003056094

На правах рукописи

Русских Геннадий Иванович

ТЕХНОЛОГИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ НАСОСНЫХ ШТАНГ

Специальность 05.17.06 — Технология и переработка полимеров и композитов

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Бийск - 2007

Работа выполнена в ООО «Бийский завод стеклопластиков»

Научный руководитель -	доктор технических наук, старший научный сотрудник Афанасьев Юрий Герасимович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Маркин Виктор Борисович; кандидат технических наук Ишков Алексей Владимирович
Ведущая организация:	ФГУП «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск, Алтайский край

Защита состоится 27 апреля 2007г. в 11 часов на заседании диссертационного совета К 212.004.03 в Бийском технологическом институте (филиале) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова» по адресу: 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Бийского технологического института (филиала) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова»

Автореферат разослан 26 марта 2007 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Светлов С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) получило большое распространение практически во всех отраслях промышленности. В то же время, разработка и внедрение новых технологий значительно отстает от потребностей вновь разрабатываемых конструкций изделий. В частности, это относится к технологиям получения высоконагруженных соединений пластик-металл. Важнейшим применением ПКМ - является применение стеклопластиковых стержней в качестве силовых элементов в строительстве, в полимерных изоляторах, в стеклопластиковых насосных штангах (ШНС) и др. Различие условий среды эксплуатации и разнообразие видов нагружения: от статического — до динамического, значительно усложняет задачу разработки технологических и конструктивных решений высоконагруженных узлов соединений ПКМ — металл. Опыт эксплуатации изделий из ПКМ для передачи нагрузок показал, что до 90% всех разрушений приходится на узел соединения. При этом масса узлов соединений составляет 20 – 30% от массы изделия. Технология получения высоконагруженных соединений пластик-металл до настоящего времени недостаточно разработана. К проблемам их получения добавляются проблемы эксплуатационной усталости и работы соединений в условиях агрессивной среды и повышенных температур. Одним из изделий, для которого эти проблемы выражены наиболее значительно, является стеклопластиковая насосная штанга, используемая в нефтедобыче.

Известно, что в России около 53%, а за рубежом – до 90% нефтедобывающих скважин оборудованы штанговыми насосами. По мере истощения месторождений нефти количество таких скважин будет расти. Штанговая добыча экономически целесообразна на малодебитных скважинах.

При добыче штанговыми насосами привод глубинного насоса от станка-качалки передаёт нагрузку при помощи колонны насосных штанг. Насосные штанги работают в сложных условиях изгибных и растягивающих напряжений, воздействия агрессивной среды водонефтяной жидкости в присутствии сероводорода, углекислоты, солей и др. примесей. Большая глубина добычи (до 3000 метров) обуславливает повышенные требования к прочности штанг. ШНС в три раза легче, обладают высокой коррозионной стойкостью, имеют более высокий, чем у стальных штанг, циклический ресурс.

При реализации технологических и конструктивных решений стеклопластиковых насосных штанг возникают проблемы получения соединений из разнородных материалов: стеклопластика и металла. Для эффективного решения задачи качества и производительности, наибольший интерес представляет технология непрерывного формирования узлов соединения стеклопластиковых насосных штанг в составе стеклопластикового стержня и стальных головок.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской программы создания стеклопластиковой насосной штанги ООО «Бийский завод стеклопластиков».

Цель и задачи исследования. Целью разработки является создание технологии непрерывного формирования высоконагруженных соединительных узлов стеклопластик – металл, используемых в условиях динамического нагружения при эксплуатации стеклопластиковых насосных штанг.

Для реализации поставленной цели в работе определены следующие основные задачи:

– разработать технологию непрерывного формирования узлов соединения стеклопластикового стержня со стальной головкой методом радиального обжатия;

– определить влияние параметров радиального обжатия на прочностные свойства стеклопластика, в том числе заматываемого соединения;

– изучить прочностные свойства полимерных композитов стеклопластика, в том числе в условиях агрессивной среды нефтяных месторождений;

– получить методом макетного моделирования различные конструктивно-технологические схемы узлов соединений ШНС пригодные для непрерывного формирования;

– разработать конструкцию ШНС, удовлетворяющую требованиям к прочностным и эксплуатационным характеристикам в условиях применения в скважинах нефтяных месторождений;

– исследовать прочность полученных образцов различных конструкций ШНС от статических нагрузок и циклическую прочность разработанной конструкции стеклопластиковой насосной штанги.

