_2$ (рис. 41).

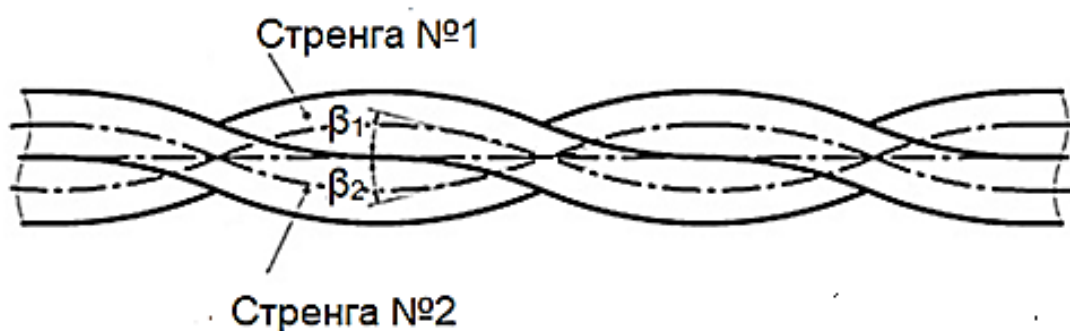


Рис. 41. Схематическое изображение крученой нити оптимальной структуры

Одним из пороков крученой нити является штопорная крутка нити, которая в государственном стандарте [79] определена как порок в виде витков, выступающих спиралью на поверхности нити, при этом $\beta_1 < \beta_2$, (рис. 42).

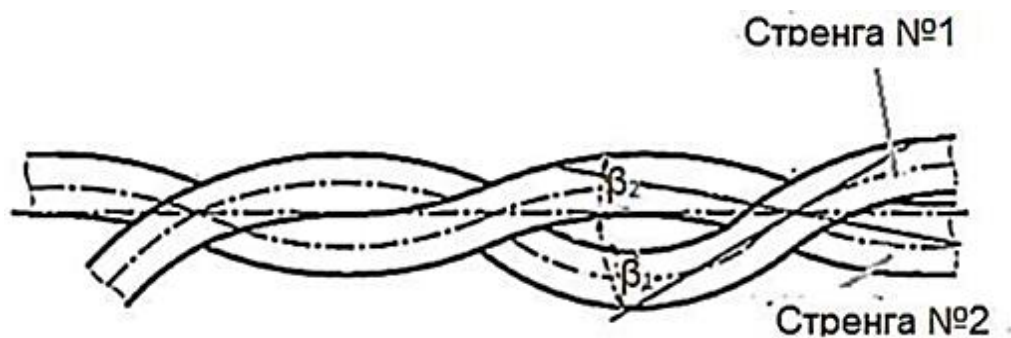


Рис. 42. Схематическое изображение порока штопорная крутка

Порок штопорная крутка возникает вследствие неравноты натяжения стренг в крученой нити в процессе формирования. Исследование влияния неравноты натяжения стренг на образование порока штопорная крутка проводилось на универсальном стенде. Схематическое изображение образования порока штопорная крутка вследствие неравноты натяжения стренг при кручении по способу отдельной подачи нитей представлено на рис. 43.

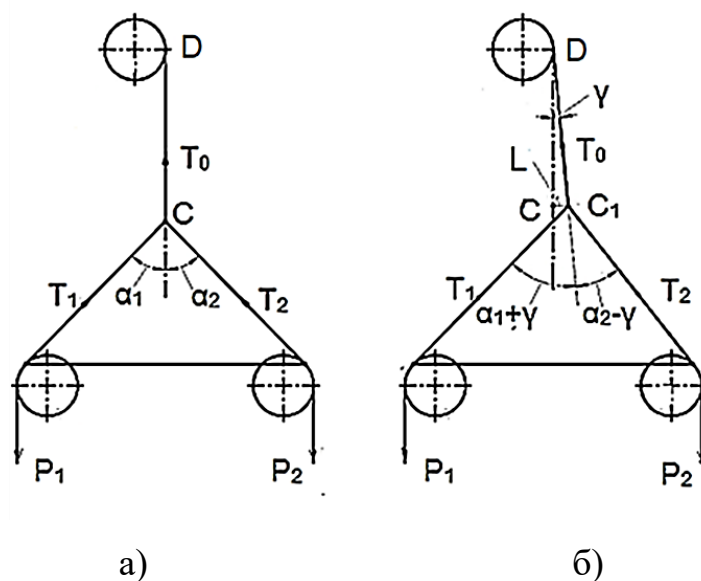


Рис. 43. Схематическое изображение образования порока штопорная крутка вследствие неравноты натяжения стренг

Методика эксперимента предусматривала обеспечение ровноты натяжения стренг $T_1 = T_2$ нагрузкой $P_1 = P_2$, приложенной к соответствующим стренгам (рис. 43, а). Натяжение стренг №1 и №2, равное 20 сН (вариант №1) и 40 сН

(вариант №2), создавалось гирями лабораторными [80, 81]. Нагружая стренгу №2 дополнительными гирями, обеспечивалась неровнота 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 . Соответственно, углы между осью однокруточной нити и осями стренг №1 и №2 на пороге крутки и

Табл. 37. Перемещение вершины треугольника кручения вследствие неровноты натяжения стренг

Наименование параметра	Вариант №1						Вариант №2					
	Неровнота натяжения стренг, сН						Неровнота натяжения стренг, сН					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Перемещение L , мм	2,2	4,5	6,65	8,4	10,3	12,2	2,9	5,85	8,6	11,3	13	16,1

Зависимость перемещения вершины треугольника кручения от неровноты натяжения стренг представлена на рис. 44.

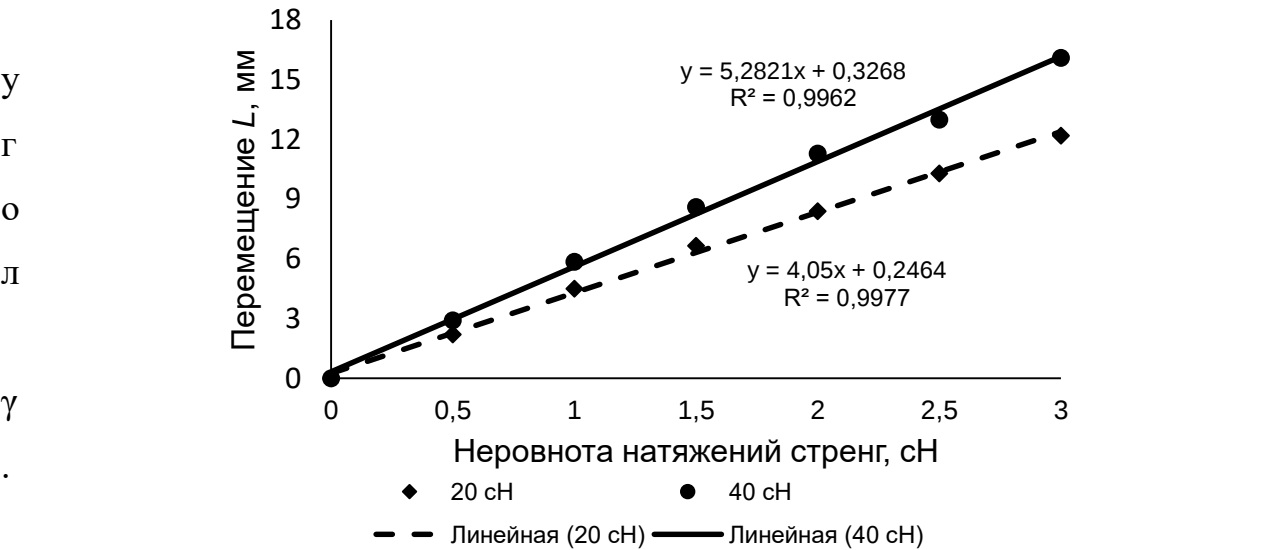


Рис. 44. Зависимость перемещения вершины треугольника кручения от неровноты натяжения стренг

Перемещение вершины треугольника кручения из точки C в точку C_1 увеличивает угол наклона оси стренги №1 к оси однокруточной нити за порогом крутки. Это приводит к разной длине стренг и возникновению порока штопорная крутка. Проведенные исследования показали, что с целью предотвращения образования порока штопорная крутка необходимо обеспечивать минимальную неравномерность натяжения стренг при сматывании с входных бобин.

С целью 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:

$$K_{\text{штпорн.}} = \operatorname{tg} \beta_2 / \operatorname{tg} \beta_1 \quad (32)$$

4.4. Исследование влияния на натяжение нити параметров сматывания с входной бобины

Проблема исследования натяжения баллонирующей нити при перемотке и кручении ввиду своей важности для текстильной отрасли имеет сравнительно давнюю историю. Ей посвящено достаточно много теоретических и экспериментальных работ, на базе которых удалось решить ряд важных вопросов, направленных на совершенствование технологии процессов наматывания и кручения [65; 66; 67]. Тем не менее, и в настоящее время сохраняют актуальность вопросы создания простых и надежных методик исследования натяжения движущейся нити, особенно в тех случаях, когда применяются машины с новыми устройствами [82].

Величина натяжения нитей при перемотке и кручении оказывает большое влияние на механические свойства нитей, плотность намотки нити на бобину и

минимальную обрывность нити. Величину натяжения нити в процессе текстильной переработки определяют опытным путем. Натяжение нити в процессе перемотки и кручения должно находиться в определенных, оптимальных для каждого вида текстильных нитей пределах. Для оценки влияния величины натяжения на качество нитей могут быть использованы определенные показатели, например, повреждаемость нитей [83, 84] или оптимальное натяжение [33]. Натяжение нитей в работах [83, 84] определялась методами электротензометрии, однако не представлена методика проведения измерения, включающая в себя способ тарирования тестера натяжения и величина погрешностей при проведении измерения натяжения.

С целью получения достоверной информации о величине измеряемого натяжения нитей из оксида алюминия разработана методика измерения натяжения движущейся нити [63] проведен анализ и оценка погрешностей при измерении натяжения движущейся нити [64].

4.4.1. Анализ и оценка погрешностей измерения натяжения нитей

Результат измерений является реализацией случайной величины, равной сумме истинного значения измеряемой величины и погрешности измерений [85]. В процессе обработки результатов измерения натяжения нити необходимо учитывать следующие погрешности измерения: инструментальную погрешность, погрешность установки средств измерений, систематическую погрешность.

Инструментальная погрешность измерения остается неизменной в процессе тарирования и измерения натяжения, а погрешность установки средств измерений должна учитываться при разработке методики измерения натяжения движущейся нити. Измерение натяжения нитей из оксида алюминия на экспериментальном стенде осуществлялось ИВК в составе измерительной части,

включающей в себя тестер натяжения ТНН-100 и измерительного канала прибора (ИКП), включающего в себя шунтирующее устройство, цифровой осциллограф АКИП 4115/1 и ПК. Величина результирующей погрешности ИКП рассмотрена в работе [86] и признана незначительной по сравнению с другими погрешностями.

Систематические погрешности не изменяются в течение времени. Основным отличающийся признак систематических погрешностей в том, что они могут быть предсказаны и благодаря этому почти полностью устранены введением поправок [87].

Рассмотрим систематические погрешности, возникающие при измерении натяжения тестером натяжения ТНН – 100 с невращающимися нитепроводниками. В.Э. Вакс в работе [88] предложил методику измерения натяжения нити по величине равнодействующих натяжений, прилагаемых к воспринимающему нитепроводнику тестера натяжения. На рис. 45 приведена схема действия сил, приложенных к воспринимающему нитепроводнику тестера натяжения. Направление движения нити указано стрелкой [88].

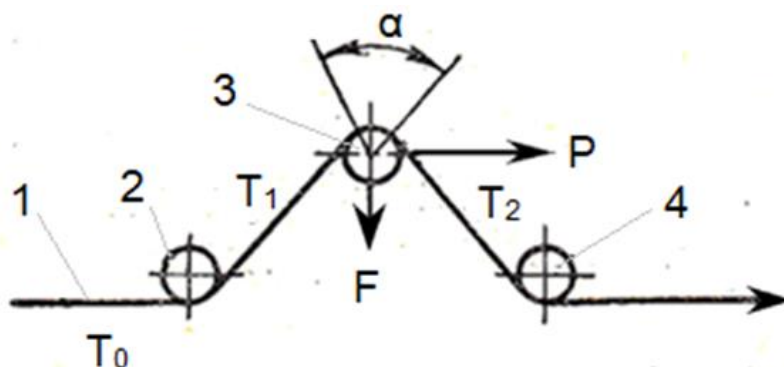


Рис. 45. Схема действия сил, приложенных к воспринимающему нитепроводнику тестера натяжения

Измерительная система тестера состоит из трех невращающихся нитепроводников. Два из них 2 и 4 неподвижно установлены в корпусе тестера натяжения, воспринимающий нитепроводник 3 установлен на воспринимающем элементе тестера натяжения и огибается нитью 1 под углом α . Действие

движущейся нити на воспринимающий нитепроводник может быть представлено следующими силами [89]:

$$F = (T_1 + T_2)e^{\frac{1}{2}\mu\alpha}(1 + e^{\mu\alpha}) \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (33)$$

$$P = (T_2 - T_1)e^{\frac{1}{2}\mu\alpha}(e^{\mu\alpha} - 1) \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (34)$$

где F – составляющая равнодействующей натяжения T_1 и T_2 в направлении оси симметрии нитепроводников;

P – составляющая равнодействующей натяжений T_1 и T_2 в направлении, перпендикулярном оси симметрии системы нитепроводников;

μ – коэффициент трения покоя пары нить – паковка;

α – угол огибания нитью воспринимающего нитепроводника;

T_1 – натяжение нити в ведомой ветви;

T_2 – натяжение нити в ведущей ветви.

Систематическая погрешность измерения тестеров натяжения с невращающимися нитепроводниками включает в себя:

1. Постоянную погрешность, зависящую от изменения угла огибания нитью воспринимающего нитепроводника, которая определяется отношением между предельно возможными величинами силы F_2 на воспринимающем нитепроводнике при измерении натяжения и соответствующем показанием величины силы F_1 при тарировке прибора при постоянной массе тарировочного груза, которая определяется из выражения [88]:

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu\alpha} \frac{1+e^{\mu\alpha}}{1-e^{\mu\alpha}}, \quad (35)$$

где μ – коэффициент трения покоя пары нить – сталь;

α – угол огибания нитью воспринимающего нитепроводника.

2. Периодические погрешности, зависящие от:

- изменения коэффициента трения движения вследствие непостоянства скорости скольжения нити по воспринимающему нитепроводнику;
- изменения поперечного размера нити.

Периодическая составляющая систематической погрешности измерения, возникающая вследствие непостоянства скорости движения, вызывается непостоянством сопротивления нитепроводников движению нити. Если известна линейная плотность нити T_t , относительная погрешность натяжения от непостоянства скорости движения нити определяется из выражения [88]:

$$\delta(T_1) \approx \frac{T_t}{T_2} v^2 \cdot (1 - e^{-\mu\alpha}) \times 10^{-4}\%, \quad (36)$$

где T_1 – натяжение ведомой ветви нити;

T_2 – натяжение; ведущей ветви нити;

T_t – линейная плотность нити, текс;

v – скорость скольжения нити по воспринимающему нитепроводнику;

μ – коэффициент трения покоя пары нить – сталь;

α – угол огибания нитью воспринимающего нитепроводника.

Разработанная методика измерения натяжения нити предусматривает постоянство скорости движения нити по воспринимающему нитепроводнику при тарировании тестера и непосредственно при выполнении измерения натяжения. Вследствие этого погрешность измерения натяжения нити, зависящая от изменения коэффициента трения движения от скорости, отсутствует.

Периодическая составляющая систематической погрешности измерения, зависящая от неровноты нитей по поперечному размеру, возникает вследствие колебаний усилия на воспринимающем нитепроводнике тестера. Погрешность измерения натяжения нити, зависящая от изменения поперечного размера нити, определяется из выражения [88]:

$$\delta[F(d)] = 2d/ba \cdot \delta(d), \quad (37)$$

где d – средний диаметр нити;

b – расстояние между осями направляющего и воспринимающего нитепроводников;

α – угол огибания нитью воспринимающего нитепроводника;

$\delta(d)$ – относительное изменение диаметра нити.

$$\delta(d) = \Delta d / d , \quad (38)$$

где d – текущий результат измерения поперечника (диаметра) нити;

Δd – разница между текущим и последующим результатами измерения поперечника нити.

Результаты расчетов погрешности измерения по формуле (37) представлены в табл. 38.

Табл. 38. Погрешность измерения натяжения, зависящая от изменения поперечного размера нити

Средний диаметр одиночной крученной нити, мм	Относительное изменение диаметра нити $\delta(d)$						
	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
	Погрешность, %						
0,186	1,30	1,95	2,60	3,25	3,90	4,55	5,20

В проводимых расчетах постоянной погрешности использованы значения коэффициент трения покоя пары «крученная нить – сталь» равный 0,5474 (табл. 28), угол огибания нитью воспринимающего нитепроводника $\alpha = 0,5236$ радиан.

Максимальная величина расчетных значений постоянной погрешности, зависящей от угла огибания нитью воспринимающего нитепроводника, рассчитанной по формуле (35), и периодической погрешности, возникающей вследствие неровноты нитей по поперечному размеру, рассчитанной по формуле (37), представлены в табл. 39.

Табл. 39. Максимальная величина составляющих систематической погрешности измерения натяжения нити

Причина возникновения погрешности	Величина погрешности, %
Изменение угла огибания нитью нитепроводника	16,88
Изменение поперечного размера нити	5,20

Максимальное натяжение нити, измеренное на скорости движения нити 7,8 м/мин равно 10,2 сН. Максимальная величина систематической погрешности при измерении натяжения движущейся нити равна сумме двух составляющих систематической погрешности равна 22,08%, что составляет 2,25 сН.

4.4.2. Измерение натяжения нити на универсальном стенде

Измерение натяжения движущейся нити проводилось непосредственно на универсальном стенде согласно разработанной методике проведения измерения натяжения [63]. Схема измерения натяжения движущейся нити на универсальном крутильно-перемоточном стенде представлена на рис. 46. С целью получения однородных результатов измерений использовались нити одной партии. Масса катушки бобинодержателя и бобины с нитью (в дальнейшем – бобина) 0,15 кг.

Для повышения точности получения результатов измерения, была использована программа *ChartReader* [89]. Программа производит преобразование исходной осциллограммы таким образом, что позволяет определять величину выходного сигнала тестера натяжения для каждого выбранного временного интервала. Обработка результатов измерения натяжения движущейся нити проводилась методами математической статистики.

Полученные значения натяжения нити уточнены с учетом погрешностей измерения.

На рис. 46:

- 1 Входная бобина
- 2 Ведомая ветвь
- 3 Тестер натяжения ТНН – 100
- 4 Ведущая ветвь
- 5 Выходная бобина

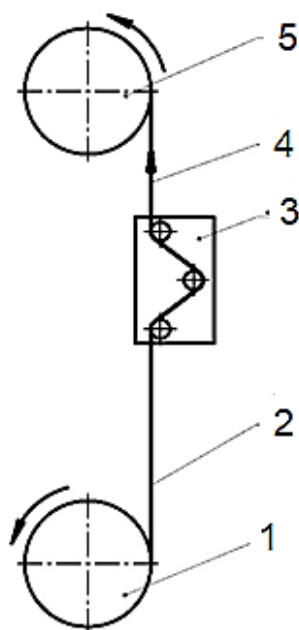


Рис. 46. Схема измерения натяжения нити при сматывании
с входной бобины

Согласно государственному стандарту [90], если математическое ожидание систематической погрешности известно и постоянно, то в результат измерений вносят соответствующую поправку на погрешность измерения. Знак погрешности для составляющей систематической погрешности измерения, зависящей от угла огибания нитью нитепроводника, будет положительным, так как с увеличением угла огибания натяжение увеличивается. Знак погрешности для составляющей систематической погрешности, зависящей от неровноты нити по поперечнику необходимо рассмотреть более внимательно, так как необходимо определить асимметрию распределения [91]:

$$A = \frac{\mu^3}{\sigma^3} \quad (39)$$

Проведенные по формуле (39) расчеты дают значения $|A|$ от 0,0518 до 0,394. С учетом малого значения погрешности и с целью упрощения расчетов можно принять, что ошибка погрешности измерения описывается равномерным законом распределения, который аналитически может быть записан следующим образом:

$$f(\Delta x) = \frac{1}{2\Delta x} \quad (40)$$

Закон распределения погрешности измерительного комплекса треугольный и составляет 1,85% от измеряемой величины [87]. Треугольный закон распределения (закон Симпсона) является частным случаем трапециевидного, когда составляющие имеют одинаковые равномерные законы распределения. Равномерное распределение имеет погрешности квантования при отсчете на цифровом приборе, определяющим показания трением. Таким образом, имеем две составляющие систематической погрешности, имеющие равномерный закон распределения. В связи с этим и составляющую систематической погрешности ΔX можно представить в следующем виде:

$$\Delta X = \pm \frac{\Delta X}{2}, \quad (41)$$

Обозначим истинное значение измеряемой величины через X , а погрешность измерения ее среднего арифметического значения $\bar{X}$ через $\Delta X/2$:

$$\bar{X} - \Delta X/2 \leq X \leq \bar{X} + \Delta X/2 \quad (42)$$

Поскольку в большей степени интересны максимальные значения натяжения, будем учитывать только увеличение натяжения, т.е. правую часть уравнения (42). Соответственно, знак погрешности будет положительный.

Проведенные исследования показали, что неровнота натяжения движущейся нити зависит от изменения угла огибания нитью воспринимающего нитепроводника и изменения поперечного размера нити. Причем чем выше скорость движущейся нити, тем неровнота натяжения выше. Таким образом,

неровнота натяжения нити может служить параметром оценки кинематического совершенства устройства для натяжения нити.

В проведенных выше экспериментах масса бобины составляла 0,15 кг. С целью исследования зависимости натяжения нитей от массы бобины поставлены эксперименты по измерению натяжения при сматывании с бобины массой 0,075 кг.

Время пуска электродвигателя без учета приводного механизма менее одной секунды. Время пуска электродвигателя с учетом массы приводного механизма увеличивается, однако обычно не превышает двух секунд [92]. Величина натяжения нитей в установившемся режиме нити при сматывании с бобины массой 0,15 кг и 0,075 кг при скорости движения нити 7,8 м/мин. представлены в табл. 40. Время измерения натяжения – третья и четвертая секунды после пуска.

Как можно видеть из данных в табл. 40, коэффициент вариации по натяжению для бобины массой 0,075 кг ниже, чем для бобины массой 0,150 кг. Величина коэффициента вариации по натяжению нити обусловлена изменением условий сматывания нитей с входной бобины. В связи с этим возникает вопрос о стохастической независимости результатов измерения натяжения.

Табл. 40. Натяжение нити при сматывании с входных бобин массой 0,075 кг и 0,015 кг

Наименование параметра	Масса входной бобины			
	0,075 кг		0,15 кг	
	Время с момента пуска, с			
	3	4	3	4
Натяжение, сН	3,30	3,12	3,41	3,34
Среднее квадратическое отклонение	1,54	1,27	2,04	2,19
Коэффициент вариации	0,4667	0,4071	0,5982	0,6557

В теории вероятностей два случайных события называются независимыми, если наступление одного из них не изменяет вероятность наступления другого [46]. Случайный процесс $x(t)$ называется стационарным, если его конечномерные

распределения инвариантны относительно сдвига по времени, но не от самих этих величин.

Проверка независимости и стационарности результатов измерения натяжения осуществлялась с использованием непараметрических методов. Рассмотрены выборки величины натяжения нити для трех и четыре секунд после пуска, для каждой из катушек массой 0,15 кг и 0,075 кг с вероятностью ошибки, заключенной между 0,05 и 0,0975 (т.е. $0,05 < \alpha < 0,0975$).

Были применены следующие непараметрические статистические критерии [93]:

1. Критерий серий, основанный на медиане выборки. Гипотеза о стохастической независимости исходных результатов измерения натяжения нитей принимается в целом, за исключением незначительного нарушения неравенства $\tau(m) = < \tau_{0,95}(m)$ при $\tau(m) = 10$ и $\tau_{0,95}(m) = 9$ для выборки значения натяжения бобины массой 0,15 кг в третью секунду после пуска.
2. Критерий «восходящих» и «нисходящих» серий. Гипотеза о стохастической независимости исходных результатов измерения натяжения нитей принимается для всех выборок.
3. Критерий квадратов последовательных разностей (критерий Аббе).

Гипотеза о стохастической независимости результатов не отвергается.

Таким образом, независимость и стационарность результатов измерения натяжения полностью подтверждается двумя непараметрическими критериями и частично одним непараметрическим критерием.

4.4.3. Динамика сматывания нити с вращающейся катушки

Первые опыты по перемотке нитей с входной на выходную бобину экспериментального стенда показали, что нить сматываясь с катушки, может образовывать так называемую «петлю», в которой натяжение в ведомой ветви

снижается до нуля. Анализ процесса сматывания нити показал, что это «петля» возникает вследствие того, что скорость сматывания нити в входной бобины в некоторый момент времени превышала скорость наматывания нити на выходную бобину. После того как под действием тормозящего момента $M_{\text{ТОРМ}}$ (рис. 47) скорость сматывания нити в входной бобины уменьшалась до скорости наматывания нити на выходную бобину, «петля» исчезала. При этом в некоторых случаях натяжение нитей превышало величину разрывной нагрузки, что приводило к обрыву нити.

С целью обеспечения стабильного натяжения при сматывании на универсальном стенде применяется устройство, создающее тормозящий момент $M_{\text{ТОРМ}}$ (рис. 47) на оси подшипника катушки бобинодержателя входной бобины. Нить наматывается на бобину с определенным натяжением, которое в некоторой мере сохраняется в теле намотки вследствие вязкоупругих свойств нитей и проявляются на последующих этапах текстильной переработки. Взаимосвязь натяжения нити в намотке и натяжения сматываемой с паковки нити связано отношением, которое является одним из условий равновесного положения нити на поверхности мотальной паковки [94]:

$$T_1 = T_0 \exp \left(\int_0^\psi \cos \theta \sqrt{\mu^2 - \operatorname{tg}^2 \Theta} d\alpha \right) \quad (43)$$

где T_1 – натяжение нити при сходе с катушки;

T_0 – натяжение нити в теле намотки;

Θ – угол геодезического отклонения;

μ – коэффициент трения статический между нитью и телом намотки;

α – угол охвата нитью паковки.

Зависимость (43) является обобщенной формулой и представляет собой условие равновесия нити на бобине. В нашем случае нить намотана на патрон таким образом, что если нить находится в плоскости, перпендикулярной его оси, то угол $\Theta = 0$ и формула (43) приводится к виду:

$$T_1 = T_0 \exp(\mu\alpha) \quad (44)$$

В работе [94] показано, что при сматывании продольной деформации подвергается не только нить, сошедшая с цилиндрической, но и нить, располагающаяся на бобине. Соответственно, натяжение нитей по мере увеличения угла охвата постепенно уменьшается до значения натяжения, сохраненного в теле намотки. Угол охвата, при котором $T_1 = T_0$ обозначим α_1 для нахождения которого с точностью, достаточной для расчетов, В.А. Гордеев предлагает вычислять по формуле [95]:

$$\alpha_1 = \frac{4,62}{\mu} \quad (45)$$

Силы и моменты, действующие на вращающуюся бобину представлены на рис. 47.

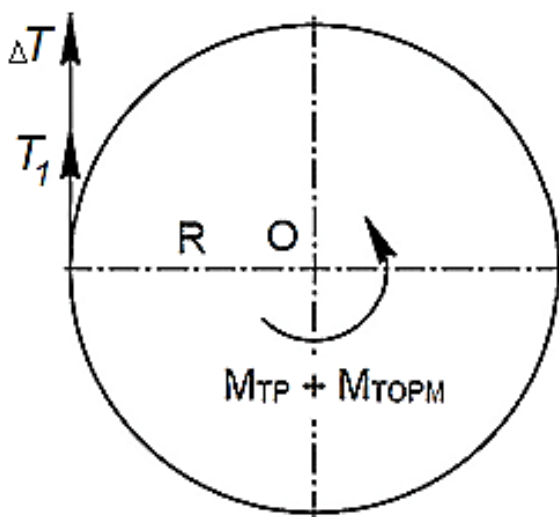


Рис. 47. Силы и моменты, действующие на вращающуюся бобину

На рис. 47:

T_1 – натяжение нити при сходе с бобины;

ΔT – приращение натяжения нити, зависящее от скорости движения нити и массы бобины;

$M_{ТР}$ – момент трения в подшипнике на оси бобинодержателя;

$M_{ТОРМ}$ – тормозящий момент, создаваемый тормозящим устройством на оси бобины;

R – текущий радиус намотки.

При сматывании с вращающейся бобины натяжение нити увеличивается на величину ΔT , которая зависит от скорости движения нити, массы бобины и ряда других параметров. Величину приращения натяжения нити можно определить, используя принцип Даламбера для тела, вращающегося вокруг своей оси, перпендикулярной плоскости материальной симметрии. Уравнение движения катушки будет иметь вид:

$$J\varepsilon + M_{TP} + M_{ТОРМ} - R(T_1 + \Delta T) = 0, \quad (46)$$

где J – момент инерции бобины с нитью;

ε – угловое ускорение бобины в период пуска.

Как показали проведенные расчеты, величина приращения натяжения ΔT в большей степени зависит от $M_{ТОРМ}$, чем от M_{TP} и момента инерции и скорости сматывания нити с бобины. Расчетное натяжение нити при сматывании определялось по формуле:

$$T_{РАСЧ} = T_1 + \Delta T \quad (47)$$

Расчетные и максимальные значения натяжения нити при сматывании с входных бобин с массой 0,075 кг и 0,15 кг в момент пуска электродвигателя привода намотки, представлены в табл. 41.

Табл. 41. Расчетное и фактическое натяжение нити в момент пуска электродвигателя привода намотки

Наименование параметра	Масса бобины	
	0,075 кг	0,15 кг
Время с момента пуска, с	2,1	1,8
Натяжение нитей при сматывании с бобины T_1 , сН	3,94	4,09
Приращение натяжения нити ΔT , сН	4,72	8,29
Натяжение нити расчетное $T_{РАСЧ}$, сН	8,66	12,38
Натяжение нити фактическое, сН	7,14	10,92

На рис. 48 представлена осциллограмма выходного напряжения тестера натяжения, скорость нити 7,8 м/мин, масса катушки 0,15 кг.



Рис. 48. Осциллограмма выходного напряжения тестера натяжения, скорость нити 7,8 м/мин, масса катушки 0,15 кг

ГЛАВА 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ВЫРАБОТКИ КРУЧЕНЫХ НИТЕЙ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

5.1. Анализ структуры и механических свойств зарубежных крученых нитей из оксида алюминия для высокотемпературных наполненных шнуров

Гибкие высокотемпературные уплотнения применяются в узлах герметизации подвижных и неподвижных разъемных соединений – сальниковых камерах. Уплотнительным элементом сальниковых камер служат волокнистые сальниковые набивки. Основным типом волокнистых уплотнений сальниковых камер является наполненный шнур. Наполненный шнур – текстильное изделие, состоящее из наполнителя и оплетки. Оплетка наполненных шнуров выполняется из крученых нитей и пряжи, наполнитель – из крученых нитей, пряжи, ровинга и нетканых материалов. В наполненных шнурах формирующим элементом являются нити оплетки. Таким образом, технологические параметры выработки наполненных шнуров в первую очередь зависят от механических свойств нитей оплетки.

В табл. 42 представлены марка наполненного шнура, марка, линейная плотность, разрывная нагрузка крученых нитей из оксида алюминия оплетки шнуров SV-1-SP производства Hiltex Technical Textiles [19] и XC-18 производства Omega Engineering Inc. [96].

Табл. 42. Марка наполненного шнура, марка, линейная плотность, разрывная нагрузка крученых нитей зарубежного производства

Марка шнура	Марка крученой нити	Линейная плотность, текс	Разрывная нагрузка, Н
SV-1-SP	Hiltex ALF Yarn S-640D, 1/3	400	117,6
XC-18	3M™ Nextel™ Plied Yarn 440, 2/2	444	155,79

Как показал анализ структуры шнуров наполненных, оплетка выполнена из крученых нитей с числом сложений, равным трем у шнура SV-1-SP и четырем у шнура XC-18. Линейная плотность одиночной крученой нити Hiltex ALF Yarn S-640D 1/0 равна 133,3 текс, удельная разрывная нагрузка, равна 25 сН/текс. Линейная плотность одиночной крученой нити 3M™ Nextel™ Plied Yarn 440 1/0 равна 111 текс, удельная разрывная нагрузка равна 35 сН/текс.

С целью получения исходных данных для проектирования отечественных крученых нитей из оксида алюминия проведен анализ структуры [97] крученых нитей из оксида алюминия производства 3M Company (США) [3] и Hiltex Technical Textiles (Нидерланды) [19]. Структура крученых нитей фирмы 3M Company и Hiltex Technical Textiles обозначается следующим образом: крученая одиночная нить обозначается 1/0, если строщены и скручены две крученые нити 1/2, если четыре 1/4 или 2/2 и т.д.

Структура и свойства крученых нитей 3M™ Nextel™ Plied Yarn 312 3M Company [3] приведены в табл. 43.

Табл. 43. Структура и свойства крученых нитей 3M™ Nextel™ Plied Yarn 312

Диаметр элементарной нити, мкм	Условное обозначение структуры	Линейная плотность, текс	Разрывная нагрузка, Н	Удельная разрывная нагрузка, сН/текс
10	1/2	200	84,28	42,14
10	1/3	300	129,36	43,12
10	1/5	400	119,56	29,89
10	2/2	500	191,1	38,22
10	3/4	1200	440,02	36,67

Структура и свойства крученых нитей ALF Hiltex Technical Textiles (Нидерланды) [19] приведены в табл. 44.

Табл. 44. Структура и свойства крученых нитей ALF Hiltex Technical Textiles

Диаметр элементарной нити, мкм	Условное обозначение структуры	Линейная плотность, текс	Разрывная нагрузка, Н	Удельная разрывная нагрузка, сН/текс
7	1/2	134	49	36,84
7	1/3	200	68,6	34,30
7	1/3	400	117,6	29,40

3M Company производит однокруточные нити с числом сложений до пяти, многокруточные нити с числом сложений до двенадцати. Особенностью крученных нитей 3M™ Nextel™ 3M Company является высокая результирующая линейная плотность, достигающая 1332 текс. Hiltex Technical Textiles производит однокруточные нити с числом сложений до трех и линейной плотностью до 400 текс.

Что касается такого важного параметра структуры крученных нитей как крутка, то достоверные данные отсутствуют. Так, например, 3M Company в технических данных сообщает, что величина крутки составляет 106 кручений/м для всего ассортимента крученных нитей вне зависимости от числа сложений и результирующей линейной плотности. Hiltex Technical Textiles сведений величине крутки не предоставляет.

Основные свойства отечественных элементарных и комплексных нитей рассмотрены в третьей главе монографии.

Линейная плотность комплексных нитей, назначаемая при проектировании изделий технического назначения, должна обеспечивать высокую эффективность технологических процессов выработки крученных нитей. В связи с этим возникает вопрос об оптимальной линейной плотности комплексных нитей отечественного производства. В настоящее время она не регламентируется в связи с тем, что производятся в лабораторных условиях. Число элементарных нитей в комплексной нити отечественного производства равно 80. Комплексные нити из оксида алюминия зарубежных фирм-изготовителей имеют 200 или 400 элементарных нитей, а линейную плотность от 67 до 111 текс соответственно.

В табл. 45 представлены результаты расчета оптимальной линейной плотности комплексных нитей отечественного производства.

Табл. 45. Результаты расчета оптимальной линейной плотности комплексных нитей отечественного производства

Марка комплексной нити	Число элемент. нитей, шт.	Линейная плотность комплексной нити/элементарной нити, текс	Комплексная нить отечественного производства	
			Число элемент. нитей, шт.	Линейная плотность, текс
3M™ Nextel™ Plied Yarn 550	400	111/0,2775	80	22,2
ALF 72/28	200	67/0,335	80	26,8

«ВИАМ» производит комплексные нити линейной плотностью от 18 до 32 текс. Таким образом, расчетное значение линейной плотности комплексных нитей достаточно близко к фактической линейной плотности отечественных комплексных нитей.

Одной из задач настоящего исследования является проектирование крученных нитей, обладающих совокупностью свойств, пригодных для производства высокотемпературных наполненных шнуров. С целью обеспечения указанных свойств к крученым нитям предъявляются следующие требования:

1. Разрывная нагрузка должна обеспечивать выработку и сохранение целостности наполненного шнура в процессе эксплуатации.
2. Линейная плотность должна обеспечивать оптимальную величину покрытия и отношения массы оплетки к массе наполнителя.

Анализ технических данных зарубежных крученных нитей показал, что основные свойства нитей определяются следующими параметрами:

- геометрическими и механическими свойствами элементарных нитей;
- геометрическими и механическими свойствами комплексных нитей;
- числом стренг в крученой нити;
- величиной первой и последующих круток.

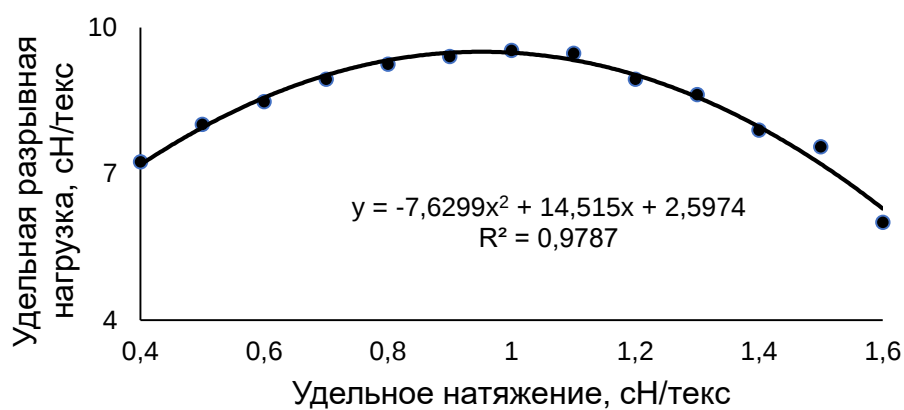
5.2 Теоретические и экспериментальные аспекты проектирования и выработки одиночных крученых нитей

5.2.1 Исследование влияния натяжения при кручении на разрывную нагрузку одиночных крученых нитей

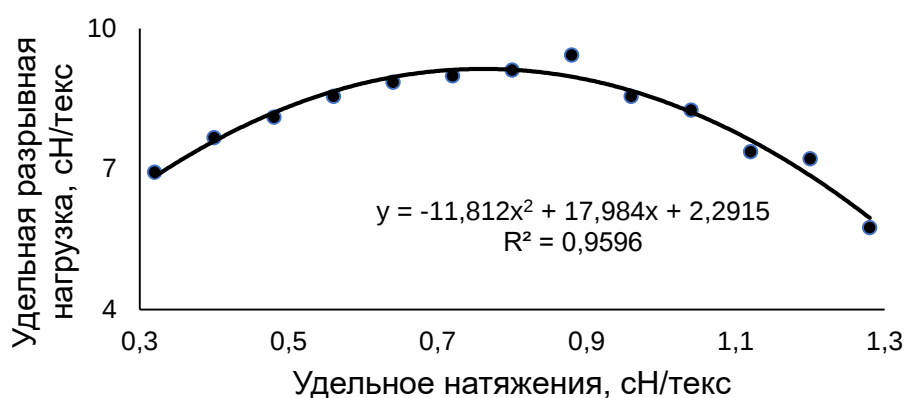
На механические свойства крученых нитей большое влияние оказывает степень ровноты растяжения элементарных нитей и, следовательно, равенства напряжений, возникающих в элементарных нитях при кручении. Натяжение нитей при кручении должно находиться в определенных, оптимальных для каждого вида текстильных нитей пределах.

Исследование влияния натяжения при кручении на разрывную нагрузку одиночных крученых нитей проводилось на образцах комплексных нитей из оксида алюминия марок ОА–11–20, ОА–12–25, ОА–13–30 линейной плотностью 20, 25, 30 текс соответственно. Линейная плотность образцов определялась по ГОСТ 6943.1 – 2015. Кручение нитей осуществлялось на универсальном стенде с круткой 40 кручений/м. Диапазон варьирования натяжения от 8 до 32 сН с шагом 2 сН. Натяжение контролировалось тестером натяжения ТНН – 100. Измерение натяжения осуществлялось по разработанной методике [63]. Разрывная нагрузка определялась по ГОСТ 6611.2 – 73 на разрывной машине И4301 – М. Количество проводимых испытаний по десять для каждого из значений натяжения нитей. Зажимная длина образцов 250 мм, скорость перемещения зажима разрывной машины 10 мм/мин.

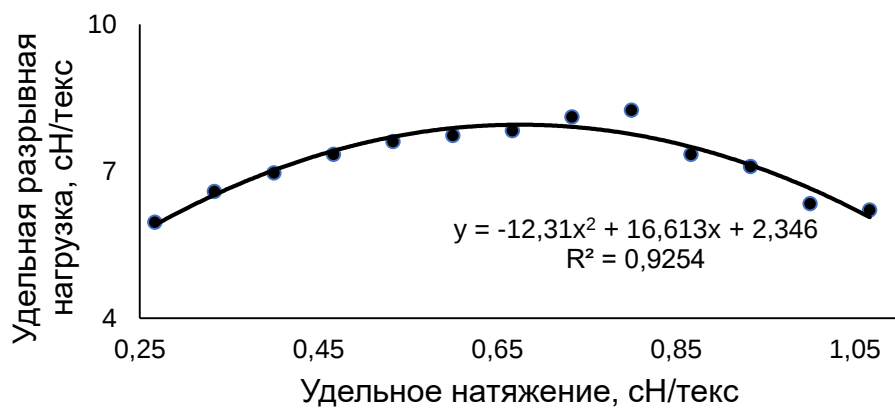
На рис. 49 представлена зависимость удельной разрывной нагрузки от удельного натяжения при кручении комплексных нитей ОА–11–20 (рис. 49, а), ОА–12–25 (рис. 49, б), ОА–13–30 (рис. 49, в).



а)



б)



в)

Рис. 49. Зависимость удельной разрывной нагрузки от удельного натяжения при кручении одиночных нитей

Анализ результатов эксперимента показал, что величина оптимального удельного натяжения при кручении комплексных нитей марок ОА–11–20,

ОА–12–25, ОА–13–30 равна 1,0 сН/текс, 0,8 сН/текс, 0,7 сН/текс соответственно.

Результаты экспериментов, проведенных с использованием комплексных нитей, имеющих большой размах линейной плотности, позволили уточнить результаты исследований, проведенных в работе [33].

5.2.2. Исследование влияния крутки на разрывную нагрузку одиночных крученых нитей

Исследование влияния крутки на разрывную нагрузку одиночных крученых нитей проводилось на образцах комплексных нитей из оксида алюминия марок ОА–11–20, ОА–12–25, ОА–13–30 линейной плотностью 20, 25, 30 текс соответственно. Кручение нитей осуществлялось на универсальном стенде, диапазон варьирования круток от 10 до 120 кручений/м с шагом 10 кручений/м. Удельное натяжения при кручении комплексных нитей марок ОА–11–20, ОА–12–25, ОА–13–30 равно 1,0 сН/текс, 0,8 сН/текс, 0,7 сН/текс соответственно. Линейная плотность образцов определялась по ГОСТ 6943.1 – 2015. Разрывная нагрузка определялась по ГОСТ 6611.2 – 73 на разрывной машине И 4301 – М. Количество проводимых испытаний по десять для каждого из значений крутки. Зажимная длина образцов 250 мм, скорость перемещения зажима разрывной машины 10 мм/мин. Зависимость удельной разрывной нагрузки от величины крутки представлена на рис. 50.

Исследование влияния крутки на разрывную нагрузку одиночных нитей показало, что критическая крутка для одиночных крученых нитей марок ОА–11–20×1–20, ОА–12–25×1–25, ОА–13–30×1–30 равна 30, 40, 50 кручений/м соответственно.

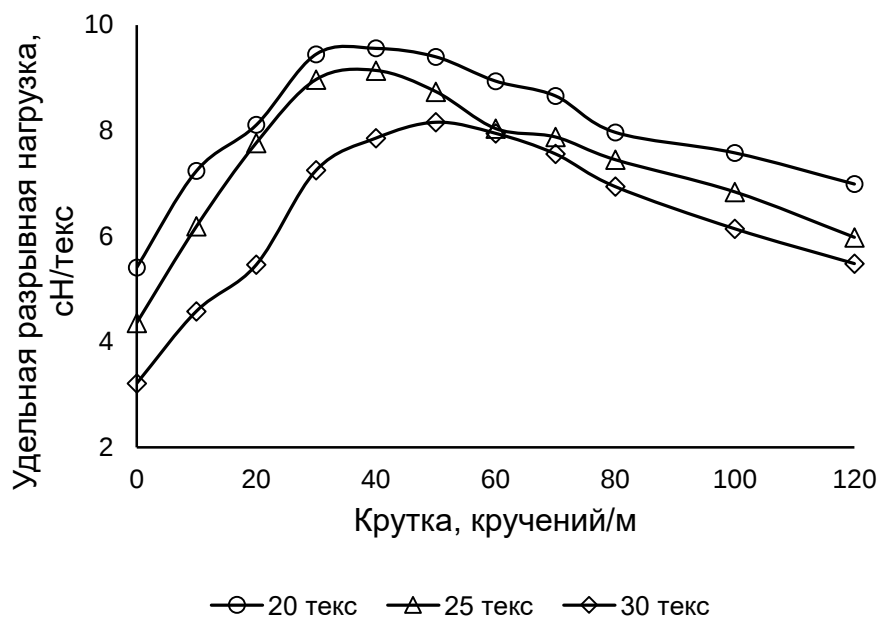


Рис. 50. Зависимость удельной разрывной нагрузки от крутки

Результаты экспериментов, проведенных с использованием комплексных нитей, имеющих большой размах линейной плотности, позволили уточнить результаты исследований по определению критической крутки, проведенных в работе [33].

5.2.3. Выработка одиночных крученых нитей экспериментальной партии

Выработка одиночных крученых нитей марок ОА–11–20×1–20, ОА–12–25×1–25, ОА–13–30×1–30 экспериментальной партии выполнялась на универсальном станде. Одним из важных моментов, который учитывался при выработке нитей экспериментальной партии, является вариативность применения одиночных крученых нитей, что позволит получить требуемые оптимальные характеристики однокруточных и многокруточных нитей.

Параметры заправки универсального станда для выработки одиночных крученых нитей экспериментальной партии представлены в табл. 46.

Табл. 46. Параметры заправки универсального станда для выработки
одиночных крученых нитей экспериментальной партии

Марка нити	Линейная плотность, текс	Крутка, кручений/м
ОА–11–20×1–20	20	40
ОА–12–25×1–25	25	40
ОА–13–30×1–30	30	40

План кручения для выработки одиночных крученых нитей экспериментальной партии представлен в табл. 47.

Табл. 47. План кручения для выработки одиночных крученых нитей экспериментальной партии

Марка нити	Натяжение, сН	Скорость намотки на выходную бобину, м/мин	Частота вращения крутильной платформы, мин ⁻¹
ОА–11–20×1–20	20	8	320
ОА–12–25×1–25	20	8	320
ОА–13–30×1–30	20	8	320

В связи с незначительными различиями разрывной нагрузки однокруточных нитей от величины крутки и натяжения при кручении кручение одиночных нитей проводилось с круткой 40 кручений/м, натяжение при кручении 20 сН. Натяжение стренг контролировалось тестером натяжения с точностью до 0,1 сН.

5.2.4. Диаметр одиночных крученых нитей экспериментальной партии

С целью исследования изменения диаметра крученых нитей от величины крутки на универсальном станде были выработаны одиночные крученые нити марок ОА–11–20×1–20, ОА–12–25×1–25, ОА–13–30×1–30 линейной плотностью 20, 25, 30 текс соответственно согласно параметрам заправки (табл. 46) и плана

кручения (табл. 47). Натяжение при кручении равно 20 сН, крутка от 10 до 80 кручений/м, шаг крутки 10 кручений/м. Диаметр крученных нитей измеряли на микроскопе Discovery V12 ZEISS. Измерения производились на образцах нити длиной 3 м. По длине каждого образца выполнено тридцать измерений с шагом 10 см. Измерения проводились на нити, подвергнутой растяжению нагрузкой равной 20 сН. По средним значениям диаметра крученных нитей построены графики зависимости диаметра нити от крутки (рис. 51).

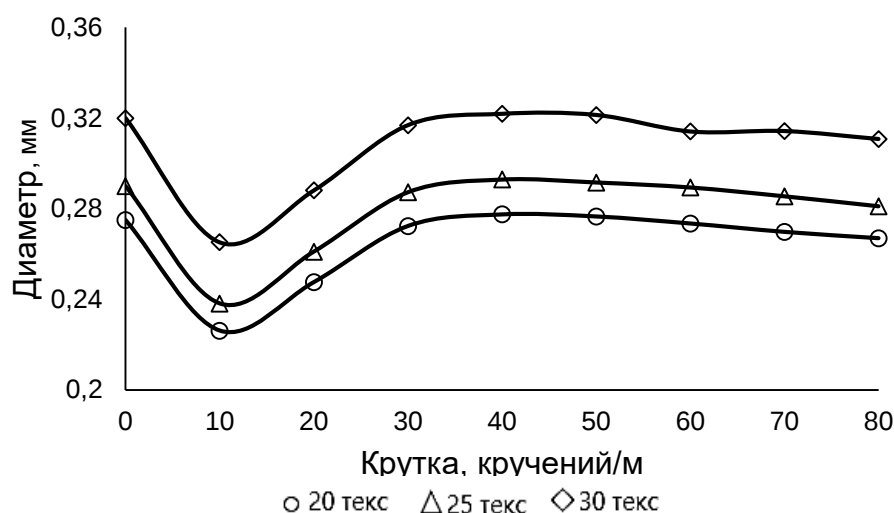


Рис. 51. Зависимость диаметра крученной нити от крутки

Диаметр крученных нитей при крутке, равной 10 кручений/м уменьшается по сравнению с поперечными размерами комплексных нитей в среднем на 15%. Затем диаметр начинает увеличиваться до максимального значения при крутке, равной 40 кручений/м. Дальнейшее увеличение крутки приводит к незначительному уменьшению диаметра крученной нити.

5.2.5. Неровнота по линейной плотности и пороки одиночных крученных нитей

Структурная неровнота комплексных и крученных нитей зависит от технологических особенностей производства и определяет неровноту нитей по

механическим свойствам [98]. Исследование неровноты массы на единицу длины крученых нитей выполнялось на приборе USTER TESTER 4–SE [99]. Приборы фирмы USTER используют емкостной метод определения неровноты нитей и применяется только для диэлектриков [100]. Оксид алюминия является типичным диэлектриком: диэлектрическая проницаемость при 9,375 ГГц равна 5,7; тангенс угла диэлектрических потерь при 9,375 ГГц равен 0,015 [3].

Диаграмма масс является важной составляющей процесса исследования крученых нитей на неровноту. Кроме средней линейной неровноты U , % и средней квадратичной неровноты CV_m , % определены характеристики пороков: утоненные участки (Thin places), утолщенные участки (Thick places) и непсы (Neps) при установленном пороге чувствительности.

Параметры неровноты и характеристики пороков одиночной крученой нити марки ОА–12–25×1–25 с круткой 20, 40, 60, 80 кручений/м представлены в табл. 48, размерность пороков утоненные участки, утолщенные участки и непсы приведена в штуках на 1 км.

Табл. 48. Параметры неровноты и характеристики пороков одиночных крученых нитей при установленном пороге чувствительности

Крутка, кр/м	U , %	CV_m , %	Thin - 40% /km	Thin - 50% /km	Thick + 35% /km	Thick + 50% /km	Neps +200% /km	Neps +280% /km
20	19,8	23,95	7920	2040	2300	580,0	3080	760,0
40	15,87	20,03	2680	720,0	1100	120,0	1780	220,0
60	12,45	15,62	300,0	60,0	0,00	0,00	0,00	0,00
80	12,31	15,71	280,0	60,0	0,00	0,00	0,00	0,00

Из данных, представленных в табл. 47, можно видеть, что неровнота нитей по линейной плотности и количество пороков снижаются с увеличением крутки. На рис. 52 представлены диаграммы масс одиночных крученых нитей марки ОА–12–25×1–25 с круткой, равной 20 кручений/м (рис. 52, а), 40 кручений/м (рис. 52, б), 60 кручений/м (рис. 52, в), 80 кручений/м (рис. 52, г).

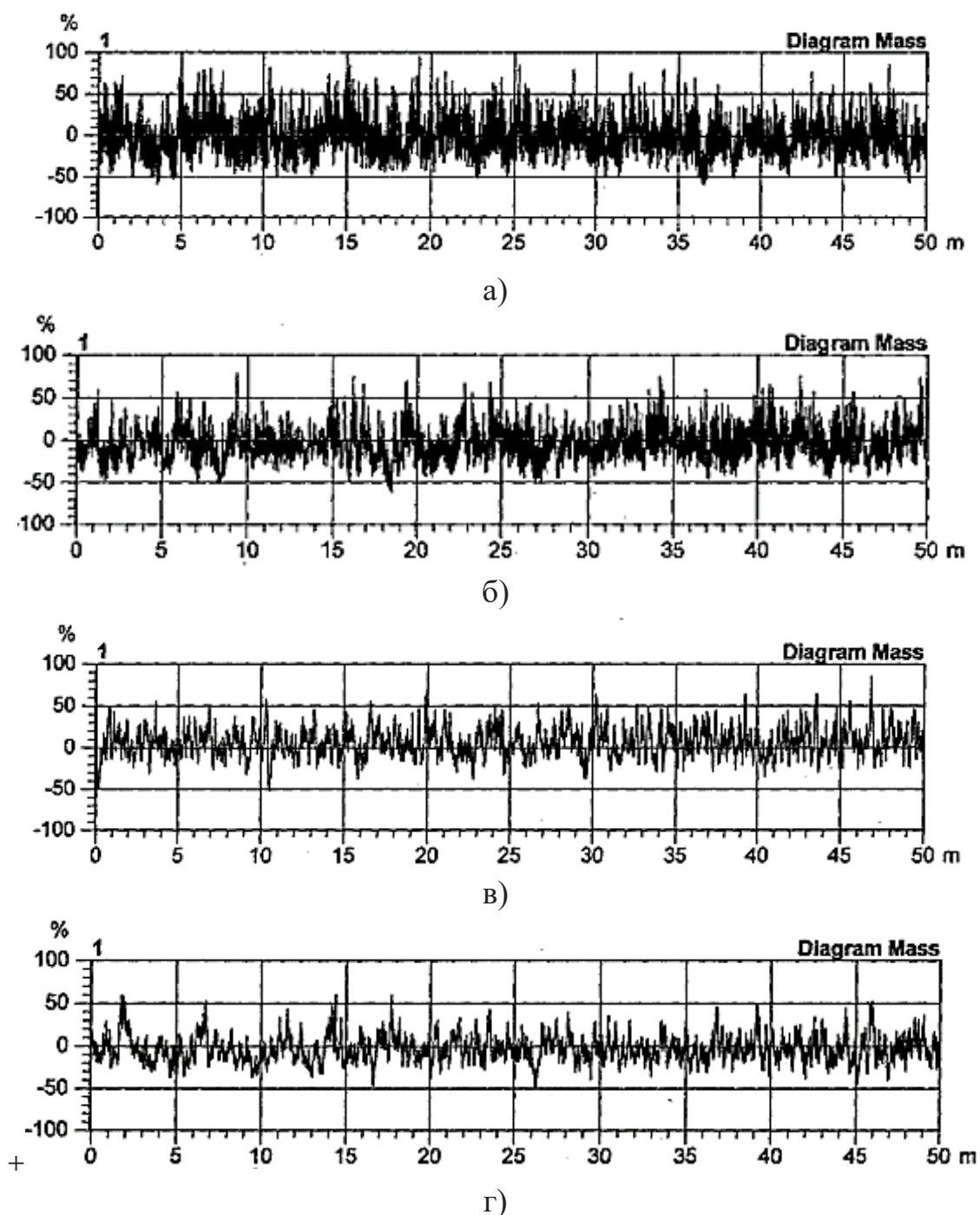


Рис. 52. Диаграмма масс одиночных крученых нитей с круткой 20 кручений/м (а), 40 кручений/м (б), 60 кручений/м (в), 80 (г) кручений/м

Величина порока утоненные участки при установленном пороге чувствительности минус 40% и минус 50% говорит о том, что линейная плотность участка составляет не более 60% и 50 % от средней линейной плотности нити. Для утоненных участков не устанавливается минимальное ограничение по длине. Подсчет более тонких участков в пределах более

длинного утоненного отрезка предотвращается за счет того, что возможность учета следующего утоненного участка появляется только после того как линейная плотность увеличивается до принятого ограничения [101].

Утолщенные участки и непсы при записи диаграммы масс фильтруются с выделением утолщенных участков длиной порядка 10 см и коротких участков длиной менее 1 см соответственно. С целью дифференцирования указанных дефектов прибор необходимо настраивать определенным образом исходя из доступной информации по порокам конкретных нитей. В связи с этим, по всей видимости, при настройке не учтены специфические особенности нитей из оксида алюминия и вместо таких пороков, как утолщенные участки были учтены непсы.

Величина порока утолщенные участки при установленном пороге чувствительности плюс 35% и плюс 50% показывает, что линейная плотность участка составляет не менее 135% и 150 % от средней линейной плотности нити. Величина порока непс при установленном пороге чувствительности плюс 200% и плюс 280% может показывать не только повышение линейной плотности на участке нити малой длины, но и о превышении установленного ограничения длины участка. Данное предположение подтверждается отсутствием пороков утолщенные участки и непсы у нитей с круткой 60 и 80 кручений/м.

5.2.6. Разрывная нагрузка одиночных крученых нитей

Установлено, что между скоростью перемещения зажима разрывной машины и величиной разрывной нагрузки комплексных и крученых нитей из оксида алюминия имеется определенная зависимость [52, 54]. С целью определения влияния скорости перемещения зажима разрывной машины на разрывную нагрузку одиночной крученой нити марки ОА–12–25×1–25

проведены эксперименты, в которых скорость перемещения зажима разрывной машины изменялась от 2 до 10 мм/мин. Разрывная нагрузка определялась по ГОСТ 6611.3-73 [52], зажимная длина образцов 250 мм. Учитывались результаты испытаний образцов, у которых время до разрыва составляло 20 ± 3 с.

Разрывная нагрузка, количество испытаний, скорость перемещения зажима разрывной машины при испытаниях одиночных крученых нитей марки ОА–12–25×1–25 представлены в табл. 49.

Табл. 49. Разрывная нагрузка, количество испытаний, скорость перемещения зажима разрывной машины при испытаниях одиночных крученых нитей

Наименование параметра	Скорость перемещения зажима разрывной машины, мм/мин				
	2	4	6	8	10
Количество испытаний	30	30	30	30	30
Число результатов с временем до разрыва 20 ± 3 с	3	4	13	24	30
Процент результатов с временем до разрыва 20 ± 3 с	10	13,33	43,33	80	100
Разрывная нагрузка, Н	1,59	1,69	1,91	1,71	1,86
Удельная разрывная нагрузка, сН/текс	6,34	6,74	7,64	6,82	7,44
Среднее квадратическое отклонение	1,496	1,573	1,539	1,95	1,64
Коэффициент вариации	0,2360	0,2334	0,2014	0,2859	0,2204

Максимальное количество результатов испытаний с временем до разрыва 20 ± 3 с, равное тридцати, получено для скорости перемещения зажима разрывной машины 10 мм/мин. Но всегда остается вопрос о достоверности результатов испытаний с установленным значением доверительной вероятности.

С целью определения достаточности количества испытаний с установленным значением доверительной вероятности проведены вычисления доверительного объема измерений по формуле [98]:

$$m\{\bar{Y}\} = \left(\frac{u\{p_D\}C\{Y\}}{\delta\{\bar{Y}\}} \right)^2 \quad (48)$$

Для решения поставленной задачи заданы следующие величины:

- относительная доверительная ошибка среднего $\delta\{\bar{Y}\} = 5\%$;
- доверительная вероятность $p_D = 0,954$;
- квантиль нормального распределения $u\{p_D\} = 2$

Доверительный объем испытаний $m\{\bar{Y}\}$, рассчитанный по формуле (48), равен двести тридцать одному. Округлив в большую сторону до целого десятка, получаем число испытаний равное двумстам сорока.

а Исследования влияния увеличения объема измерения на точность оценки разрывной нагрузки проводилось на одиночной крученной нити марки $\text{РА-12-25}\times\text{1-25}$. Разрывная нагрузка определялась ГОСТ 6611.2-73, зажимная длина образцов 250 мм, скорость перемещения зажима испытательной машины от 2 до 10 мм/мин. Испытания проводились на разрывной машине «Инстрон» серии 4411 в лаборатории кафедры текстильного материаловедения РГУ им. А.Н. Косыгина под руководством к.т.н. Курденковой А.В. Результаты испытаний представлены в табл. 50.

Табл. 50. Разрывная нагрузка, количество испытаний, скорость перемещения зажима разрывной машины при испытаниях одиночных крученных нитей для определения достаточности количества испытаний

Наименование	Скорость перемещения зажима разрывной машины, мм/мин				
	2	4	6	8	10
Количество испытаний	240	240	240	240	240
Число результатов с временем до разрыва 20 ± 3 с	30	69	126	119	198
Процент результатов с временем до разрыва 20 ± 3 с	12,5	28,75	52,5	49,58	89,16
Разрывная нагрузка, Н	2,66	2,36	2,14	1,92	3,68
Удельная разрывная нагрузка, сН/текс	5,70	5,06	4,58	4,12	7,88
Среднее квадратическое отклонение	1,69	1,37	1,25	1,11	2,49
Коэффициент вариации	0,2958	0,2706	0,2719	0,2687	0,3159

а

Максимальное количество результатов испытаний со временем до разрыва 20 ± 3 с, равное ста девяноста восьми, получено для скорости перемещения зажима разрывной машины 10 мм/мин. Относительная доверительная ошибка среднего значения $\delta\{\bar{Y}\}$ равна 4,08%, что меньше заданного значения.

5.3. Теоретические и экспериментальные аспекты проектирования и выработки однокруточных и многокруточных нитей

5.3.1. Однокритериальная оптимизация круток

Проведенный анализ структуры и свойств нитей производства 3M Company и Hiltex Technical Textiles предоставил исходные данные для проектирования крученных нитей, проводимого в рамках данного исследования.

При проектировании крученных нитей необходимо решить вопрос о структуре крученой нити: числе сложений и крутке однокруточных и многокруточных нитей. С этой целью проведена однокритериальная оптимизации круток путем постановки полного факторного эксперимента (ПФЭ) [102, 103]. Эксперименты по оптимизации крутки выполняли для 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. Критериями оптимизации служили разрывная нагрузка и неравновесность. Первое кручение одиночных нитей выполнялось с круткой 40 кручений/м, второе и третье кручения с круткой, согласно плану эксперимента. Уравнение регрессии в кодированном виде по критерию разрывная нагрузка имеет вид:

$$Y_R = 8,36 + 0,9x_1 + 1,16x_2 - 2,924x_1^2 - 0,989x_2^2 \quad (49)$$

Уравнение регрессии в кодированном виде по критерию неравновесность имеет вид:

$$Y_R = 6,8 - 2,09x_1^2 - 2,59x_2^2 \quad (50)$$

Y_R – результативный признак (разрывная нагрузка, Н), меняются под действием варьируемых факторов: x_1 – первая крутка нитей в два сложения, x_2 – вторая крутка нитей в пять сложений. Диапазон изменения фактора x_1 от 18 до 48,5 кручений/м; диапазон изменения фактора x_2 от 18 до 48,5 кручений/м.

Варьируемые факторы и их уровни при нахождении зависимости между величинами второй крутки нитей в два сложения и третьей крутки нитей в пять сложений задавались по результатам предварительных экспериментов. Разрывная нагрузка определялась на универсальной разрывной машине «Инстрон» серии 4411 по ГОСТ 6611.2-73, неравновесность на приборе ПОН-1 по ГОСТ 28753.2-90 [104]. Результаты экспериментов по оптимизации крутки представлены в табл. 51.

Табл. 51. Результаты экспериментов по оптимизации крутки

Критерий оптимизации	Первая крутка, кручений/м	Вторая крутка, кручений/м	Третья крутка, кручений/м	Показатель
Разрывная нагрузка	40	33,5	22,5	9,53 Н
Неравновесность	40	33,5	33,5	6 витков

5.3.2. Расчет разрывной нагрузки крученных нитей

На основании теоретических и экспериментальных исследований, представленных в разделах настоящей главы, в соответствии с целями исследования поставлена задача по расчету разрывной нагрузки однокруточных и многокруточных нитей оптимальной структуры.

Исходя из значений минимальной разрывной нагрузки крученых нитей, обеспечивающей необходимые эксплуатационные свойства наполненных шнуров и специфику напряженно-деформированного состояния нитей в процессе выработки наполненных шнуров, разрывная нагрузка однокруточных нитей должна составлять от 3 до 6 Н, а многокруточных от 6 до 12 Н.

Для дальнейших исследований выбраны нити следующей структуры:

- однокруточные: $TZK_1 \times 2SK_2$; $TZK_1 \times 3SK_2$; $TZK_1 \times 4SK_2$;
- многокруточные: $TZK_1 \times 2SK_2 \times 2ZK_3$; $TZK_1 \times 3SK_2 \times 2ZK_3$; $TZK_1 \times 4SK_2 \times 2ZK_3$.

Где: T – линейная плотность комплексной нити;

Z, S – направление крутки;

K_1, K_2, K_3 – первая, вторая и третья крутки.

Существует несколько методов расчета разрывной нагрузки крученых нитей:

- энергетический (Г. Райдинг, Л.Р.Г. Трелор);
- статистической прочности (Демидов А.В., Макаров А.Г., Щербаков В.П.);
- эмпирический (Белицин М.Н., Корицкий К.И., Перепелкин К.Е.).

Авторы полагают, что при исследовании новых для отечественной науки текстильных материалов в условиях проводимых теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание научных основ технологии получения крученых нитей из оксида алюминия, наиболее приемлемым является эмпирический метод, основанный на экспериментальных исследованиях. Расчет разрывной нагрузки производился исходя из фактических механических свойств элементарных и комплексных нитей, определенных в настоящей главе. Расчет разрывной нагрузки одиночных, однокруточных и многокруточных нитей предлагается проводить по формулам К.И. Корицкого [75].

Формула для расчета разрывной нагрузки одиночных нитей:

$$P = P_0 (1 + \eta \mu \cos \beta_c \sin \beta_c), \quad (51)$$

где P_0 – разрывная нагрузка комплексной нити;

μ – коэффициент трения покоя пары трения нить - нить;

$\eta = 1 + 0,1\sqrt{m_0}$ – коэффициент неодновременности разрыва комплексных нитей, где m_0 – число элементарных нитей в комплексной нити;

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

Расчет разрывной нагрузки для однокруточных и многокруточных нитей, состоящих из m_1 стренг:

$$P_2 = P'_1 m_1 \cos \beta'_2, \quad (52)$$

где P'_1 – разрывная нагрузка стренги при крутке, которую она имеет, находясь в структуре крученой нити

m_1 – число стренг в крученой нити;

β'_2 – угол наклона стренги к оси в момент ее разрыва.

Вычисление угла β'_2 по формуле:

$$\operatorname{tg} \beta'_2 = 2\pi k_2 R'_2 t'_2, \quad (53)$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности, величина которого принимается: при $m_1 = 2$ $k = 0,54$; $m_1 = 3$ $k = 0,63$; $m_1 = 4$ $k = 0,67$ [75];

R'_2 – радиус крученой нити;

$t'_2 = 1000 / h'_2$ – число кручений на 1 метр, где h'_2 – шаг крутки в момент разрыва нити.

С целью проверки адекватности применения формул (51) и (52) применительно к нитям из оксида алюминия проведены расчеты разрывной нагрузки одиночных и многокруточных нитей 3M™ Nextel™ 3M Company. Исходные данные для расчета разрывной нагрузки одиночной крученой нити 3M™ Nextel™ 312 по формуле (51) представлены в табл. 52 [3].

Табл. 52. Исходные данные для расчета и расчетная разрывная нагрузка одиночной крученой нити 3M™ Nextel™ 312

d , мм	T , текс	P_0 , Н	m_0	η	μ	β_c	P , Н
0,6	100	31,36	400	1,736	0,64	7°39'	35,99

Исходные данные для расчета, расчетная и фактическая разрывная нагрузка крученных нитей 3M™ Nextel™ 312 по формуле (52) представлены в табл. 53 [3].

Табл. 53. Исходные данные для расчета разрывной нагрузки и фактическая разрывная нагрузка крученных нитей 3M™ Nextel™ 312

Структура крученой нити	P'_1	m_1	R_2	T_2	β_2	β'_2	P_2	P_Φ	Отклонение расчетной от фактической разрывной нагрузки, %
2/2	35,9	4	0,21	106	5° 15'	4° 49'	143,4	155,8	10,94
2/3	35,9	6	0,31	106	8° 5'	6° 44'	214,4	235,2	11,91

Как можно видеть из табл. 53, разрывная нагрузка многокруточных нитей, рассчитанных по формулам (51) и (52), адекватно и с достаточной точностью соответствует фактической разрывной нагрузке. Вследствие этого имеется возможность применения указанных формул для расчета разрывной нагрузки отечественных крученных нитей из оксида алюминия.

Исходные данные для расчета, расчетная разрывная и удельная разрывная нагрузка одиночных крученных нитей из оксида алюминия отечественного производства, рассчитанная по формуле (51), представлены в табл. 54. Фактическая разрывная нагрузка одиночной крученой нити марки ОА–12–25×1–25 равна 1,86 Н, тогда как расчетная разрывная нагрузка равна 1,76 Н. Отклонение расчетной от фактической разрывной нагрузки составляет 5,68%.

Как показали эксперименты, разрывная нагрузка однокруточных и многокруточных нитей из оксида алюминия отечественного производства превышает расчетную разрывную нагрузку, выполненную по формуле (52). Это связано с особенностями формирования крученных нитей по способу отдельной подачи нитей в зону формирования.

Табл. 54. Исходные данные для расчета, расчетная разрывная и удельная разрывная нагрузка одиночных крученых нитей

Марка крученой нити	T , текс	P_0 , Н	m_0	η	μ	β_C	P	P_y
ОА–11–20 × 1–20	20±1	1,09	80	1,43	0,46	1°38'	1,81	9,05
ОА–12–25×1–25	25±2	1,06	80	1,43	0,46	1°40'	1,76	7,04
ОА–13–30×1–30	30±2	0,92	80	1,43	0,46	1°42'	1,57	5,23

Табл. 55. Исходные данные для расчета, расчетная разрывная и удельная разрывная нагрузка однокруточных и многокруточных нитей

Марка крученой нити	d_1	T_1	K_2	P'_1	m_1	k_1	d_2	T_2	K_2	β_2	β'_2	P_2	P_y
ОА–11–20×1×3–60	0,196	20	36	1,81	3	1,3	0,431	60	28	3,5	3,46	7,05	11,75
ОА–11–20×1×3×2–120	0,431	60	36	7,05	6	1,2	0,689	120	28	2,1	2,0	16,91	14,09
ОА–12–25×1×2–50	0,212	25	36	1,76	2	1,2	0,372	50	28	1,3	1,283	4,22	8,44
ОА–12–25×1×2×2–100	0,372	50	36	4,22	4	1,2	0,595	100	28	1,9	1,72	10,13	10,13
ОА–13–30×1×4–120	0,223	30	36	1,57	4	1,6	0,494	120	28	4,3	4,02	9,97	8,31
ОА–13–30×1×4×2–240	0,498	120	36	9,97	8	1,2	0,791	240	28	2,2	2,28	23,81	9,92

d_1 – диаметр одиночной нити, мм

T_1 – линейная плотность одной стренги, текс;

K_2 – вторая крутка одной стренги, кр/м;

P'_1 – разрывная нагрузка одной стренги, Н;

m_1 – число стренг в крученой нити, шт.;

k_1 – коэффициент пропорциональности;

d_2 – диаметр крученой нити, мм;

T_2 – результирующая линейная плотность крученой нити, текс;

K_3 – третья крутка крученой нити, кр/м;

β_2 – угол наклона оси стренг к оси крученой нити, град.;

β'_2 – угол наклона оси стренг к оси крученой нити в момент разрыва, град.;

P_2 – разрывная нагрузка крученой нити, состоящей из m_1 стренг, Н;

P_y – удельная разрывная нагрузка крученой нити, состоящей из m_1 стренг, сН/текс.

С целью адекватного представления расчетной разрывной нагрузки однокруточных и многокруточных нитей в формулу (52) введен поправочный коэффициент пропорциональности k_1 , зависящий от числа стренг в крученой нити:

$$P_2 = P'_1 m_1 k_1 \cos \beta'_2, \quad (54)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, зависящий от числа стренг в крученой нити: при $m_1 = 2$, $k_1 = 1,2$; $m_1 = 3$, $k_1 = 1,3$; $m_1 = 4$, $k_1 = 1,6$.

Исходные данные для расчета разрывной нагрузки, расчетная разрывная и удельная разрывная нагрузка однокруточных и многокруточных нитей из оксида алюминия отечественного производства, рассчитанных по формуле (54), представлены в табл. 55.

5.3.3 Выработка и определение разрывной нагрузки однокруточных и многокруточных нитей экспериментальной партии

С целью уточнения технологических режимов кручения, разработанных на первом этапе исследований [33], выработаны одиночные нити марки ОА–12–25×1–25, однокруточные нити марки ОА–12–25×1×2–50, многокруточные нити марки ОА–12–5×1×2×2–100. В процессе кручения на одиночные нити марки ОА–12–25×1–25 наносилась водная эмульсия на основе препарата АВИБ-Б оптимальной концентрации равной 8% (масс).

Выработка крученых нитей экспериментальной партии производилась на универсальном стенде за три перехода:

- первое кручение (одиночная нить марки ОА–12–25×1–25);
- второе кручение (однокруточная нить марки ОА–12–25×1×2–50);
- третье кручение (многокруточная нить марки ОА–12–25×1×2×2–100).

Характеристика сырья, материалов, полуфабрикатов и регламентируемые показатели с допускаемыми отклонениями представлены в табл. 56.

Параметры заправки универсального станда для выработки крученых нитей экспериментальной партии указаны в табл. 57.

План кручения для выработки крученых нитей экспериментальной партии представлен в табл. 58.

Табл. 56. Характеристика сырья, материалов и полуфабрикатов

Наименование сырья, материалов, полуфабрикатов	Регламентируемые показатели с допускаемыми отклонениями
Нить комплексная из оксида алюминия марки ОА–12–25	1. Линейная плотность 25 ± 2 текс 2. Разрывная нагрузка, не менее 1 Н
Замасливатель АВИБ – Б, UN 3082 ТУ 2484 –054 –17965 – 829 – 2005	Водная эмульсия, концентрация 8% (масс.)

Табл. 57. Параметры заправки универсального станда для выработки крученых нитей экспериментальной партии

Номер перехода	Марка крученой нити	Линейная плотность, текс	Число нитей, шт.	Крутка, кручений/м
1	ОА–12–25×1–25	25	1	40
2	ОА–12–25×1×2–50	50	2	36
3	ОА-12-25×1×2×2-100	100	4	28

Табл. 58 План кручения для выработки крученых нитей экспериментальной партии

Номер перехода	Марка крученой нити	Натяжение, сН	Скорость намотки на выходную бобину, м/мин	Частота вращения крутильной платформы, мин ⁻¹
1	ОА–12–25×1–25	20	8	320
2	ОА–12–25×1×2–50	40	10	360
3	ОА-12-25×1×2×2-100	80	20	560

Определение разрывной нагрузки нитей экспериментальной партии марок ОА–12–25×1–25, ОА–12–25×1×2–50, ОА-12-25×1×2×2-100 проводили по ГОСТ6611.2-73 на образцах с зажимной длиной 250 мм. Скорость перемещения зажима разрывной машины 10 мм/мин. Количество испытаний 30 для каждого из образцов. Результаты испытаний представлены в табл. 59.

Табл. 59. Результаты испытаний крученных нитей экспериментальной партии

Наименование параметра	Марка крученной нити		
	ОА–12– 25×1–25	ОА–12– 25×1×2–50	ОА-12- 25×1×2×2– 100
Количество испытаний	30	30	30
Число результатов с временем до разрыва 20 ± 3 с	30	30	30
Процент результатов временем до разрыва 20 ± 3 с, %	100	100	100
Разрывная нагрузка, Н	1,9	3,39	11,12
Среднее значение удельной разрывной нагрузки, сН/текс	7,92	7,06	9,55
Среднее квадратическое отклонение	1,816	2,44	0,976
Коэффициент вариации	0,1573	0,3471	0,2294

Процент результатов временем до разрыва 20 ± 3 с равен 100% для каждого из образцов. Как можно видеть из данных, представленных в табл. 44 и табл. 57 и табл. 59, с увеличением скорости перемещения зажима разрывной машины с 2 до 10 мм/мин ведет к увеличению числа результатов испытаний с временем до разрыва 20 ± 3 с. Этот вывод особенно важен при выполнении большого количества испытаний при отработке технологии получения крученных нитей из новых материалов.

5.3.4. Выработка и определение механических свойств однокруточных и многокруточных нитей опытной партии

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований по разработке технологии производства крученых нитей, приведённых в разделах настоящей главы, разработан «Временный технологический регламент на комплекс научно-исследовательских работ по выработке опытной партии крученых нитей из оксида алюминия» (ВТР №1-2020, ПРИЛОЖЕНИЕ №2). Технологический регламент (ТР) – нормативный документ, который учреждает методы производства, технические средства, технологические нормативы, условия и детальный порядок осуществления технологического процесса. Выработка опытной партии крученых нитей осуществлялась на универсальном стенде в соответствие с ВТР №1-2020.

Определение механических свойств однокруточных и многокруточных нитей опытной партии проводились в ИЦ «Питон» (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЮ24 от 18.08.2015 г.) по ГОСТ 6611.2-73 на разрывной машине И 4301-М. Зажимная длина образцов 250 мм, скорость перемещения зажима разрывной машины 10 мм/мин. Учитывались только те результаты испытаний, время до разрыва образца у которых составляло 20 ± 3 с. Линейная плотность образцов крученых нитей определялась по ГОСТ 6943.1 – 2015.

Число испытаний $m = 5$, так как проведенные исследования не выявили изменения основных числовых характеристик случайных величин для случаев $m = 30$ и $m = 240$ (табл. 53 и табл. 54).

В табл. 60 приведены разрывная нагрузка (P), удельная разрывная нагрузка (P_y), удлинение (δ), неравновесность (H) крученых нитей из оксида алюминия опытной партии.

Табл. 60. Разрывная нагрузка, удельная разрывная нагрузка, удлинение, неравновесность крученых нитей из оксида алюминия 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

Из данных, полученных при обработке результатов экспериментов по определению механических свойств крученых нитей опытной партии можно видеть, что коэффициент вариации по разрывной нагрузке и удлинению крученых нитей снижается с увеличением числа сложений. Марка крученой нити, число сложений, коэффициенты вариации по разрывной нагрузке и удлинению крученых нитей представлены в табл. 61.

Табл. 61. Марка крученой нити, число стренг, коэффициенты вариации по разрывной нагрузке и удлинению крученых нитей

№ варианта	Марка крученой нити	Число стренг	Коэффициент вариации	
			Разрывная нагрузка	Удлинение
1	ОА–11–20×1×3–60	3	0,2341	0,071
2	ОА–11–20×1×3×2–120	6	0,1787	0,0387
3	ОА–12–25×1×2–50	2	0,1353	0,1225
4	ОА–12–25×1×2×2–100	4	0,1314	0,048
5	ОА–13–30×1×4–120	4	0,0611	0,1543
6	ОА–13–30×1×4×2–240	8	0,0476	0,0393

Из данных, представленных в табл. 61, видно, что удвоение числа стренг крученых нитях приводит к заметному снижению коэффициента вариации по разрывной нагрузке и по удлинению. С увеличением числа стренг в крученой нити изменяется ее плотность. Коэффициент корреляции между плотностью и разрывной нагрузкой крученых нитей представлен в табл. 62.

Табл. 62. Коэффициент корреляции между плотностью и разрывной нагрузкой крученых нитей

Марка крученой нити	Расчетный диаметр, мм	Плотность, кг/м ³	Коэффициент корреляции
ОА–12–25×1×2–50	0,372	719	0,9845
ОА–11–20×1×3–60	0,431	643	0,9298
ОА–13–30×1×4–120	0,494	979	0,9599
ОА–12–25×1×2×2–100	0,595	345	0,9643
ОА–11–20×1×3×2–120	0,689	321	0,9716
ОА–13–30×1×4×2–240	0,791	473	0,9832

Величина коэффициентов корреляции по модулю для крученых нитей близка к единице. Таким образом, изменение плотности заметно отражается на изменении разрывной нагрузки. Положительная корреляция у однокруточных и многокруточных нитей говорит о том, что увеличение плотности крученой нити ведет к увеличению разрывной нагрузки.

Фактически полученный коэффициент корреляции всегда является выборочным, так как он вычисляется на основе ограниченной совокупности, представляющей выборку из генеральной. Поэтому он имеет ошибку выборочности, которая является мерой расхождения между $r_{\text{выбор.}}(X; Y)$ и коэффициентом корреляции для генеральной совокупности ρ . В случае малой выборки (число наблюдений меньше 30) для оценки достоверности коэффициента корреляции, т.е. для определения соответствия коэффициента корреляции, вычисленного по выборочным данным, действительным размерам связи в генеральной совокупности, определяется средняя ошибка коэффициента корреляции m_r и критерий достоверности t_r .

В случае малой выборки ($N < 30$) значения критерия достоверности t_r рассчитывается по формуле [98]:

$$t_r = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}} \quad (55)$$

В табл. 63 приведены расчетные t_r и табличные t_t значения критерия достоверности.

Табл. 63. Расчетные и табличные значения критерия достоверности

X	Y	Коэффициент корреляции	t_r	t_t
d	σ	- 0,8981	5,403	2,306
L	σ	- 0,9301	4,39	2,776
$\gamma_{1 \times 2}$	P _P	0,9845	9,376	2,776
$\gamma_{1 \times 3}$	P _P	0,9298	4,37	2,776
$\gamma_{1 \times 4}$	P _P	0,9599	5,931	2,776
$\gamma_{2 \times 2}$	P _P	0,9643	6,313	2,776
$\gamma_{2 \times 3}$	P _P	0,9716	7,123	2,776
$\gamma_{2 \times 4}$	P _P	0,9832	9,34	2,776

Найденные значения t_r превышает табличное t_t значения критерия достоверности [98], следовательно, для заданного уровня доверительной вероятности $p = 0,95$ и числа степеней свободы $N = 2$ можно считать нулевую гипотезу отвергнутой, т.е. признать данное значение $r_{\text{выбор.}}(X; Y)$ достоверными.

В табл. 64 приведены значения расчетной разрывной нагрузки, выполненные по формулам (51) и (54) и фактической разрывной нагрузки крученных нитей опытной партии.

Табл. 64. Расчетная и фактическая разрывная нагрузка крученных нитей опытной партии

Марка крученной нити	Расчетное значение разрывной нагрузки, Н	Фактическое значение разрывной нагрузки, Н	Отклонение расчетной от фактической разрывной нагрузки, %
ОА-11-20×1×3-60	7,05	6,82	3,26
ОА-11-20×1×3×2-120	16,91	18,16	7,39
ОА-12-25×1×2-50	4,22	3,72	11,85
ОА-12-25×1×2×2-100	10,13	11,69	15,40
ОА-13-30×1×4-120	9,97	12,09	17,53
ОА-13-30×1×4×2-240	23,81	24,66	3,45

Как уже говорилось выше, традиционные способы кручения по способу совместной подачи нитей в зону формирования значительно отличаются от способа отдельной подачи нитей в зону формирования, разработанного для кручения керамических нитей.

С целью исследования влияния способа кручения на разрывную нагрузку выработаны крученые нити по способу совместной подачи и определена разрывная нагрузка по ГОСТ 6611.2 – 73 на разрывной машине И4301 – М. Зажимная длина образцов 250 мм, скорость перемещения зажима разрывной машины 10 мм/мин.

Значения расчетной разрывной нагрузки, выполненной по формулам (51), (52) и фактической разрывной нагрузки крученых нитей по способу совместной подачи нитей в зону формирования, представлены в табл. 65.

Табл. 65. Расчетная и фактическая разрывная нагрузка крученых нитей, выработанных по способу совместной подачи нитей в зону формирования

Марка крученой нити	Расчетная разрывная нагрузка, Н	Фактическая разрывная нагрузка, Н	Отклонение расчетной от фактической разрывной нагрузки, %
ОА–12–25×1×2×2–100	6,97	6,08	14,63
ОА–11–20×1×3×2–120	10,8	10,23	5,51
ОА–13–30×1×4×2–240	12,41	12,14	2,17

Как можно видеть из данных, представленных в табл. 64 и табл. 65, разрывная нагрузка крученых нитей, выработанных по способу отдельной подачи нитей в зону формирования, превышает разрывную нагрузку нитей, выработанных по способу совместной подачи нитей 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.

Установленное различие между разрывной нагрузкой нитей, выработанных двумя способами в равных условиях на универсальном стенде, подчеркивает специфику способа отдельной подачи нитей в зону

формирования. С целью определения отличительных свойств крученых нитей, вырабатываемых способами отдельной и совместной подачи нитей в зону формирования, необходимы дальнейшие исследования с целью разработки методов анализа физико-механических свойств и деформационных процессов в текстильных керамических материалах.

Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили возможность производства крученых нитей из оксида алюминия с заданными характеристиками механических свойств для высокотемпературных наполненных шнуров.

ГЛАВА 6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВЫРАБОТКА НАПОЛНЕННЫХ ШНУРОВ ИЗ КРУЧЕНЫХ НИТЕЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Гибкие высокотемпературные уплотнения представлены в основном наполненными шнурами общетехнического и специального назначения. Основное назначения шнуров общего назначения – герметизация стыков неподвижных и подвижных соединений узлов энергетического и металлургического оборудования. Шнуры специального назначения разрабатываются под применение в конкретных узлах герметизации сложных технических систем – РКТ и ГЛА. К наполненным шнурам специального назначения предъявляются соответствующие требования заказчика для каждого конкретного случая.

Наполненный шнур – текстильное изделие, состоящее из наполнителя и оплетки. Оплетка шнуров изготавливается из крученых нитей и пряжи, наполнитель из ровинга, крученых нитей и нетканых материалов. Оплетка и наполнитель высокотемпературных шнуров изготавливают из неорганических материалов (тугоплавких оксидов и карбидов).

Неорганические материалы и в первую очередь керамические были признаны наиболее перспективными для шнуров специального назначения в исследовании «Flexible Mechanical Seal Concepts», опубликованном National Energy Technology Laboratory (США) [105]. В публикации рассмотрена концепция высокотемпературного гибкого уплотнения, использующего сжимающие нагрузки для обеспечения герметичности. Концепция предусматривает преемственность и продолжение исследований в области высокотемпературных уплотнений, начатых в 1980-х годах.

6.1. Высокотемпературные наполненные шнуры зарубежного производства

Еще в 1980-х NASA была сформирована задача и поставлена цель исследований по созданию гиперзвуковых летательных аппаратов по программе National Aerospace Plane (NASP). Работы по программе NASP начались в середине 1980-х после исследований проведенных Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) по проекту Copper Canyon (1982—1985). Программа NASP, финансируемая NASA и министерством обороны США, велась с участием фирм McDonnell Douglas, Rockwell International и General Dynamics, работавшими над созданием планера и оборудования гиперзвукового одноступенчатого космолана. Фирмы Rocketdyne и Pratt&Whitney работали над созданием гиперзвуковых прямоточных двигателей. В области высокотемпературных гибких уплотнений предусматривались исследования по разработке эксплуатационных требований к уплотнениям и разработка конструкции уплотнений [106].

Разработка и оптимизация конструкции уплотнений выполнялась NASA в несколько этапов. На первом этапе работ проводились эксперименты по подбору материалов для уплотнений. Среди кандидатов на применение в наполненных шнурах были рассмотрены нити из оксидной и безоксидной керамики следующих производителей, марок и химического состава [106, 107]:

1. Оксид алюминия. 3M Company:

3MTM NextelTM 312 (Al_2O_3 – 62%, SiO_2 – 24%, B_2O_3 – 14%);

3MTM NextelTM 440 (Al_2O_3 – 70%, SiO_2 – 28%, B_2O_3 – 2%);

3MTM NextelTM 550 (Al_2O_3 – 73%, SiO_2 – 27%).

2. Нитрид кремния. Daw Corning: HPZ (Si – 57%, N – 28%, C – 10%, O – 5%).

3. Карбид кремния. Nippon Carbon: Nicolon S (Si – 69%, C – 30,8%, O – 0,2%).

По результатам проведенных исследований разработан высокотемпературное гибкое уплотнение и экспериментальная установка для испытания уплотнений, защищенные патентом US 5,082,293A [108].

На следующем этапе программы NASP проведены исследования трибологических свойств материалов – кандидатов среди керамических текстильных нитей для высокотемпературных наполненных шнуров на воздухе и в среде водорода при температуре до 1000°C [109, 110]. На основании проведенных исследований по совокупности факторов: потеря прочности при высоких температурах и износостойкость нити из оксида алюминия 3M™ Nextel™ 440, 3M™ Nextel™ 550 производства 3M Company показали лучшие результаты. Нити из нитрида кремния HPZ производства Daw Corning и карбида кремния Nicolon S производства Nippon Carbon продемонстрировали адекватные и стабильные свойства прочности на воздухе, но низкая долговечность в среде водорода делает их не совсем подходящим кандидатом для материалов высокотемпературных уплотнений. В дальнейших исследованиях уточнялись особенности применения наполненных шнуров наполненных шнуров из оксидной и безоксидной керамики [111]. Результаты проведенных исследований оказали влияние на выбор материалов, применяемые для дальнейших исследований. Так, если по патенту US 5,082,293A [108] предполагалось применение оксидной и безоксидной керамики, то патент на высокотемпературное уплотнение US № 6,511,076 [112] предусматривает применение только оксидной керамики 3M™ Nextel™ 3M Company.

Дальнейшие исследования по программе NASP проводили с использованием нитей из оксида алюминия 3M Company [113, 114]. Исследовались шнуры с оплеткой из металлических нитей из никель-кобальтового сплава HS 188 и сердцевиной из ровинга 3M™ Nextel™ 440 [113], полностью из керамических нитей с оплеткой из крученых нитей 3M™ Nextel™ 550 и сердцевиной из ровинга 3M™ Nextel™ 440 и 3M™ Nextel™ 550 и оплетки из комбинированных нитей HS 188/ 3M™ Nextel™ 550

и сердцевиной из ровинга 3M™ Nextel™ 440 и 3M™ Nextel™ 550. Исследовалась структура однослойных (Single) многослойных (Multiple) шнуров [114]. На рис. 53 представлена концепция однослойных и многослойных наполненных шнуров.

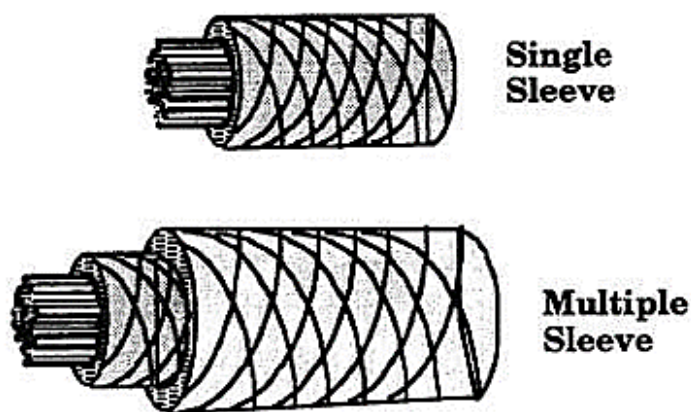


Рис. 53. Концепция однослойных и многослойных наполненных шнуров

Керамические нити на основе тугоплавких оксидов металлов имеют более высокую термическую и химическую стойкость по сравнению с нитями из углерода и нитями из карбида кремния. Температура эксплуатации наполненных шнуров из указанных бескислородных материалов в окислительной среде не превышает 500°C и 1000°C для углеродных и карбидных материалов соответственно [115]. Тогда как процесс ползучести поликристаллических нитей из оксида алюминия начинается выше температуры 1000°C, а температура эксплуатации превышает 1500°C [7]. Под высокотемпературной ползучестью понимают процесс необратимого изменения размеров твердого тела с относительно малой скоростью и без нарушения его сплошности, обусловленный длительно действующим постоянным напряжением (ниже предела текучести) и ниже температуры плавления [116].

По результатам испытаний NASA было принято решение о разработке конструкции наполненных шнуров узла уплотнения зазоров подвижных

элементов двигателя, только из нитей на основе оксида алюминия 3M™ Nextel 440 и 3M™ Nextel 550 производства 3M Company [113, 114].

6.2. Высокотемпературные наполненные шнуры отечественного производства

Как было показано выше, керамические нити на основе оксида алюминия являются безальтернативными для применения в высокотемпературных наполненных шнурах. Однако в связи с действующими санкциями керамические крученые нити и наполненные шнуры из керамических нитей зарубежного производства недоступны для отечественной промышленности.

В настоящее время на рынке Евразийского экономического союза (ЕАЭС) доступны наполненные шнуры с оплеткой и наполнителем из пряжи на основе силиката алюминия производства «ТехноМиксЦентр» (Белоруссия) и шнуры с оплеткой из кварцевых нитей и наполнителем из дискретных волокон на основе оксида алюминия производства «ВИАМ».

Параметры наполненных шнуров из керамических волокон производства ЧТП УП «ТехноМиксЦентр» представлены в табл. 66 [117].

Табл. 66. Параметры и свойства наполненных шнуров с оплеткой и наполнителем из пряжи на основе силиката алюминия производства «ТехноМиксЦентр»

Наименование параметра	Шнур плетеный квадратный	Шнур плетеный круглый
Марка шнура	НТ 1000	НТ 1000 D
Максимальная температура длительной эксплуатации, °C	1000	1000
Химический состав: Al ₂ O ₃ %	65	65
SiO ₂ %	45	45
Плотность, кг/м ³	500	500

«ВИАМ» производит наполненные шнуры марок ВШТ-1 и ВШТ-2. Оплетка шнуров ВШТ-1 выполнена из крученных кварцевых нитей КС-11-17×2×4, наполнитель из дискретных волокон оксида алюминия. Шнур марки ВШТ-2 изготавливается путем оплетки шнура марки ВШТ-1 стальной проволокой и применяется в качестве подвижного уплотнения с повышенной стойкостью к истиранию. Свойства наполненных шнуров ВШТ-1 и ВШТ-2 представлены в табл. 67 [118].

Табл. 67. Параметры и свойства наполненных шнуров с наполнителем из дискретных волокон оксида алюминия производства «ВИАМ»

Наименование параметра	ВШТ-1	ВШТ-2
Максимальная температура длительной эксплуатации, °С	1100	1100
Химический состав оплётки: SiO ₂ , %	99	99
Химический состав наполнителя: Al ₂ O ₃ , %	85	85
SiO ₂ , %	15	15
Диаметр шнура, мм	10±2	10±2
Масса 1 метра шнура, г	100	110
Плотность, кг/м ³	356	392

Все представленные на рынке ЕАЭС шнуры общего назначения имеют биаксиальную структуру, представляющую собой пространственную плетеную оболочку и однонаправленную волокнистую структуру наполнителя. На рис. 54 представлена структура наполненного шнура биаксиальной структуры [119]. На рис. 54: 1– наполнитель, 2 – оплетка, 3– шнур наполненный.



Рис. 54. Структура наполненного шнура биаксильной структуры

6.3. Проектирование высокотемпературных наполненных шнуров

Основным параметром, определяющим величину газопроницаемости наполненных шнуров, является объем межконтактного пространства, который представляет разницу между объемом уплотнения и объемом волокнистого материала в данном уплотнении. Объем межконтактного пространства характеризуется общей пористостью. В зависимости от материала уплотнения, температуры и вида газообразной среды при проектировании задается оптимальная величина общей пористости уплотнений и плотности.

С целью исследования зависимости плотности наполненного шнура от линейной плотности оплетки и наполнителя проведены эксперименты по выработке шнура наполненного на плетельной машине ШП16-3. План проведения эксперимента предусматривал выработку шнуров, варьируя линейную плотность наполнителя без изменения технологических параметров выработки, плотности плетения и линейной плотности нитей оплетки. Технологические параметры выработки наполненных шнуров экспериментальной партии представлены в табл. 68.

Табл. 68. Технологические параметры выработки наполненных шнуров экспериментальной партии

Частота вращения крылаток, об/мин	Заправочное натяжение нитей оплетки, сН	Скорость отвода шнура из зоны формирования, м/мин	Расстановка веретен	Плотность плетения, число нитей на 1 см
200	180±10	0,44	1з + 3с	4

Расстановка плетельных веретен по плетельной головке характеризуется раппортом расстановки. Условное обозначение раппорта расстановки 1з + 3с показывает, что один паз крылатки занят плетельным веретеном, а три паза свободны. Плетельная машина ШП16-3 конструктивно имеет по 8 крылаток

на каждой из трех плетельных головок. Для выполнения оплетки с указанным раппортом расстановки задействовано восемь плетельных веретен. Четыре плетельных веретена в каждом направлении с установкой через одно: каждое веретено левого направления (по ходу часовой стрелки) чередуется с веретеном правого направления (против хода часовой стрелки).

В экспериментах для нитей оплетки использовалась крученая кремнеземная нить K11C6-180 линейной плотностью 180 текс в три сложения, для наполнителя использовался кремнеземный ровинг линейной плотностью 900 текс с числом сложений от одного до десяти. Параметры и свойства шнуров экспериментальной партии представлены в табл. 69.

Табл. 69. Параметры и свойства наполненных шнуров экспериментальной партии

Число нитей оплетки	Линейная плотность, текс		Диаметр шнура, мм	Масса 1 метра шнура, г	Плотность, кг/м ³
	Нить оплетки	Наполнитель			
8	540	900	1,8	7,01	1050
8	540	1800	2,0	7,91	1200
8	540	2700	2,5	8,81	1140
8	540	5400	3,0	11,51	1180
8	540	7200	3,11	13,31	1370
8	540	9000	3,22	16,91	1490

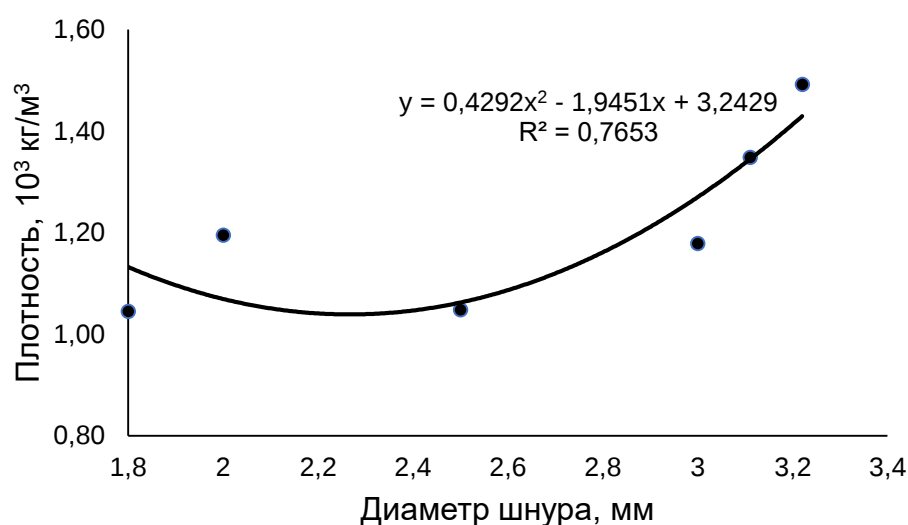


Рис. 55. Зависимость плотности от диаметра наполненного шнура

На рис. 55 представлена зависимость плотности от диаметра наполненного шнура. На рис. 55 можно видеть, что плотность шнура снижается до некоторого значения, а затем увеличивается. Такое изменение плотности обусловлено тем, что для шнура диаметром 1,8 мм соотношение массы нитей оплетки и массы наполнителя значительно отличаются от аналогичного соотношения для шнура диаметром 3,22 мм.

Зависимость коэффициента покрытия от диаметра наполненного шнура представлена на рис. 56.

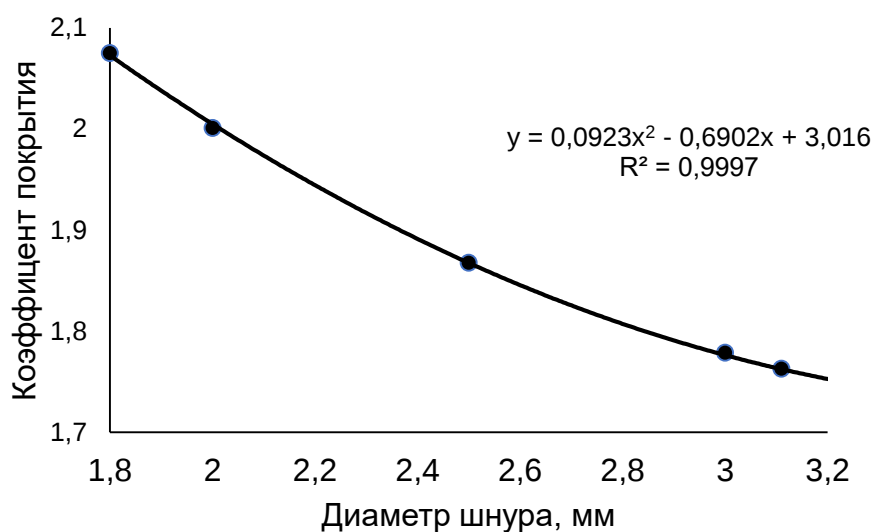


Рис. 56. Зависимость коэффициента покрытия от диаметра наполненного шнура

Плотность шнуров увеличивается для шнуров диаметром от 1,8 до 3,22 мм, в то время как коэффициент покрытия на указанном интервале диаметров шнура снижается (рис. 56). Это связано с тем, что при увеличении диаметра на единицу площади наполнителя приходится одинаковое число нитей оплетки. Таким образом, варьируя массу нитей оплетки и наполнителя, можно вырабатывать шнуры наполненные с большим диапазоном плотности.

С целью проведения более полного анализа структуры наполненных шнуров предлагается ввести новый параметр – коэффициент массового отношения K_{MO} . Коэффициент массового отношения является параметром,

характеризующим структуру шнуров наполненных, который определяется из следующего выражения:

$$K_{MO} = \frac{m_O}{m_H}, \quad (56)$$

где m_O — масса оплетки шнура наполненного;

m_H — масса наполнителя шнура наполненного.

6.4. Выработка наполненного шнура из крученых нитей оксида алюминия отечественного производства

На основании проведенных экспериментов разработан «Временный технический регламент на комплекс научно-исследовательских работ по выработке экспериментальной партии наполненных шнуров из крученых нитей оксида алюминия» (ВТР №2-2020, ПРИЛОЖЕНИЕ №3).

Плетельная машина ШП16–3 оснащена плетельными веретенами ВПЛ–2. Веретена ВПЛ–2, разработанные Егорьевским механическим заводом в 1980-х годах, по параметрам: точность регулировки натяжения, стабильная отдачи нити уступают современным веретенам ВПР–125, изготовленным ООО ВФ «Текс – Интер» [120].

В связи с тем, что нити из оксида алюминия имеют невысокие механические свойства, предпочтение было отдано веретенам ВПР-125. Однако поскольку подпятник веретен имеет различную конструкцию, пришлось доработать веретено ВПР-125 путем установки на нем подпятник веретена ВПЛ-2. На рис. 57 представлены плетельные веретена ВПЛ-2 (рис. 57, а), ВПР-125 (рис. 57, б) и доработанное веретено ВПР-125 (рис. 57, в). На рис. 58 представлены веретена ВПР-125 после доработки, установленные на машину ШП 16-3.



а)

б)

в)

Рис. 57. Плетельные веретена ВПЛ-2 (а), ВПР-125 (б) и доработанное веретено ВПР-125 (в)



Рис. 58. Веретена ВПР-125 после доработки установленные на плетельную машину ШП 16-3

С целью выработки шнура оптимальной структуры на основании проведенных экспериментов принято решение использовать для оплетки нити

марки ОА–13–30×1×4×2–240 в два сложения, для наполнителя использовать крученые нити марки ОА–11–20×1×3×2–120 в двадцать сложений. Выработка шнура выполнялась согласно ВТР №2 – 2020. В табл.70 представлены параметры и свойства шнура наполненного из крученых нитей оксида алюминия отечественного производства [121].

Табл. 70. Параметры и свойства шнура марки ШОАН (К) – 2,5 из крученых нитей оксида алюминия.

Число нитей оплетки	Линейная плотность, текс		Диаметр шнура, мм	Масса 1 метра шнура, г	Плотность, кг/м ³
	Оплетка	Наполнитель			
4	480	2400	2,45	4,53	960,7

На рис. 59 представлена фотография шнура марки ШОАН (К) – 2,5 из крученых нитей оксида алюминия



Рис. 59. Фотография шнура марки ШОАН (К) – 2,5 из крученых нитей оксида алюминия

Одной из количественных оценок качества шнуров является гибкость. Под гибкостью шнуров понимается отношение размера поперечного сечения шнура к минимальному диаметру цилиндра, вокруг которого можно изогнуть шнур без повреждения нитей оплетки. В работе [112] представлены результаты экспериментов по определению гибкости шнура тип АС1 производства Lewis Research Center (США). Минимальный (критический) диаметр цилиндра для шнура наполненного тип АС1 равен 16,4 дюйма (416,56 мм), а отношение диаметра шнура к критическому диаметру равно 0,036 [107].

Шнур марки ШОАН(К) – 2,5 имеет аналогичную шнуру тип АС1 структуру и материал наполнителя и оплетки – крученые нити из оксида алюминия. Критический диаметр для шнура марки ШОАН(К) – 2,5, определенный экспериментально, равен 40 мм. На рис. 60 представлен шнур ШОАН(К) – 2,5, изогнутый на цилиндре диаметром 40 мм. 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.



Рис. 60. Шнур ШОАН(К) – 2,5, изогнутый на цилиндре диаметром 40 мм

Керамические нити оплетки могут иметь значительные повреждения в процессе плетения, что отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах наполненных шнуров. С целью сохранения целостности нитей оплетки предпринимаются определенный комплекс мер по контролю натяжения и подбора замасливателя нитей в процессе выработки крученой нити. Это подтверждает адекватность выбора оптимальных режимов выработки крученых нитей их оксида алюминия и высокотемпературного наполненного шнура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа литературных источников, патентно – технических исследований и анализа рынка керамических текстильных материалов определены основные направления исследования по разработке технологии производства крученых нитей из оксида алюминия для гибких высокотемпературных уплотнений.

Разработка научно обоснованной технологии производства материалов из керамических крученых на основе оксида алюминия, проводимые в течение последних десяти лет, позволила получить положительные практические результаты. Исследования проводились большим коллективом преподавателей и научных сотрудников различных специальностей, что позволило заложить научные основы теории и производства высокотемпературных уплотнений.

В целом, для развития инновационного научно – технического задела в области гибких высокотемпературных уплотнений важным является вопрос междисциплинарного способа исследований, при котором интегрируются методы двух или более дисциплин или направлений специальных знаний. Такие исследования проводятся с целью решения фундаментальных и практических задач, выходящих за рамки одной дисциплины или области исследовательской практики.

Впервые были выработаны крученые нити из оксида алюминия отечественного производства для гибких высокотемпературных наполненных шнуров с достижением УГТ4. Впервые выработан высокотемпературный наполненный шнур с оплеткой и наполнителем из крученых нитей из оксида алюминия с достижением УГТ2, что подтверждает актуальность разработанных технологий. Решение такой научной и практической задачи как производство высокотемпературных шнуров имеет важное хозяйственное значение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. High Temperature Insulation Market Analysis Report By Product (Ceramic Fiber, Insulating Firebrick, Calcium Silicate), By Application (Petrochemicals, Cement, Refractory), And Segment Forecasts, 2012 – 2020. <https://www.grandviewresearch.com/>.
2. Research and consulting company Market Watch. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https:// www.marketwatch.com](https://www.marketwatch.com). (дата обращения 04.01.2021).
3. URL: <http://multimedia.3m.com/mws/media/1327055O/3m-nextel-technical-reference-guide.pdf>.
4. Ceramic Fibers And Coating: Advanced Materials For The Twenty-First Century. Committee on Advanced Fibers for High-Temperature Ceramic Composites. National Academy Press. Washington, D.C. 1998. URL: <http://www.nap.edu>.
5. Schmücker M., Mechnich P. Modern Aspects of Ceramic Fiber Development Advances in Science and Technology Vol. 50 (2006) pp. 1 – 8. Online at URL: <http://www.scientific.net>.
6. Ceramic Matrix Composites. Fiber Reinforced Ceramics and their Applications Edited by Walter Krenkel 2008 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim Online available since 2006/Oct/01.
7. Bunsell A.R, Berger M.H. Fine diameter ceramic fibers/ A.R. Bunsell, M.H. Berger // J Eur Cer Soc, 2000, 20:2249 Ullmann's Fibers, Vol. 1 – 2, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008, 899 p.
8. Афанасов И.М. Высокотемпературные керамические материалы/ И.М. Афанасов, Б.И. Лазорняк. Учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные материалы». МГУ им. М.В. Ломоносова, научно-образовательный центр по нанотехнологиям – М.: 2010. – 51 с.
9. Асланова М.С. Микроструктура и свойства стеклянных волокон различных стеклообразных систем/ М.С. Асланова // Материалы первого Всесоюзного

симпозиума по стеклянному волокну, Москва, 7-9 февраля 1967 г. Часть I. С. 3 – 24.

10. *Paul A. Bingham. Fiberglass and Glass Technology/ Paul A. Bingham, etc. – Energy-Friendly Compositions and Applications. Editors: Frederick T. Wallenberger, Paul A. Bingham. Springer Science + Business Media, LLC– 2010. 474 p.*

11. URL : [https:// www.zircarzirconia.com/](https://www.zircarzirconia.com/).

12. *Костарева С.А. Исследование кинетики и механизма выщелачивания стеклянных волокон для получения высокотемпературоустойчивых материалов на их основе: диссертация ... кандидата технических наук : 05.00.00 / Костарева Светлана Иосифовна. – М., 1968. - 162 с.*

13. *Асланова М.С. Исследование кинетики выщелачивания натрийалюмоборосиликатных волокон и структурные особенности волокон после выщелачивания /М.С. Асланова, С.И. Костарева //Неорганические материалы. Т. VI. – 1970. – №8. – С. 1507 – 1512.*

14. *Асланова М.С. Стеклянные волокна / М.С. Асланова, Ю.И. Колесов, В.Е. Хазанов и др. Под ред. М.С. Аслановой – М.: Химия, 1979. – 256 с.*

15. *United States Patent US 3760049, Int. Cl. C04B 35/48 C04 B35/64. Method of dry formation of oxide refractory fibers / 3M Company/ /Date of Patent18.09.1973.*

16. *Handbook of tensile properties of textile and technical fibres / Edited by A. R. Bunsell. Published by Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute. Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Granta Park, Great Abington. Cambridge CB21 6AH, UK. URL: [https:// www.Woodheadpublishing.com](https://www.Woodheadpublishing.com).*

17. *Bunsell A.R. Oxide Fibers for High-Temperature Reinforcement and Insulation / A.R. Bunsell, J. Miner. Metals and Matter. Sci. v.57, 2, 2005 JOM.*

18. *Woźniak H., Refractory ceramic fibers, kinds, health effects after exposure / H. Woźniak, E. Wiecek. TLVs//Med Pr.1996; 47(4):393 – URL:<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>.*

19. URL: [https:// www.hiltex.nl](https://www.hiltex.nl).

20. Hight Temperature Dynamic Engine Seal Technology Development. NASA Technical Memorandum 105641. URL: <http://www.sti.nasa.gov>.
21. *United States Patent 4,937,212, Int. Cl. C04B 35/48/Zirconium oxide fibers and process for their preparation/ 3M Company/Date of Patent: Jun. 26, 1990.*
22. *United States Patent Re. 35,143, Int. Cl. C04B 35/48/ Zirconium oxide fibers and process for their preparation/ 3M Company/Reissued Date of Patent: Jan. 9, 1996.*
23. *Трофимов А.Н. Специальные неорганические волокна и наполнители/ А.Н. Трофимов / Наука и производство стекловолокна и стеклопластиков. Сборник статей. М.: ОАО «НПО Стеклопластик». 2006. – С. 100 – 118.*
24. *Трофимов Н.Н. Термостабильные оксидные волокна поликристаллической структуры /Н.Н. Трофимов // Пластические массы. – 1987. – №1. – С.53 – 54.*
25. *Доржиев Д.Б. Некоторые особенности получения поликристаллических волокон оксида алюминия /Д.Б. Доржиев, В.Н. Зуева, В.Е. Хазанов/ Обзорн. инф. Сер. «Стеклопластик». – М.: НИИТЭХИМ, 1988 – 54 с.*
26. *Мусияченко В.Д. Особенности фазовых превращений при получении керамических волокон из раствора на основе соединений оксида алюминия. Тугоплавкие волокна и мелкодисперсные наполнители /В.Д. Мусияченко, В.Н. Зуева, Д.Б. Доржиев /Сборник научных трудов. Под редакцией Хазанова В.Е. – М.: НПО «Стеклопластик», 1989. – С. 45 – 48.*
27. *Доржиев Д.Б. Особенности получения поликристаллических волокон оксида алюминия. Тугоплавкие волокна и мелкодисперсные наполнители /Д.Б. Доржиев, В.Н. Зуева, В.Е. Хазанов /Сборник научных трудов. Под редакцией В.Е. Хазанова– М.: НПО «Стеклопластик», 1989. – С. 37 – 41.*
28. *Трофимов Н.Н. Новые достижения в области полимерных материалов, армированных стеклянными и оксидными волокнами /Н.Н. Трофимов, М.З. Канович / ЖВХО. – 1989, Т. 24.– №5. – С. 447 – 453.*
29. *Доржиев Д.Б. Структурно-физические свойства поликристаллических алюмоциркониевых волокон. Высокотемпературные и сверхпроводящие*

- волокна на основе оксидных соединений/Д.Б. Доржиев, В.Е. Хазанов, В.Н. Зуева, В.В. Горбачев//Сборник статей. – М.: НИИТЭХИМ, – 1992. С. – 70 –72.
30. *Щетанов Б.В.* Механизм формирования структуры и разработка процессов получения поликристаллических волокон оксида алюминия для теплозащитных и теплоизоляционных материалов: диссертация ... доктора технических наук в форме науч. докл.: 05.02.01 /Щетанов Борис Владимирович. – М., 2000. – 70 с.
31. *Балинова Ю.А.* Непрерывные поликристаллические волокна оксида алюминия для композиционных материалов: автореф. дисс...канд. техн. наук/ ФГУП «ВИАМ». – М., 2012. –16 с.
32. *Зимичев А.М.* Исследование процесса экструзии непрерывных тугоплавких волокон /Зимичев А.М., Варрик Н.М., Сумин А.В. // Электронный научно-технический журнал «Труды «ВИАМ»». – 2017. – №1. URL:[http:// www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1055.pdf](http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1055.pdf)
33. *Медведев А. В.* Разработка и исследование технологии получения трощено-крученных нитей из оксида алюминия: 05.19.02 диссертация ... кандидата технических наук: 05.19.02 / Медведев Александр Викторович. – М., 2012. – 243 с.
34. *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.
35. *Медведев А.В.* Текстильные материалы из тугоплавких оксидов: перспективы, проблемы и решения /А.В. Медведев, К.Э. Разумеев // Все материалы. Энциклопедический справочник» с ежемесячным приложением «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». – 2016. – №11.– С. 9 – 15.
36. *Медведев А.В.* Микроструктура поверхности излома элементарных нитей из оксида алюминия / А.В. Медведев, К.Э. Разумеев // Стекло и керамика. – 2014. – № 2.– С. 13 – 15.
37. *Kimberly M. Johnson.* A study of the embrittlement of NEXTEL™ ceramic oxide fiber/ Kimberly M. Johnson / A Thesis Presented to the Graduate and Research

Committee of Lehigh University in Candidacy for the Degree of Master of Science In Chemistry. Lehigh University 04/25/2003. 189 p.

URL:<http://preserve.lehigh.edu/etd>.

38. *F. Deléglise*. Microstructure and mechanical properties of nanocomposite oxide system: the Nextel 720 fiber / F. Deléglise, M.H. Berger, A.R. Bunsell.

URL:<http://www.iccm-central.org>.

39. *Медведев А.В.* Исследование структуры поверхности отечественных и зарубежных нитей из оксида алюминия /А.В. Медведев //Вестник СПГУТД серия 1. Естественные и технические науки. – 2017. – №4. С. 92 – 97.

40. *Голубев Е. А.* Микро – и наноструктуры твердого минерального рентгеноаморфного вещества: дис. д-ра геол.- мин. наук /Голубев Евгений Александрович. – Сыктывкар – 2010. – 350 с.

41. *Яковлева Н.М.* Термически индуцированные фазовые превращения в нанопористых оксидах алюминия /Н.М. Яковлева, А.Н. Яковлев, Е.А. Чупахина //Конденсированные среды и межфазные границы. – 2006. т. 8. – №1. – С. 69 – 74.

42. *Варрик Н.К.* Получение непрерывных волокон на основе оксида алюминия с добавками оксидов кремния и циркония / Н.К. Варрик, А.М. Зимичев //Химические волокна. – 2019. – №6. – С. 22 – 29.

43. *Марголин В. И.* Физические основы микроэлектроники: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / В. И. Марголин, В. А. Жабрев, В. А. Тупик. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 400 с.

44. *Бердоносов С.С.* Новая изящно текстурированная форма аморфного оксида алюминия в виде полых микротрубок /С.С. Бердоносов, С.Б. Баронов, Ю.В. Кузьмичева, Д.Г. Бердоносова, И.В. Мелихов // Вестник Московского Университета. Серия 2. Химия. – 2002. Т. 43.– №1. – С. 64 – 67.

45. *Литвинович Б.Г.* Оптические свойства свободных анодных пленок оксида алюминия в зависимости от условий режимов формования / Б.Г. Литвинович //Доклады БГУИР. – 2008. – №2.– С. 87 – 91.

46. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: учебник /Е.С. Вентцель/ 12-е изд., – М.: ЮСТИЦИЯ, 2018. – 658 с.
47. *ГОСТ Р ИСО 5479-2002.* Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения – Введен 2002 – 07 – 01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2002. - IV, 25 с.: ил.; 21 см.
48. *Медведев А. В.* Исследование геометрических характеристик элементарных нитей 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.
49. *David M. Wilson.* Statistical tensile strength of Nextel™ 610 and Nextel™ 720 fibers / David M. Wilson//Journal of Materials Science. May 1997, Volume 32, Issue 10, p.p. 2535–2542.
50. *Перепелкин К.Е.* Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты / К.Е. Перепелкин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 380 с.
51. *ГОСТ 6943.1 – 2015.* Стекловолокно. Нити и ровинги. Метод определения линейной плотности. – Введ. 2016-06-01 – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2015. - 16 с.
52. *ГОСТ 6611.2-73.* Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве. – Введ. 1976– 01 – 01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1997– М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1997– 35 с.
53. *ГОСТ 6943.10-2015.* Материалы текстильные стеклянные. Метод определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве. – Введ. 2016 – 06 – 01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2015. - III, 7 с.; 29 см.
54. *ASTM D2256 / D2256M - 10e1.* Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method. URL:<https://www.astm.org/Standards/D2256>.
55. *Медведев А.В.* Исследование скорости растяжения на прочность нитей из тугоплавких волокон оксида алюминия /А.В. Медведев, А.Ф. Капитанов, А.В.

Курденкова, А.М. Зимичев // Известия Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013. – №1. – С. 163 – 165.

56. *Медведев А.В.* О влиянии параметров проведения испытаний, при растяжении до разрыва образцов нитей из оксида алюминия на достоверность результатов испытаний /А.В. Медведев, К.Э. Разумеев// Все материалы. Энциклопедический справочник. "Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам. – 2013. – №10. – С. 2 – 6.

57. *Медведев А.В.* Разработка методики определения коэффициента трения статического фрикционной пары комплексная нить из оксида алюминия-сталь /А.В. Медведев, К.Э. Разумеев //Все материалы. Энциклопедический справочник. «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». – 2015. – №3. – С. 2 – 6.

58. *Peter J. Blau.* Friction Science and Technology From Concepts to Applications / Peter J. Blau. © 2009 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2009. – 420 p.

59. *ASTM D3334-80.* Methods of Testing Fabrics Woven from Polyolefin Monofilaments. URL:<https://www.astm.org/Standards/D3334.htm>.

60. ГОСТ 9378-93. Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Общие технические условия. – Введ. 1997 – 01 – 01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1996. – III, 8 с.; 20 см.

61. *Новак А.В.* Шероховатость пленок аморфного, поликристаллического кремния и поликристаллического кремния с полусферическими зернами / А.В. Новак, В.Р. Новак //Письма в ЖТФ. – 2013, том 39, вып. 19. – С. 32 – 40.

62. *Авторское свидетельство SU 1615750 A1МПКG06T 7/00, G01N 21/00.* Способ определения степени однородности и изотропности структуры объектов / Ковбаса С.И., Пантелеев В.Г., Рамм К.С.; заявл. 26.01.89.; опубл. 23.12.90. Бюл. № 47. – 4 с.

63. *Медведев А.В.* Разработка методики измерения натяжения нитей из оксида алюминия / А.В. Медведев, К.Э. Разумеев //Все материалы.

Энциклопедический справочник. «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». – 2014. – № 9. – С. 6 – 11.

64. *Медведев А.В.* Анализ и оценка погрешности измерения натяжения нитей из оксида алюминия при перемотке и кручении на экспериментальном стенде / А.В. Медведев, К.Э. Разумеев // Химические волокна. – 2016. – №1. – С. 66 – 69.

65. *Мигушов. И.И.* Механика текстильной нити и ткани / Мигушов. И.И. – М.: Легкая индустрия, 1980. – 160 с.

66. *Щербаков В.П.* Прикладная механика нити / Щербаков В.П. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2001. – 301 с.

67. *Бархоткин Ю.К.* Новые технические и технологические возможности кольцевой прядильной машины / Бархоткин Ю.К. – Иваново. ОАО Издательство «Иваново», 2007. – 200 с.

68. *Авторское свидетельство SU 256567, МПКD01H 7/90(1995.01).* Однопроцессная крутильная машина / Вихрова А.Г. и др.; заявитель и обладатель Ленинградский НИИ текстильной промышленности; заявл. 11.03.1964; опубл. 24.06.1972. Бюллетень №20. – 2 с.

69. *Авторское свидетельство SU 208494, МПК D02G 3/28.* Способ изготовления крученой нити / Несслер А.М.; заявл. 20.03.1947; опубл. 29. 12.1967. Бюллетень №3. – 2 с.

70. *Соколов Г.В.* Вопросы теории кручения волокнистых материалов / Г.В. Соколов. – М.: Государственное научно-техническое издательство министерства легкой промышленности СССР, 1957. – 233 с.

71. *Авторское свидетельство SU1351194, МПК D02G 3/28.* Способ получения самокрученого волокнистого продукта / Кокиш М.И.; заявл. 21.02.1986; опубл. 30.10.1990. – 4 с.

72. *Гурьев А.Н.* Уточнение модели процесса самокручения / А.Н. Гурьев, К.Э. Разумеев, П.М. Мовшович // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2005. – №5. – С. 27– 29.

73. *Телицын А.А.* Моделирование модифицированного процесса самокручения/А.А. Телицын, И.А. Делекторская//материалы и технологии. – 2019. – №2. – С. 16 – 22.
74. *Мещерский И.В.* Задачи по теоретической механике. Учебное пособие. 50-е изд. / И.В. Мещерский; под редакцией В.А. Пальмова, Д.Р. Меркина. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 448 с.
75. *Корицкий К.И.* Инженерное проектирование текстильных материалов / К.И. Корицкий. – М.: Легкая индустрия, 1971. – 352 с.
76. *L.R.G. Treloar.* Geometry of multi-ply yarns / L.R.G. Treloar. //J. Textile Institute. – 1956. V.47. – № 6.– P. 348 – 368.
77. *Полушкин А.А.* К вопросу о кручении комплексных нитей / А.А. Полушкин, А.М. Чельшев, В.А. Чайкин, П.А. Дятлова//Технология текстильной промышленности. – 2006. – № 6. – С. 39-41.
78. *Калентьев В.А.* Центр тяжести тел. Методические указания по выполнению расчетно-графических работ /В.А. Калентьев, В.М. Калинин, Л.Т. Раевская, Н.И. Чащин. – Екатеринбург: Из-во Уральский государственный лесотехнический университет. – 2006. – 19 с.
79. *ГОСТ 28003-88.* Пороки текстильных нитей. Термины и определения – Введ. 1990 – 01 – 01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1989. – 5 с.: табл.; 22 см.
80. *ГОСТ OIML R 111-1-2009.* Гири классов E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 и M3. Ч. 1. Метрологические и технические требования. – Введ. 2012 – 07 – 01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2012. - V, 96 с.
81. *ГОСТ 7328-2001.* Меры массы общего назначения и образцовые. Технические условия. – Введ. 2002 – 07 – 01. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск, 2001, 11 с.
82. *Бархоткин Ю.К.* Натяжение нити на новом крутильном устройстве / Ю.К. Бархоткин // Известия высших учебных заведений Технология текстильной промышленности. – 2004. С. 28 – 31.

83. *Назарова М.В.* Исследование уровня повреждаемости комплексных нитей в технологическом процессе перематывания при формировании бобин сомкнутой намотки / М.В. Назарова // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – №6 – С. 102 – 104.
84. *Романов В.Ю.* Исследование повреждаемости нитей и пряжи различного волокнистого состава при перематывании на мотальной машине М-150-2 / В.Ю. Романов / IX Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные технологии в обучении и производстве» Том 1. – Камышин, 2014. – С. 99 – 102.
85. *РГМ 29-99.* Рекомендации по межгосударственной стандартизации Основные термины и определения. Вед. 2001 – 01 – 01. – Минск. Приняты Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 15 от 26 - 28 мая 1999 г.).
86. *Лапшин В.В.* Оценка погрешности устройства для измерения натяжения нити / В.В. Лапшин // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2011. – №3. – С. 17 – 20.
87. *Новицкий П.В.* Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
88. *Вакс В.Э.* Измерение натяжения нитей / В.Э. Вакс – М.: Легкая индустрия, 1966. – 243 с.
89. *Ли. В.Н., Медведев А.В., Разумеев К.Э.* Программа ChartReader для интерпретации графической информации / В.Н. Ли., А.В. Медведев, К.Э. Разумеев // Разработка научных и промышленное освоение инновационных технологий глубокой переработки шерсти и других видов натуральных и химических волокон. Сборник научных трудов. ОАО НПК «ЦНИИШЕРСТЬ», под редакцией Разумеева К.Э. – Одинцово, АНОО ВПО «ОГИ», – 2013 – С. 88 – 93.
90. *ГОСТ Р 8.563-96.* Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения. – Введ. 1997-07-01 – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2002. – III, 20 с.

91. Виноградов Ю.С. Математическая статистика и ее применение в текстильной и швейной / Виноградов Ю.С. – М.: Легкая индустрия, 1970. – 312 с.
92. Брон Л.С. Конструкция и наладка автоматических линий и специальных станков / Брон Л.С. и др. – М.: Высшая школа, 1996. – 360 с.
93. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное издание /С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: – Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
94. Прошков А.Ф. Расчет и проектирование машин для производства химических нитей и волокон. Учеб. Для вузов /А.Ф. Прошков. – М.: РИО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2001. – 497 с.
95. Гордеев В.А. Механика механизмов отпуска и натяжения основы ткацких станков / В.А. Гордеев. – М.: Легкая индустрия, 1965. – 227 с.
96. URL: <https://www.omega.com/en-us/accessories/protection/wire-sleeves/p/XC-XC4-SLEEVING>.
97. Медведев А.В. Структура крученых нитей из оксида алюминия /А.В. Медведев, К.Э. Разумеев // Все материалы. Энциклопедический справочник. «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». – 2018. – № 1.– С. 24-29.
98. Севостьянов А.Г. Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности / А.Г. Севостьянов. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2007. – 648 с.
99. Медведев А. В. Исследование структурной неровноты 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.
100. ГОСТ Р ИСО 16549-2008. Материалы текстильные. Метод определения неравномерности продуктов прядения. Емкостный метод. – Введ. 2010-01-01– М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2008. - III, 7 с.

101. *Рыклин Д.Б.* Оценка качества текстильных нитей и полуфабрикатов с использованием приборов USTERTESTER: монография /Д.Б. Рыклин, С.С. Медвецкий. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – 168 с.
102. *Медведев А.В.* Оптимизация круток трощёно-крученых тугоплавких нитей / А.В. Медведев, А.Ф. Капитанов, Е.И. Жариков, Ю.А. Ивахненко [и др.] // Химические волокна. – 2011 – №6. – С. 49 – 51.
103. *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.
104. *ГОСТ 28753.2-90* Нити текстильные. Метод определения неравновесности. – Введ. 1992 – 01 – 01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1990. – 6 с.
105. Flexible Mechanical Seal Concepts. National Energy Technology Laboratory, July 9, 2003. URL: <https://www.netl.doe.gov/>.
106. *Bruce M. Steinetz.* A Test Fixture for Measuring High-Temperature Hypersonic-Engine Seal Performance / Bruce M. Steinetz. – NASA Technical Memorandum 103658. Lewis Research Center Cleveland, Ohio. December, 1990. 20 p. URL: <http://www.sti.nasa.gov>.
107. *Bruce M. Steinetz.* High Temperature Dynamic Engine Seal Technology Development / Bruce M. Steinetz, Christopher DellaCorte, Michael Machinchick Rajakkannu Mutharasan, Guang-Wu Du, and all. – NASA Technical Memorandum 105641. Lewis Research Center E-6945/ Cleveland. 1992. 26 p. URL: <http://www.sti.nasa.gov>.
108. *Patent US 5,082,293A, Int. Cl. F16J 15/08.* High temperature, flexible fiber-preform seal. The United States of America as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C. Date of Patent. 21.01.1992.
109. *C. Della Corte.* Relative Sliding Durability of Candidate High Temperature Fiber Seal Materials / C. Della Corte and B. M. Steinetz. – NASA Technical

Memorandum 105806. Lewis Research Center Cleveland, Ohio 44135. URL: <http://www.sti.nasa.gov>.

110. *Christopher Della Corte*. Sliding Durability of Candidate Seal Fiber Materials in Hydrogen from 25 to 900 °C / Christopher Della Corte and Bruce M. Steinetz. – NASA Technical Memorandum 105939. Lewis Research Center. Cleveland, Ohio. 1993. URL: <http://www.sti.nasa.gov>.

111. *Frank K. Ko*. Development of Braided Rope Engine Seals / Frank K. Ko, Zhong Cai, and Rajakkannu Mutharasan, Bruce M. Steinetz. URL: https://www.researchgate.net/publication/24294865_Development_of_braided_rope_engine_seals.

112. *Patent US 6,511,076 B1, Int. Cl. F16L 17/06*. Fiber gasket and method of making same. Siemens Westinghouse Power Corporation. Date of Patent 28.01.2003.

113. *P.H. Dunlap, Jr.* Improved hypersonic engine seals / P.H. Dunlap, Jr. and B.M. Steintz, J.J. DeMange, S.C. Taylor. – NASA Technical Memorandum-2003-212531. 2003. 23 p. URL: <http://www.sti.nasa.gov>.

114. *H. Dunlap, Jr.* Toward an Improved Hypersonic Engine Seal / H. Dunlap, Jr. and Bruce M. Steinetz, Jeffrey J. DeMange, Shawn C. Taylor. – NASA/TM 2003-212531. Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, University of Toledo, Toledo, Ohio, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio. 2003. 24 p. URL: <http://www.sti.nasa.gov>.

115. *Ивенин С. В.* Быстрое термическое окисление карбида кремния / С. В. Ивенин, Ф. Ю. Крестьянсков // Огарев-online. – 2014. – №3. – Режим доступа: URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/bystroee-termicheskoe-okislenie-karbida-kremniya>

116. *Бакунов В.С.* Высокотемпературная ползучесть огнеупорной керамики. Кинетика и влияния условий испытаний / В.С. Бакунов // Огнеупоры. – 1994. – №6. – С. 2 – 8.

117. URL: <https://www.technomixcenter.by>.

118. *Щетанов Б.В.* Теплозащитные материалы / Б.В. Щетанов, Ю.А. Ивахненко, В.Г. Бабашов // Электронный научно-технический журнал «Труды

«ВИАМ»». – 2009. – №5. URL: <https://viam.ru/public/files/2009/2009-205395.pdf>.

119. *Sabahat Nawaz*. Braided cords in flexible composites for aerospace and automotive applications / Sabahat Nawaz /Textile Composites Group School of Materials The University of Manchester 2013. 170 p.

120. URL: <http://tex-inter.ru/veretena>.

121. *Медведев А.В.* Шнур из крученых нитей оксида алюминия отечественного производства / Медведев А.В. // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2020 №2, том 48. – С. 59 – 63.

ТАБЛИЦЫ

Табл. 1	Цена за один килограмм крученых нитей из оксида алюминия производства 3M Company	21
Табл. 2	Химический состав и свойства нитей, получаемых из расплава	24
Табл. 3	Свойства тканей из тугоплавких оксидов металлов производства Zircar Zirconia Inc.	24
Табл. 4	Свойства алюмокремнеземных нитей ВНИИСПВ	25
Табл. 5	Химический состав и свойства нитей из оксида алюминия зарубежного производства	27
Табл. 6	Свойства комплексных нитей 3M™ Nextel™ 3M Company	27
Табл. 7	Свойства крученых нитей 3M™ Nextel™ 3M Company	28
Табл. 8	Свойства комплексных нитей ALF Hiltex Technical Textiles	29
Табл. 9	Свойства крученых нитей ALF Hiltex Technical Textiles	29
Табл. 10	Химический состав и свойства нитей из оксида алюминия, разработанных в АО «НПО Стеклопластик»	31
Табл. 11	Химический состав и свойства нитей из оксида алюминия, разработанных в АО «НПО Стеклопластик» в 1987-1992 гг	32
Табл. 12	Химический состав и свойства нитей из оксида алюминия, разрабатываемые «ВИАМ»	33
Табл. 13	Частоты поглощения образцов оксида алюминия	44
Табл. 14	Параметры структуры поверхности элементарных нитей	46
Табл. 15	Параметры и термины структуры поверхности элементарных нитей из оксида алюминия	48
Табл. 16	Результаты измерения диаметра элементарных нитей	51
Табл. 17	Результаты вычисления моментов второго, третьего, четвертого порядков и статистических критериев $\sqrt{b_1}$ и b_2	53

Табл. 18	Разрывная нагрузка, диаметр и прочность элементарных нитей зарубежного и отечественного производства	54
Табл. 19	Коэффициенты регрессии A_Y и B_Y для элементарных нитей из оксида алюминия зарубежного и отечественного производства	55
Табл. 20	Результаты измерений поперечного размера комплексных нити	58
Табл. 21	Результаты измерений линейной плотности комплексных нитей	59
Табл. 22	Скорость перемещения зажима разрывной машины и удельная разрывная нагрузка комплексных нитей	60
Табл. 23	Зажимная длина образцов и удельная разрывная нагрузка комплексных нитей	62
Табл. 24	Зажимная длина образцов и удлинение комплексных нитей	62
Табл. 25	Коэффициенты регрессии A_Y и B_Y для комплексных нитей из оксида алюминия зарубежного и отечественного производства	64
Табл. 26	Коэффициент трения покоя пары «комплексная нить – сталь»	65
Табл. 27	Стабильность коэффициента трения покоя пары «комплексная нить – сталь»	65
Табл. 28	Коэффициент трения покоя пары «крученая нить – сталь»	66
Табл. 29	Стабильность коэффициента трения покоя пары «крученая нить – сталь»	66
Табл. 30	Коэффициент трения покоя пары «комплексная нить – комплексная нить» под нагрузкой	67
Табл. 31	Коэффициент трения покоя пары «крученая нить – крученая нить» под нагрузкой	67

Табл. 32	Коэффициенты уравнения регрессии, значения коэффициента детерминации, относительной средней квадратической ошибки	68
Табл. 33	Коэффициент трения покоя и стабильность коэффициента трения покоя комплексных нитей и контрпар с субмикрошероховатыми поверхностями	71
Табл. 34	Коэффициент трения движения крученой нити из оксида алюминия	73
Табл. 35	Изменение параметров однокруточной углеродно-кварцевой нити с круткой 127 кручений/м в процессе формирования	85
Табл. 36	Координаты геометрического центра стренг	93
Табл. 37	Перемещение вершины треугольника кручения вследствие неровноты натяжения стренг	96
Табл. 38	Погрешность измерения натяжения, зависящая от изменения поперечного размера нити	102
Табл. 39	Максимальная величина составляющих систематической погрешности измерения натяжения нити	103
Табл. 40	Натяжение нити при сматывании с входных бобин массой 0,075 кг и 0,015 кг	106
Табл. 41	Расчетное и фактическое натяжение нити в момент пуска электродвигателя привода намотки	110
Табл. 42	Марка наполненного шнура, марка, линейная плотность, разрывная нагрузка крученых нитей зарубежного производства	112
Табл. 43	Структура и свойства крученых нитей 3M™ Nextel™ 312 3M Company	113
Табл. 44	Структура и свойства крученых нитей ALF Hiltex Technical Textiles	113

Табл. 45	Результаты расчета оптимальной линейной плотности комплексных нитей отечественного производства	115
Табл. 46	Параметры заправки универсального станда для выработки одиночных крученых нитей экспериментальной партии	120
Табл. 47	План кручения для выработки одиночных крученых нитей экспериментальной партии	120
Табл. 48	Параметры неровноты и характеристики пороков одиночных крученых нитей при установленном пороге чувствительности	122
Табл. 49	Разрывная нагрузка, количество испытаний, скорость перемещения зажима разрывной машины при испытаниях одиночных крученых нитей	125
Табл. 50	Разрывная нагрузка, количество испытаний, скорость перемещения зажима разрывной машины при испытаниях одиночных крученых нитей для определения достаточности количества испытаний	126
Табл. 51	Результаты экспериментов по оптимизации крутки	128
Табл. 52	Исходные данные для расчета и расчетная разрывная нагрузка одиночной крученой нити 3М TM Nextel TM 312	130
Табл. 53	Исходные данные для расчета, расчетная и фактическая разрывная нагрузка крученых нитей 3М TM Nextel TM 312	131
Табл. 54	Исходные данные для расчета, расчетная разрывная и удельная разрывная нагрузка одиночных крученых нитей	132
Табл. 55	Исходные данные для расчета, расчетная разрывная и удельная разрывная нагрузки однокруточных и нитей	132
Табл. 56	Характеристика сырья, материалов и полуфабрикатов	134
Табл. 57	Параметры заправки универсального станда для выработки крученых нитей экспериментальной партии	134

Табл. 58	План кручения для выработки крученых нитей экспериментальной партии	134
Табл. 59	Результаты испытаний крученых нитей экспериментальной партии	135
Табл. 60	Разрывная нагрузка, удельная разрывная нагрузка, удлинение, неравновесность крученых нитей из оксида алюминия опытной партии	137
Табл. 61	Марка крученой нити, число стренг, коэффициент вариации по разрывной нагрузке и удлинению крученых нитей	137
Табл. 62	Коэффициент корреляции между плотностью и разрывной нагрузкой крученых нитей	138
Табл. 63	Расчетные и табличные значения критерия достоверности	139
Табл. 64	Расчетная и фактическая разрывная нагрузка крученых нитей опытной партии	139
Табл. 65	Расчетная и фактическая разрывная нагрузка крученых нитей, выработанных по способу совместной подачи нитей в зону формирования	140
Табл. 66	Параметры и свойства наполненных шнуров с оплеткой и наполнителем из пряжи на основе силиката алюминия производства «ТехноМиксЦентр»	146
Табл. 67	Параметры и свойства наполненных шнуров с наполнителем из дискретных волокон оксида алюминия производства «ВИАМ»	147
Табл. 68	Технологические параметры выработки наполненных шнуров экспериментальной партии	148
Табл. 69	Параметры и свойства наполненных шнуров экспериментальной партии	149
Табл. 70	Параметры и свойства шнура марки ШОАН (К) – 2,5 из крученых нитей оксида алюминия	153

ИЛЛЮСТРАЦИИ

Рис. 1	Температура длительной эксплуатации материалов для высокотемпературных наполненных шнуров	17
Рис. 2	Номенклатура текстильных материалов, производимых 3M Company	20
Рис. 3	Технологическая схема получения комплексных нитей из оксида алюминия	26
Рис. 4	Изменение предела прочности нитей из оксида алюминия от температуры	28
Рис. 5	Типичные поверхности разрушения элементарных нитей из оксида алюминия	35
Рис. 6	Дефекты структуры элементарной нити и линии Людерса – Чернова	36
Рис. 7	Внутренние дефекты и дефекты поверхности элементарных нитей	37
Рис. 8	Оболочка и сердцевина элементарных нитей из оксида алюминия	38
Рис. 9	Оболочка и сердцевина элементарных нитей 3M™ Nextel™ 312 (а) и 3M™ Nextel™ 720 (б)	39
Рис. 10	Слоистая структура сердцевины элементарной нити (а) и структурный элемент поверхности разрушения (б)	40
Рис. 11	Регулярная структура на поверхности опала (а) и элементарной нити из оксида алюминия (б)	41
Рис. 12	Гистограмма плотности распределения пиков на поверхности элементарных нитей из оксида алюминия «ВИАМ» (а) и 3M™ Nextel 720™ 3M Company (б)	42

Рис. 13	Рентгенограммы нитей из оксида алюминия отечественного производства	43
Рис. 14	ИК-спектр в координатах «Т пропускания в % – , см ⁻¹ » нитей из оксида алюминия отечественного производства	44
Рис. 15	3D СЗМ – изображение поверхности образцов элементарных нитей: образец №1 – (а), образца №2 – (б), образец №3 – (в)	46
Рис. 16	Профиль шероховатой поверхности, гистограмма распределения высоты элементов профиля $Z(t)$ и опорная кривая профиля поверхности элементарной нити из оксида алюминия	47
Рис. 17	Топографическая характеристика поверхности ограниченного масштаба, гистограмма распределения высоты элементов профиля $Z(t)$ на поверхности ограниченного масштаба и опорная кривая профиля расположения высоты элементов профиля $Z(t)$ с координатами x и y на поверхности элементарной нити из оксида алюминия	48
Рис. 18	Процесс измерения диаметра элементарной нити	50
Рис. 19	Гистограммы распределения по диаметру элементарных нитей в комплексных нитях	51
Рис. 20	Зависимость предела прочности от диаметра элементарных нитей из оксида алюминия 3M TM Nextel TM 720 3M Company (а) и «ВИАМ» (б) в логарифмических координатах	56
Рис. 21	Зависимость прочности от диаметра отечественных элементарных нитей	57
Рис. 22	Зависимость удельной разрывной нагрузки от зажимной длины образцов комплексных нитей из оксида алюминия 3M TM Nextel TM 720 3M Company (а) и «ВИАМ» (б) в логарифмических координатах	63

Рис. 23	СЗМ-изображение участка элементарной нити из оксида алюминия	68
Рис. 24	Схема заправки нити на стенде для определения коэффициента трения движения	72
Рис. 25	Зависимость коэффициента трения движения от скорости скольжения нити по стальному цилиндрическому телу трения	73
Рис. 26	Схематическое изображение экспериментального стенда в варианте кручения одиночной нити (а), однокруточных и многокруточных нитей в два сложения (б)	76
Рис. 27	Фотография (а), изображение универсального стенда в варианте кручения одиночной нити (б), в варианте кручения однокруточных и многокруточных нитей в два сложения (в)	77
Рис. 28	Бобинодержатель с устройством натяжения нитей (а) и схема сматывания нити с входной бобины (б)	78
Рис. 29	Схематическое изображение способа отдельной подачи нитей в зону формирования (а), узел формирования и порог крутки (б)	80
Рис. 30	Схематичное изображение кручения нитей по способу А.М. Несслера	81
Рис. 31	Число оборотов крутильной платформы, необходимых для завершения формирования однокруточных нитей с круткой 45 кручений/м (а) и 127 кручений/м (б)	82
Рис. 32	Схема силового взаимодействия двух стренг на пороге крутки	83
Рис. 33	Схема силового взаимодействия двух стренг за порогом крутки	84
Рис. 34	Изменение диаметра однокруточной нити в процессе формирования	85

Рис. 35	Изменение угла наклона осей стренг к оси однокруточной нити в два сложения в процессе формирования с первого по седьмой (а) и с седьмого по двенадцатый оборот (б) крутильной платформы	86
Рис. 36	Схематическое изображение силового взаимодействия стренг с втулкой узла формирования	87
Рис. 37	Схема к определению момента инерции нити при сходе с бобины	90
Рис. 38	Условное изображение поперечного сечения крученой нити в два сложения без учета смятия стренг (а) и с учетом смятия стренг (б)	91
Рис. 39	Определение геометрического центра кругового сектора	92
Рис. 40	Изменение плотности однокруточной углеродно-кварцевой нити в два сложения в процессе формирования	93
Рис. 41	Схематическое изображение крученой нити оптимальной структуры	94
Рис. 42	Схематическое изображение порока штопорная крутка	95
Рис. 43	Схематическое изображение образования порока штопорная крутка вследствие неровноты натяжения стренг	95
Рис. 44	Зависимость перемещения вершины треугольника кручения от неровноты натяжения стренг	96
Рис. 45	Схема действия сил, приложенных к воспринимающему нитепроводнику тестера натяжения	99
Рис. 46	Схема измерения натяжения нити при сматывании с входной бобины	104
Рис. 47	Силы и моменты, действующие на вращающуюся бобину	109
Рис. 48	Осциллограмма выходного напряжения тестера натяжения, скорость нити 7,8 м/мин, масса катушки 0,15 кг	111

Рис. 49	Зависимость удельной разрывной нагрузки от удельного натяжения при кручении одиночных нитей	117
Рис. 50	Зависимость удельной разрывной нагрузки от крутки	119
Рис. 51	Зависимость диаметра крученой нити от крутки	121
Рис. 52	Диаграмма масс одиночных крученых нитей с круткой 20 кручений/м (а) , 40 кручений/м (б), 60 кручений/м (в), 80 кручений/м (г)	123
Рис. 53	Концепция однослойных и многослойных шнуров наполненных	145
Рис. 54	Структура наполненного шнура биаксильной структуры	147
Рис. 55	Зависимость плотности от диаметра наполненного шнура	149
Рис. 56	Зависимость коэффициента покрытия от диаметра наполненного шнура	150
Рис. 57	Плетельные веретена ВПЛ-2 (а), ВПР-125(б) и доработанное веретено ВПР-125 (в)	152
Рис. 58	Веретена ВПР-125 установленные после доработки на машине ШП 16-3	152
Рис. 59	Фотография шнура марки ШОАН (К) – 2,5 из крученых нитей оксида алюминия	153
Рис. 60	Шнур ШОАН(К) – 2,5, изогнутый на цилиндре диаметром 40 мм	154

Временные технические условия.
Нити крученые из оксида алюминия.
(ВТУ – 2020)
ПРИЛОЖЕНИЕ №1

Настоящие временные технические условия (ВТУ-2020) распространяются на крученые нити из оксида алюминия, предназначенные для высокотемпературных наполненных шнуров. Обозначение марки крученой нити состоит из 4-х частей, разделенных дефисом:

первая часть: ОА – нити из оксида алюминия;

вторая часть: 13 – средний диаметр элементарных нитей, мкм;

третья часть: $30 \times 1 \times 4 \times 2$ – линейная плотность комплексной нити и число сложений при первом, втором и третьем кручении разделенными знаком « $\times$ »;

четвертая часть: 240 – результирующая линейная плотность, текс.

Пример обозначений крученой нити, имеющей средний диаметр элементарных нитей 13 мкм, линейную плотность комплексных нитей 30 ± 2 текс, число сложений при первом кручении – 1, при втором кручении – 4, при третьем кручении – 2, результирующая линейная плотность 240 текс: ОА–13– $30 \times 1 \times 4 \times 2$ –240.

Условное обозначение структуры крученой нити марки ОА–13– $30 \times 1 \times 4 \times 2$ –240 по ГОСТ 16736-2002. Нити текстильные. Обозначения структуры:

30 текс f 80 Z40 $\times$ 4S36 $\times$ 2Z28 R 240 текс.

1. Технические требования

1.1. Крученые нити должны соответствовать требованиям настоящих технических условий и вырабатываться по «Временному технологическому регламенту №1 на комплекс научно-исследовательских работ по выработке опытной партии крученых нитей из оксида алюминия» (ВТР №1 – 2020) (Приложение №3).

1.2. Крученые нити вырабатываются из комплексных нитей оксида алюминия на универсальном крутильно – перематывающем стенде.

1.3. Свойства комплексных нитей оксида алюминия указаны в таблице 1.
Таблица 1.

Марка комплексной нити	Регламентируемые показатели с допускаемыми отклонениями
ОА–11–20	1. Средний диаметр элементарных нитей 11 мкм 2. Линейная плотность 20 ± 2 текс 3. Разрывная нагрузка, не менее 1 Н
ОА–12–25	1. Средний диаметр элементарных нитей 12 мкм 2. Линейная плотность 25 ± 2 текс 3. Разрывная нагрузка, не менее 1 Н
ОА–13–30	1. Средний диаметр элементарных нитей 13 мкм 2. Линейная плотность 30 ± 2 текс 3. Разрывная нагрузка, не менее 1 Н

1.4. Марка и условное обозначение структуры крученых нитей указаны в таблице 2.

Таблица 2

Марка крученой нити	Условное обозначение структуры крученой нити
ОА–11–20×1×3–60	20 текс f 80 Z40 x 3S36 R 60 текс
ОА–11–20×1×3×2–120	20 текс f 80 Z40 x 3S36 x 2Z28 R 120 текс
ОА–12–25×1×2–50	25текс f 80 Z40 x 2S36 R 50 текс
ОА–12–25×1×2×2–100	25 текс f 80 Z40 x 2S36 x 2Z28 R 100 текс
ОА–13–30×1×4–120	30текс f 80 Z40 x 4S36 R 120 текс
ОА–13–30×1×4×2–240	30 текс f 80 Z40 x 4S36 x 2Z28 R 240 текс

1.5. Свойства крученых нитей указаны в таблице 3.

Таблица 3.

Марка крученой нити	Номинальная линейная плотность, текс	Отклонение от номинальной линейной плотности, текс	Разрывная нагрузка не менее, Н	Неравновесность крученых нитей не более, витков/м
ОА–11– 20×1×3–60	60	±6	6,0	7
ОА–11– 20×1×3×2–120	120	±12	18,0	7
ОА–12– 25×1×2–50	50	±4	3,5	7
ОА–12– 25×1×2×2–100	100	±8	11,5	7
ОА–13– 30×1×4–120	120	±8	12,0	6
ОА–13– 30×1×4×2–240	240	±16	20,0	6

1.6. Допустимые пороки крученых нитей указаны в таблице 4.

Таблица 4.

Наименование порока	Размер порока	Количество пороков на 1 м, не более
Утоненные участки	не более 100 мм	3
Утолщенные участки	не более 100 мм	9
Непсы	не более 10 мм	2

1.7. Пороки, не предусмотренные по наименованию и количество пороков, превышающие указанное в таблице 4, не допускаются.

1.8. Упаковка и маркировка. Каждый съём бобины с нитью устанавливается в палету и сопровождается ярлыком с указанием: марки нити, величины крутки, веса нетто.

2. Требования безопасности.

2.1. При производстве крученых нитей в воздушную среду производственных помещений выделяется пыль. Пыль раздражающе действует на слизистые оболочки верхних дыхательных путей и кожный покров работающих, вызывая зуд кожи. Химический состав выброса, ПДК и класс опасности указаны в таблице 5.

Таблица 5.

Наименования выделяющихся вредных веществ	Состав выброса	ПДК*, мг/м ³		Класс опасности по ГОСТ 12.1.007-76 ГОСТ 12.1.005-88
		в воздухе рабочей зоны (среднесменная)	в атмосферном воздухе	
Пыль	Al ₂ O ₃ – 85% SiO ₂ – 15%	– / 6	0,06 ОБУВ	3
*В числителе максимальная разовая ПДК, в знаменателе среднесменная				

2.2. Для поддержания в воздухе рабочей зоны концентрации пыли, не превышающей ПДК, производственные помещения должны быть оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией, а места выделения пыли местными отсосами.

2.3. Общие требования к охране окружающей среды должны соответствовать ГОСТ 17.2.3.002.

3. Методы испытаний.

3.1. Линейная плотность крученых нитей определяется по ГОСТ 6943.1 - 2015.

3.2. Разрывная нагрузка и относительное удлинение при растяжении до разрыва определяется по ГОСТ 6611.2-73. Зажимная длина образцов 250 мм. Скорость перемещения зажима разрывной машины 10 мм/мин.

3.3. Неравновесность определяется по ГОСТ 28753.2-90.

3.4. Массовая доля влаги и веществ, удаляемых при прокаливании, определяется по ГОСТ 6943.8-2015.

Временный технологический регламент
на комплекс научно-исследовательских работ
по выработке опытной партии крученых нитей из оксида алюминия
(ВТР №1 – 2020)
ПРИЛОЖЕНИЕ №2

№ раздела	Наименование раздела	№ стр.
1	Общая характеристика производства. Назначение технологического процесса	185
2	Характеристика производимой продукции	186
3	Характеристика сырья, материалов, полуфабрикатов и вспомогательных материалов	186
4	Описание технологического процесса. Система управления исполнительными механизмами универсального станда	187
5	Контроль производства и управления технологическим процессом	190
6	Охрана окружающей среды	191
7	Безопасная эксплуатация производства	192

Раздел 1	Общая характеристика производства. Назначение технологического процесса.	
1.1	Полное наименование производства	Производство крученых нитей марок: ОА-11-20×1×3-60; ОА-11-20×1×3×2-120 ОА-12-25×1×2-50; ОА-12-25×1×2×2-100 ОА-13-30×1×4-120; ОА-13-30×1×4×2-240
1.2	Год ввода в эксплуатацию	Не устанавливается для опытного производства
1.3	Мощность производства	Не устанавливается для опытного производства
1.4	Разработчик технологического процесса	Медведев А.В.
1.5	Метод производства	Периодический
1.6	Стадии технологического процесса	
1.6.1		Первая крутка нитей
1.6.2		Вторая крутка нитей одновременно с трощением
1.6.3		Третья крутка нитей одновременно с трощением
1.7	Назначение технологического процесса	Технологический процесс производства крученых нитей предназначен для выработки крученых нитей заданной структуры

Раздел 2	Характеристика выпускаемой продукции			
2.1	Наименование продукции: керамическая крученая нить			
2.2	Основные свойства			
1	2	3	4	5
Марка нити	Линейная плотность, текс	Отклонение от линейной плотности, текс	Разрывная нагрузка не менее, Н	Неравновесность нитей не более, витков/м
ОА-11-20×1×3-60	60	±6	6,0	7
ОА-11-20×1×3×2-120	120	±12	18,0	7
ОА-12-25×1×2-50	50	±4	3,5	7
ОА-12-25×1×2×2-100	100	±8	11,5	7
ОА-13-30×1×4-120	120	±8	12,0	6
ОА-13-30×1×4×2-240	240	±16	20,0	6

Раздел 3	Характеристика сырья, материалов и полуфабрикатов	
	Наименование сырья, материалов, полуфабрикатов и энергоресурсов	Регламентируемые показатели с допускаемыми отклонениями
3.1	Комплексная нить оксида алюминия марки ОА-11-20	1. Средний диаметр элементарных нитей 11 мкм 2. Линейная плотность 20±2 текс 3. Разрывная нагрузка, не менее 1 Н
3.2	Комплексная нить оксида алюминия марки ОА-12-25	1. Средний диаметр элементарных нитей 12 мкм 2. Линейная плотность 25±2 текс 3. Разрывная нагрузка, не менее 1 Н
3.3	Комплексная нить оксида алюминия марки ОА-13-30	1. Средний диаметр элементарных нитей 13 мкм 2. Линейная плотность 30±2 текс 3. Разрывная нагрузка, не менее 1 Н
3.4	Замасливатель АВИБ – Б, UN 3082, ТУ 2484-054-17965-829-2005	1. Водный раствор, концентрация 8% (масс.)

Раздел 4	Описание технологического процесса
----------	------------------------------------

4.1. Первое кручение.

Комплексная нить на входной бобине устанавливаются на бобинодержатель крутильной платформы №1 в варианте кручения одиночной нити. Нить необходимой длины сматывается вручную с входной бобины, проводится через узел формирования и конец нити приклеивается малярным скотчем на выходной бобине. Направление крутки правое – Z.

Выработку крученых нитей проводить соответствие с параметрами заправки указанных в таблице 1 и планом кручения указанным в таблице 2.

Таблица 1.

Номер перехода	Марка крученой нити	Линейная плотность, текс	Число кручений на 1 м
1	ОА–11–20 ×1–20	20	40
1	ОА–12–25×1–25	25	40
1	ОА–13–30×1–30	30	40

Таблица 2.

Номер перехода	Марка крученой нити	Натяжение, сН	Скорость намотки на выходную бобину, м/мин	Частота вращения крутильной платформы, мин ⁻¹
1	ОА–11–20 ×1–20	20	8	320
1	ОА–12–25×1–25	20	8	320
1	ОА–13–30×1–30	20	8	320

Каждый сьем крученой нити устанавливается в палету и сопровождается ярлыком с указанием:

- марки нити;
- величины крутки;
- веса нетто.

4.2. Второе кручение.

Одиночные крученые нити на входных бобинах устанавливаются на бобинодержатели крутильной платформы №1 в варианте кручения нитей с числом сложений согласно параметрам заправки. Нити сматывается вручную с входных бобин, проводятся через узел формирования и концы нитей приклеиваются малярным скотчем на выходной бобине. Трошение и кручение на универсальном стенде осуществляется в одном процессе. Направление крутки левое – S. Выработку крученых нитей проводить в соответствии с

параметрами заправки, указанных в таблице 3 и планом кручения, указанном в таблице 4.

Таблица 3

Номер перехода	Марка крученой нити	Линейная плотность, текс	Число сложений, шт.	Число кручений на 1 м
2	ОА–11–20×1×3–60	60	3	36
2	ОА–12–25×1×2–50	50	2	36
2	ОА–13–30×1×4–120	120	4	36

Таблица 4

Номер перехода	Марка крученой нити	Натяжение, сН	Скорость намотки на выходную бобину, м/мин	Частота вращения крутильной платформы, мин ⁻¹
2	ОА–11–20×1×3–60	60	10	360
2	ОА–12–25×1×2–50	40	10	360
2	ОА–13–30×1×4–120	80	10	360

Каждый сьем крученой нити устанавливается в палету и сопровождается ярлыком с указанием:

- марки нити;
- величины крутки;
- веса нетто.

4.3. Третье кручение.

Однокруточные нити на входных бобинах, устанавливаются на бобинодержатели крутильной платформы №1 в варианте кручения нитей с числом сложений согласно параметрам заправки. Нити сматывается вручную с входных бобин, проводятся через узел формирования и приклеиваются малярным скотчем на выходной бобине. Трошение и кручение на универсальном стенде осуществляется в одном процессе. Направление крутки правое – Z. Выработку крученых нитей проводить соответствие с параметрами заправки указанных в таблице 5 и планом кручения, указанным в таблице 6.

Таблица 5

Номер перехода	Марка крученной нити	Линейная плотность, текс	Число сложений, шт.	Число кручений на 1 м
3	ОА–11–20×1×3×2–120	120	2	28
3	ОА–12–25×1×2×2–100	100	2	28
3	ОА–13–30×1×4×2–240	240	2	28

Таблица 6

Номер перехода	Марка крученной нити	Натяжение, сН	Скорость намотки на выходную бобину, м/мин	Частота вращения крутильной платформы, мин ⁻¹
3	ОА–11–20×1×3×2–120	120	20	560
3	ОА–12–25×1×2×2–100	80	20	560
3	ОА–13–30×1×4×2–240	160	20	560

Каждый сьем крученной нити устанавливается в палету и сопровождается ярлыком с указанием:

- марки нити;
- величины крутки;
- веса нетто.

4.4. Система управления исполнительными механизмами стенда.

Гибкое программируемое управление частотой вращения крутильной платформы и мотальной головки осуществляется векторными преобразователями частоты со встроенным PLC-контроллером модели E2-8300-SP5L. Программное обеспечение для управления преобразователем частоты и программирования встроенного программируемого логического контроллера (ПЛК) 8300 Drive Link. Управление и контроль состояния преобразователя частоты по последовательной линии связи RS-232/RS-485 от персонального компьютера (ПК) с использованием протокола MODBUS. Контроль частоты вращения крутильной платформы и мотальной головки осуществлялся тахометром часовым ТЧ-10-Р. Допускаемая погрешность измерения частоты вращения $\pm 2\%$, линейной скорости $\pm 2\%$.

Раздел 5	Контроль производства и управления технологическим процессом			
Наименование стадии процесса	Контролируемый параметр	Частота и способ контроля	Нормы и технические показатели	Методы испытаний, способы контроля
1	2	3	4	
1.Первое кручение	1. Состояние нитепроводящих деталей	Непосредственно перед началом работ, но не реже одного раза в сутки	Поверхность нитепроводящих деталей и замасливающего диска должна быть чистой. не допускаются следы	Визуально
2. Второе кручение	2. Состояние замасливающего диска	Непосредственно перед началом работ, но не реже одного раза в сутки	допускаются следы замасливателя и пыли	Визуально
	3. Частота вращения крутильной платформы №1	Непосредственно перед началом работ, но не реже одного раза в сутки	Допускаемая погрешность измерения частоты вращения $\pm 2\%$, линейной скорости $\pm 2\%$.	Тахометр часовой ТЧ-10-Р
3. Третье кручение	4. Линейная скорость намотки нити на выходную бобину	Непосредственно перед началом работ, но не реже одного раза в сутки	Допускаемая погрешность измерения натяжения в пределах $\pm 1\%$.	Тестер натяжения ТНН-100
	5. Натяжение нитей	Непосредственно перед началом работ, но не реже одного раза в сутки		

Раздел 6	Охрана окружающей среды			
Наименования выделяющихся вредных веществ	Состав выброса	ПДК*, мг/м ³		Класс опасности по ГОСТ 12.1.007-76 ГОСТ 12.1.005-88
		в воздухе рабочей зоны (среднесменная)	в атмосферном воздухе	
Пыль	Al ₂ O ₃ – 85% SiO ₂ – 15%	– /6	0,06 ОБУВ	3
*В числителе максимальная разовая ПДК, в знаменателе среднесменная				

6.2. Меры безопасности при эксплуатации производства				
6.2.1. Взрывоопасная и пожарная опасность, санитарная характеристика производственных зданий, помещений, зон и наружных установок				
Наименование стадии технологического процесса	Профессия работающего на стадии	Средства инд. защиты работающего	Наименование и номер НТД	Срок службы
1. Первое кручение 2. Второе кручение 3. Третье кручение	Оператор универсального стенда	Респиратор У-2К	ТУ6-16-2267-76	1 смена

Раздел 7	Безопасная эксплуатация производства			
7.1. Характеристика опасностей производства				
7.1.1. Пожарные и токсичные свойства сырья, полуфабрикатов, готовой продукции и отходов производства				
Наименование сырья, полуфабрикатов, готовой продукции и отходов производства	Плотность паров по воздуху	Растворимость в воде	Возможность воспламенения или взрыва при воздействии (да, нет)	
			Воды	Кислорода
1. Комплексная и крученая нить оксида алюминия	нет	нерастворимы	нет	нет
2. Замасливатель АВИБ-Б	нет	растворим	нет	нет

7.1.2. Характеристика токсичности		
Наименование сырья, полуфабрикатов, готовой продукции и отходов производства	Характеристика токсичности (воздействие на организм человека)	Литература
1. Комплексная и крученая нить оксида алюминия	Относится к материалам фиброгенного действия. Пыль раздражает кожный покров, слизистые оболочки верхних дыхательных путей, вызывает зуд кожи, сыпь	Вредные вещества в промышленности, Том 3, стр. 289. ГН 2.2.5.1313-03 ГН 2.1.6.1339 – ГН2.1.6.1339-
2. Замасливатель АВИБ-Б	Не токсичен	не содержаться

7.1.3. Взрывоопасная и пожарная опасность, санитарная характеристика производственных зданий, помещений, зон и наружных установок					
Наименование помещений, наружных установок	Категория взрывопожарной и пожарной опасности помещений и зданий (НПБ-105-95)	Классификация опасных зон внутри и вне помещений для выбора и установки электрооборудования по ПУЭ			Средства пожаротушения
		Класс взрывоопасности	Категория и группа взрывоопасных смесей	Наименование веществ, определяющих категорию взрывоопасных смесей	
Крутильный участок	Д	Не классифицируется		нет	I б 1. Огнетушитель кислотный ОУ-5;34-01-У2 Ту 22-150-128-89 2. Огнетушитель углекислотный ОУ-8

Временный технологический регламент
на комплекс научно-исследовательских работ по выработке наполненных
шнуров из крученных нитей оксида алюминия
(ВТР №2 – 2020)
ПРИЛОЖЕНИЕ №3

№ раздела	Наименование раздела	№ стр.
1	Общая характеристика производства. Назначение технологического процесса	196
2	Характеристика производимой продукции	196
3	Характеристика сырья, материалов, полуфабрикатов и вспомогательных материалов	197
4	Описание технологического процесса	197
5	Нормы технологического режима	199
6	Контроль производства и управления технологическим процессом	200
7	Охрана окружающей среды	200

Раздел 1. Общая характеристика производства. Назначение технологического процесса.		
1.1	Полное наименование производства	Производство шнуров наполненных марок: ШОАН (К) – 2,0; ШОАН (К) – 2,5; ШОАН (К) – 3,0
1.2	Год ввода в эксплуатацию	Не устанавливается для опытного производства
1.3	Мощность производства	Не устанавливается для опытного производства
1.4	Разработчик технологического процесса	Медведев А.В.
1.5	Метод производства	Периодический
1.6	Стадии технологического процесса	
1.6.1		Перемотка нитей оплетки на катушки
1.6.2		Приготовление наполнителя
1.6.3		Шнуруплетение

Раздел 2. Характеристика производимой продукции			
2.1.	Наименование продукции	Шнур наполненный из крученых нитей оксида алюминия	
2.2.	Основные свойства		
Марка шнура	Диаметр шнура, мм	Число нитей на 1 см	Масса 1 пог. м шнура, г
ШОАН (К) –2,0	2,0±0,25	4	3±1
ШОАН (К) –2,5	2,5±0,25	4	5±1
ШОАН (К) –3,0	3,0±0,25	4	7±2

Раздел 3	Характеристика сырья, материалов, полуфабрикатов и вспомогательных материалов	
	Наименование сырья, материалов, полупродуктов и энергоресурсов	Регламентируемые показатели с допускаемыми отклонениями
3.1	Шнур наполненный марки ШОАН (К) – 2,0: а) нити оплетки марки ОА–13–30×1×4×2–240 б) нити наполнителя марки ОА–11–20×1×3×2–120	1. Наружный диаметр 2,0±0,25 2. Линейная плотность нитей оплетки 480±30 текс 3. Линейная плотность наполнителя 1800±180 текс. 4. Масса 1 пог. м шнура 3±1 г
3.2	Шнур наполненный марки ШОАН (К) – 2,5: а) нити оплетки марки ОА–13–30×1×4×2–240 б) нити наполнителя марки ОА–11–20×1×3×2–120	1. Наружный диаметр 2,5±0,25 2. Линейная плотность нитей оплетки 480±30 текс 3. Линейная плотность наполнителя 2400±240 текс 4. Масса 1 пог. м шнура 5±1 г
3.3	Шнур наполненный марки ШОАН (К) – 3,0: а) нити оплетки марки ОА–13–30×1×4×2–240 б) нити наполнителя марки ОА–11–20×1×3×2–120	1. Наружный диаметр 3,0±0,25 2. Линейная плотность нитей оплетки 480±30 текс 3. Линейная плотность наполнителя 5400±540 текс 4. Масса 1 пог. м шнура 7±2 г

Раздел 4	Описание технологического процесса
----------	------------------------------------

4.1. Перемотка нитей оплетки на катушки веретена.

Нити марки ОА–13–30×1×4×2–240 перематывается бобин на одну катушку веретена ВПР-125. Намотка нитей параллельная. Перемотка нитей на катушку осуществляется на перемоточной машине ПМ-1. Катушка с нитью маркируется с указанием марки и суммарной линейной плотностью нитей. Марка нити оплетки и число сложений представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Марка шнура	Марка нити	Число сложений, шт.	Линейная плотность, текс
ШОАН (К) – 2,0	ОА–13–30×1×4×2–240	2	480
ШОАН (К) – 2,5	ОА–13–30×1×4×2–240	2	480
ШОАН (К) – 3,0	ОА–13–30×1×4×2–240	2	480

4.2. Приготовление наполнителя.

Нити марки ОА–11–20×1×3×2–120 тростят на универсальном стенде путем перемотки крученых нитей с входных бобин на выходную бобину с необходимым числом сложений для получения наполнителя заданной линейной плотности. Бобины с нитью маркируются с указанием марки и суммарной линейной плотностью нитей. Марка исходной нити для оплетки и число сложений указаны в таблице 2.

Таблица 2.

Марка шнура	Марка нитей наполнителя	Линейная плотность нитей наполнителя, текс	Число сложений, шт.	Линейная плотность наполнителя, текс
ШОАН (К) –2,0	ОА–11–20×1×3×2–20	120	15	1800
ШОАН (К) –2,5	ОА–11–20×1×3×2–20	120	20	2400
ШОАН (К) –3,0	ОА–11–20×1×3×2–20	120	45	5400

4.3. Выработка шнура.

Выработка шнуров осуществляется на машине шнуроплетельной ШП16-3. Наполнитель через отверстие в станине подается к месту плетения. Катушки с нитями оплетки устанавливаются на плетельные веретена ВПР-125. Нить оплетки с катушек плетельных веретен вручную через глазок компенсатора и выходной глазок плетельного веретена подается к формировочной втулке. От формировочной втулки наполнитель и нити оплетки совместно подаются к валкам вытяжного устройства, где пропускаются между валками. Число зубьев сменных шестерен: ведущей – 24, ведомой – 36. Технологические параметры выработки шнуров указаны в таблице 3.

Таблица 3.

Частота вращения крылаток, об/мин	Заправочное натяжение нитей, сН	Скорость отвода шнура из зоны формирования, м/мин	Плотность плетения, число нитей на 1 см	Число нитей в заправке на 1 головку, шт.
200	180±10	0,44	4	4

Раздел 5		Контроль производства и управления технологическим процессом		
Наименование стадии процесса	Контролируемый параметр	Частота и способ контроля	Нормы и технические показатели	Методы испытаний, способы контроля
1. Перемотка нитей оплетки	1. Количество сложений нити, шт. 2. Линейная плотность нитей оплетки	Непосредственно перед началом работ, но не реже одного раза в сутки	В соответствие с п. 4.1 В соответствие с п. 4.1 по ГОСТ 6943.1 – 2015	Весы электронные с точностью измерения до 0,0001г
2. Приготовление наполнителя	1. Количество сложений нити, шт. 2. Линейная плотность наполнителя	Непосредственно перед началом работ, но не реже одного раза в сутки	В соответствие с п. 4.2 В соответствие с п. 4.2 по ГОСТ 6943.1 – 2015	Весы электронные с точностью измерения до 0,0001 г
3. Выработка шнура	1. Число зубьев сменных шестерен 2. Число нитей в заправке на одну головку, шт. 3. Натяжение нитей оплетки 4. Скорость отвода шнура из зоны формирования 5. Диаметр шнура 7. Масса шнура	При перезаправках	В соответствие с п. 4.3 В соответствие с п. 4.3 В соответствие с п. 3.3 В соответствие с п. 3.3 В соответствие с п. 4.2 В соответствие с п. 4.3	Тестер натяжения ТНН-100 Штангельциркуль электронный, цена деления 0,01 мм Весы электронные с точностью измерения до 0,0001 г

Раздел 6	Охрана окружающей среды			
Наименования выделяющихся вредных веществ	Состав выброса	ПДК*, мг/м ³		Класс опасности по ГОСТ 12.1.007-76 ГОСТ 12.1.005-88
		в воздухе рабочей зоны (среднесменная)	в атмосферном воздухе	
Пыль	Al ₂ O ₃ – 85% SiO ₂ – 15%	– / 6	0,06 ОБУВ	3
*В числителе максимальная разовая ПДК, в знаменателе среднесменная				

Раздел 7	Безопасная эксплуатация производства			
7.1. Характеристика опасностей производства				
7.1.1. Пожарные и токсичные свойства сырья, полуфабрикатов, готовой продукции и отходов производства				
Наименование сырья, полуфабрикатов, готовой продукции и отходов производства	Плотность паров по воздуху	Растворимость в воде	Возможность воспламенения или взрыва при воздействии (да, нет)	
			Воды	Кислорода
1. Керамические крученые нити	нет	нерастворимы	нет	нет

7.1.2. Характеристика токсичности		
Наименование сырья, полуфабрикатов, готовой продукции и отходов производства	Характеристика токсичности (воздействие на организм человека)	Литература
1. Керамические крученые нити	Относится к материалам фиброгенного действия. Пыль раздражает кожный покров, слизистые оболочки верхних дыхательных путей, вызывает зуд кожи, сыпь	Вредные вещества в промышленности, Том 3, стр. 289. ГН 2.2.5.1313-03 ГН 2.1.6.1339 – ГН2.1.6.1339-

7.1.3. Взрывоопасная и пожарная опасность, санитарная характеристика производственных зданий, помещений, зон и наружных установок					
Наименование производственных помещений, наружных установок	Категория взрывопожарной и пожарной опасности помещений и зданий (НПБ-105-95)	Классификация опасных зон внутри и вне помещений для выбора и установки электрооборудования по ПУЭ			Средства пожаротушения
		Класс взрывоопасности	Категория и группа взрывоопасных смесей	Наименование веществ, определяющих категорию взрывоопасных смесей	
Шнуроплетельный участок	Д	Не классифицируется		нет	I б 1. Огнетушитель кислотный ОУ-5;34-01-У2 Ту 22-150-128-89 2. Огнетушитель углекислотный ОУ-8

7.2. Меры безопасности при эксплуатации производства				
Наименование стадии технологического процесса	Профессия работающего на стадии	Средства индивидуальной защиты работающего	Наименование и номер НТД	Срок службы
1. Перемотка нитей оплетки 2. Приготовление наполнителя 3. Выработка шнура	Оператор ПМ - 1 Оператор универсального стенда Оператор ШП16–3	Респиратор У-2К	ТУ6-16-2267- 76	1 смена

Протоколы испытаний крученых нитей из оксида алюминия,
выработанных по способу отдельной подачи нитей в зону кручения

ПРИЛОЖЕНИЕ №4

Протокол испытаний крученой нити марки ОА-11-20×1×3-60

ИП «ПИТОН» АО «НПО СТЕКЛОПЛАСТИК»

141551, Московская область, Солнечногорский район, р.п. Андреевка, стр. 3А
Тел. 8 (495) 653-75-60, тел./факс 8 (495) 536-25-59

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЮ24 от 18.08.2015 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ 08-18 от «10» сентября 2018 г.

Наименование: нить крученая из оксида алюминия 20 tex f 80 Z40 x 3S36; R 60 tex

Заказчик: ФБГОУ ВПО «РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

НД, в соответствии с которым проведено испытание: ГОСТ 6611.2-73

Разрывная машина: И 4301-М

Вид зажима: тисочный

Расстояние между зажимами 250 мм.

Дата проведения испытаний: 03.04.2018 г.

Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	Фактические значения по пробам				
			1	2	3	4	5
1	Максимальная нагрузка при растяжении до разрыва	Н	7,2	4,39	7,22	8,79	6,5
2	Относительное удлинение при максимальной нагрузке	%	0,559	0,595	0,6	0,612	0,584
3	Нагрузка при разрыве	Н	4,02	2,23	3,82	4,58	3,43
4	Относительное удлинение при разрыве	%	0,687	0,72	0,729	0,738	0,686
5	Удельная разрывная нагрузка	сН/текс	11,80	7,57	11,65	14,41	11,40

Испытание провел Колесникова Е.И.

Зав. лабораторией Н.К. Викулова/



Протокол испытаний крученой нити марки ОА-11-20×1×3×2-120

ИП «ПИТОН» АО «НПО СТЕКЛОПЛАСТИК»

141551, Московская область, Солнечногорский район, р.п. Андреевка, стр. 3А
Тел. 8 (495) 653-75-60, тел./факс 8 (495) 536-25-59

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЮ24 от 18.08.2015 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ 08-18 от 10 апреля 2018 г.

Наименование: нить крученая из оксида алюминия 20 tex f 80 Z40 x 3S36 x 2Z28; R 120 tex

Заказчик: ФБГОУ ВПО «РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

НД, в соответствии с которым проведено испытание: ГОСТ 6611.2-73

Разрывная машина: И 4301-М

Вид зажима: тисочный

Расстояние между зажимами 250 мм.

Дата проведения испытаний: 03.04.2018 г.

Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	Фактические значения по пробам				
			1	2	3	4	5
1	Максимальная нагрузка при растяжении до разрыва	Н	19,21	18,06	13,51	19,56	22,69
2	Относительное удлинение при максимальной нагрузке	%	0,559	0,591	0,559	0,576	0,696
3	Нагрузка при разрыве	Н	9,81	9,37	6,8	10,37	11,55
4	Относительное удлинение при разрыве	%	0,666	0,673	0,638	0,697	0,751
5	Удельная разрывная нагрузка	сН/текс	15,88	14,93	11,45	15,90	18,60

Испытание провел

Кондратьев Е.И.

Зав. лабораторией



/Н.К. Викулова/

Протокол испытаний крученной нити марки ОА-12-25×1×2-50

ИП «ПИТОН» АО «НПО СТЕКЛОПЛАСТИК»

141551, Московская область, Солнечногорский район, р.п. Андреевка, стр. 3А
Тел. 8 (495) 653-75-60, тел./факс 8 (495) 536-25-59

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЮ24 от 18.08.2015 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ 08-18 от «10» апреля 2018 г.

Наименование: нить из оксида алюминия 24 tex f 80 Z40 x 2S36; R 48 tex

Заказчик: ФБГОУ ВПО «РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

НД, в соответствии с которым проведено испытание: ГОСТ 6611.2-73

Разрывная машина: И 4301-М

Вид зажима: тисочный

Расстояние между зажимами 250 мм.

Дата проведения испытаний: 02.04.2018 г.

Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	Фактические значения по пробам				
			1	2	3	4	5
1	Максимальная нагрузка при растяжении до разрыва	Н	3,23	4,33	3,19	3,68	4,05
2	Относительное удлинение при максимальной нагрузке	%	0,572	0,716	0,54	0,647	0,711
3	Нагрузка при разрыве	Н	1,63	2,20	1,61	1,84	2,08
4	Относительное удлинение при разрыве	%	0,772	1,017	0,832	0,951	1,059
5.	Удельная разрывная нагрузка	cH/текс	13,40	17,82	13,07	14,84	16,95

Испытание провел

Зав. лабораторией



Н.К. Викулова/

Протокол испытаний крученой нити марки ОА-12-25×1×2×2-100

ИП «ПИТОН» АО «НПО СТЕКЛОПЛАСТИК»

141551, Московская область, Солнечногорский район, р.п. Андреевка, стр. 3А
Тел. 8 (495) 653-75-60, тел./факс 8 (495) 536-25-59

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЮ24 от 18.08.2015 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ 08-18 от «10» апреля 2018 г.

Наименование: нить крученая из оксида алюминия 24 tex f 80 Z40 x 2S36 x 2Z28; R 96 tex

Заказчик: ФБГОУ ВПО «РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

НД, в соответствии с которым проведено испытание: ГОСТ 6611.2-73

Разрывная машина: И 4301-М

Вид зажима: тисочный

Расстояние между зажимами 250 мм.

Дата проведения испытаний: 02.04.2018 г.

Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	Фактические значения по пробам				
			1	2	3	4	5
1	Максимальная нагрузка при растяжении до разрыва	Н	11,26	11,94	11,79	11,23	12,24
2	Относительное удлинение при максимальной нагрузке	%	0,938	0,946	0,973	0,925	0,892
3	Нагрузка при разрыве	Н	5,59	6,01	5,93	5,67	6,16
4	Относительное удлинение при разрыве	%	1,43	1,217	1,311	1,436	1,236
5.	Удельная разрывная нагрузка	сН/текс	11,49	12,57	12,15	11,58	12,49

Испытание провел

Зав. лабораторией



Н.К. Викулова/

Протокол испытаний крученной нити марки ОА-13-30×1×4-120

ИП «ПИТОН» АО «НПО СТЕКЛОПЛАСТИК»

141551, Московская область, Солнечногорский район, р.п. Андреевка, стр. 3-А
Тел. 8 (495) 653-75-60, тел./факс 8 (495) 536-25-59

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЮ24 от 18.08.2015 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ 08-18 от «10» апреля 2018 г.

Наименование: нить крученная из оксида алюминия 29 tex f 80 Z40 x 4S36; R 116 tex

Заказчик: ФБГОУ ВПО «РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

НД, в соответствии с которым проведено испытание: ГОСТ 6611.2-73

Разрывная машина: И 4301-М

Вид зажима: тисочный

Расстояние между зажимами 250 мм.

Дата проведения испытаний: 04.04.2018 г.

Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	Фактические значения по пробам				
			1	2	3	4	5
1	Максимальная нагрузка при растяжении до разрыва	Н	11,07	12,6	12,86	11,6	12,32
2	Относительное удлинение при максимальной нагрузке	%	0,577	0,582	0,638	0,639	0,683
3	Нагрузка при разрыве	Н	5,83	6,70	6,77	5,81	6,22
4	Относительное удлинение при разрыве	%	0,758	0,750	0,778	0,792	0,836
5	Удельная разрывная нагрузка	сН/текс	9,54	11,05	11,18	9,91	10,44

Испытание провел

Зав. лабораторией

Н.К. Викулова/

Протокол испытаний крученой нити марки ОА-13-30×1×4×2-240

ИП «ПИТОН» АО «НПО СТЕКЛОПЛАСТИК»

141551, Московская область, Солнечногорский район, р.п. Андреевка, стр. 3А
Тел. 8 (495) 653-75-60, тел./факс 8 (495) 536-25-59

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЮ24 от 18.08.2015 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ 08-18 от «10» апреля 2018 г.

Наименование: нить крученая из оксида алюминия 29 tex f 80 Z40 x 4S36 x 2Z28; R 232 tex

Заказчик: ФБГОУ ВПО «РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

НД, в соответствии с которым проведено испытание: ГОСТ 6611.2-73

Разрывная машина: И4301-М

Вид зажима: тисочный

расстояние между зажимами 250 мм.

Дата проведения испытаний: 04.04.2018 г.

Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	Фактические значения по пробам				
			1	2	3	4	5
1	Максимальная нагрузка при растяжении до разрыва	Н	25,84	27,2	21,24	26,51	22,51
2	Относительное удлинение при максимальной нагрузке	%	0,687	0,741	0,756	0,785	0,725
3	Нагрузка при разрыве	Н	13,04	14,0	10,78	13,64	11,37
4	Относительное удлинение при разрыве	%	0,869	0,824	0,837	0,76	0,831
5	Удельная разрывная нагрузка	сН/текс	11,04	11,43	9,00	11,09	9,58

Испытание провел Голышев В.И.

Зав. лабораторией Н.К. Викулова

Протоколы испытаний крученых нитей из оксида алюминия
выработанных, по способу совместной подачи нитей в зону кручения
ПРИЛОЖЕНИЕ №5

Протокол испытаний крученой нити марки ОА–12–25×1×2×2–100

ИП «ПИТОН» АО «НПО СТЕКЛОПЛАСТИК»

141551, Московская область, Солнечногорский район, р.п. Андреевка, стр. 3А
Тел. 8 (495) 653-75-60, тел./факс 8 (495) 536-25-59

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЮ24 от 18.08.2015 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ _____ от « ____ » _____ 2018 г.

Наименование: нить крученая из оксида алюминия 24 tex f 80 Z40 x 2S36 x 2Z28; R 96 tex

Заказчик: ФБГОУ ВПО «РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

НД, в соответствии с которым проведено испытание: ГОСТ 6611.2-73

Разрывная машина: И 4301-М

Вид зажима: тисочный

Расстояние между зажимами 250 мм.

Дата проведения испытаний: 02.04.2018 г.

Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	Фактические значения по пробам				
			1	2	3	4	5
1	Максимальная нагрузка при растяжении до разрыва	Н	6,53	5,84	5,47	6,42	6,14
2	Относительное удлинение при максимальной нагрузке	%	0,893	0,942	0,984	0,964	0,966
3	Нагрузка при разрыве	Н	3,25	3,69	4,01	3,29	3,81
4	Относительное удлинение при разрыве	%	1,41	1,289	1,37	1,344	1,351
5.	Удельная разрывная нагрузка	сН/текс	6,80	6,08	5,70	6,69	6,40

Испытание провел н/к, Самкина Н.А.

Зав. лабораторией н/к, Викулובה Н.В.



КОПИЯ ВЕРНА

подпись Викулובה Н.В.

Викулובה Н.В.

Протокол испытаний крученой нити марки ОА–13–30×1×4–120

ИП «ПИТОН» АО «НПО СТЕКЛОПЛАСТИК»

141551, Московская область, Солнечногорский район, р.п. Андреевка, стр. 3А
Тел. 8 (495) 653-75-60, тел./факс 8 (495) 536-25-59

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЮ24 от 18.08.2015 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ _____ от « ____ » _____ 2018 г.

Наименование: нить крученая из оксида алюминия 20 tex f 80 Z40 x 3S36 x 2Z28; R 120 tex

Заказчик: ФБГОУ ВПО «РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

НД, в соответствии с которым проведено испытание: ГОСТ 6611.2-73

Разрывная машина: И 4301-М

Вид зажима: тисочный

Расстояние между зажимами 250 мм.

Дата проведения испытаний: 03.04.2018 г.

Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	Фактические значения по пробам				
			1	2	3	4	5
1	Максимальная нагрузка при растяжении до разрыва	Н	10,45	10,32	10,36	9,93	10,09
2	Относительное удлинение при максимальной нагрузке	%	0,882	0,986	0,897	0,914	0,991
3	Нагрузка при разрыве	Н	4,88	5,52	5,15	5,25	5,17
4	Относительное удлинение при разрыве	%	1,39	1,36	1,25	1,30	1,39
5	Удельная разрывная нагрузка	сН/текс	8,71	8,60	8,63	8,28	8,41

Испытание провел н/н / Самкина Н.А.

Зав. лабораторией н/н / Н.К. Викулова/



КОПИЯ ВЕРНА

подпись Вик-
Викторова Н.В.

Протокол испытаний крученой нити марки ОА–13–30×1×4×2–240

ИП «ПИТОН» АО «НПО СТЕКЛОПЛАСТИК»

141551, Московская область, Солнечногорский район, р.п. Андреевка, стр. 3А
Тел. 8 (495) 653-75-60, тел./факс 8 (495) 536-25-59

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЮ24 от 18.08.2015 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ _____ от « ____ » _____ 2018 г.

Наименование: нить крученая из оксида алюминия 29 tex f 80 Z40 x 4S36 x 2Z28; R 232 tex

Заказчик: ФБГОУ ВПО «РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

НД, в соответствии с которым проведено испытание: ГОСТ 6611.2-73

Разрывная машина: И4301-М

Вид зажима: тисочный

Расстояние между зажимами 250 мм.

Дата проведения испытаний: 04.04.2018 г.

Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	Фактические значения по пробам				
			1	2	3	4	5
1	Максимальная нагрузка при растяжении до разрыва	Н	10,9	13,1	12,73	11,95	12,03
2	Относительное удлинение при максимальной нагрузке	%	0,732	0,886	0,799	0,841	0,756
3	Нагрузка при разрыве	Н	5,51	6,72	6,49	6,11	6,02
4	Относительное удлинение при разрыве	%	0,926	0,985	0,885	0,814	0,867
5	Удельная разрывная нагрузка	сН/текс	4,70	5,65	5,49	5,15	5,19

Испытание провел н/п / Самин Н.А.

Зав. лабораторией н/п / Вискулова Н.К.



КОПИЯ ВЕРНА

подпись Вискулова Н.К.
/Вискулова Н.К./

Научное издание

А. В. Медведев А. В. Демидов К. Э. Разумеев

**Крученые нити из оксида алюминия отечественного производства для
высокотемпературных наполненных шнуров**

Монография

Рукопись подготовлена и издана в авторской редакции

Научное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:

Электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=2023108, по паролю
- Заглавие с экрана

Дата подписания к использованию 29.12.2022 г.

Рег. № 108/23

ФГБОВУ ВО «СПбГУПТД»
Юридический и почтовый адрес:
191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18
<http://sutd.ru/>