Объект, предметы и методы исследования.

В настоящей работе объектом исследования является технологический процесс производства стеклопластиковых насосных штанг. Предметами исследования являются материал, конструктивно-технологические решения стеклопластиковой насосной штанги с технологией непрерывного получения стержня из ПКМ с заформованным вовнутрь стальным элементом головки штанги. Исследования проведены с использованием расчетно-аналитических и экспериментальных методов. Теоретические методы применялись для анализа и выбора конструктивного решения ШНС, для прогнозирования прочностных и эксплуатационных характеристик. Экспериментальные методы применялись для исследования технологии и конструкции ШНС, а также исследования характеристик материала штанг.

Научная новизна работы.

– Разработана технология непрерывного формирования высоконагруженных узлов соединений, используемых в стеклопластиковых насосных штангах в условиях динамического нагружения при добыче нефти штанговыми насосами.

– Предложен алгоритм расчета параметров устройства обжатия стеклопластика вокруг заматываемого закладного элемента.

– Проведены экспериментальные исследования материала и натурных образцов ШНС в режимах, моделирующих эксплуатационные.

– Получен новый тип конструкции стеклопластиковой насосной штанги пригодной для непрерывного формования.

Практическая значимость. Разработана и внедрена на ООО «Бийский завод стеклопластиков» опытная технология непрерывного изготовления ШНС. Разработана утяжка – устройство для изготовления стеклопластиковых изделий переменного сечения методом радиального обжатия. Получен патент РФ № 2274715 на способ изготовления стержней переменного сечения и устройство для его осуществления. Изготовлены опытные образцы ШНС, разработанной конструкции. Получен патент РФ №2236542 на конструкцию стеклопластиковой насосной штанги.

Изготовленные опытные образцы штанг были признаны специалистами - нефтяниками на 4-й Межрегиональной специализированной выставке «НЕФТЬ И ГАЗ –2003» в г. Томске, где разработанная конструкция штанги получила диплом «Сибирские Афины».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: Международной научно-технической конференции «Подвесные и опорные полимерные изоляторы: производство, технические требования, методы испытаний, опыт эксплуатации, диагностика», 4 — 9 октября 2004 г., С — Петербург; IV Всероссийской научно — практической конференции «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья», 1— 4 июня, 2004 г., Бийск; 4 - й Всероссийской научно-практической конференции «Информационные технологии в экономике, науке и образовании» 22 — 23 апреля 2004 г., Бийск; V Всероссийской научно — практической конференции «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья», 6 — 7 июня 2005 г. , Белокуриха; XIX Всероссийской конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности» 28 — 31 августа 2005 г., Бийск; Всероссийской конференции «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды», 6,7 июля 2006 г., Бийск; Всероссийской научно - практической конференции «Ресурсосберегающие технологии в машиностроении» 21— 22 сентября 2006 г., Бийск; Международной научно — технической конференции «Композиты — в народное хозяйство» (Композит 2006), 9 — 10 октября 2006 г., Барнаул.

На защиту выносятся:

–Технология непрерывного изготовления стеклопластиковых стержней с заформованными во внутрь их стальными элементами.

– Результаты исследования изменения прочностных свойств композиционных материалов в условиях имитирующих длительное воздействие агрессивных сред нефтяного месторождения.

– Новое конструктивно-технологическое решение стеклопластиковой насосной штанги и узла ее соединения, полученного методом непрерывного формирования.

– Результаты исследования по разработке конструкций соединений стеклопластиковых стержней со стальными заматываемыми элементами.

– Результаты исследования прочностных характеристик насосных штанг при статическом и циклическом нагружениях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, основных выводов, списка использованной литературы из 139 наименований, приложения и содержит 158 страниц машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, определены цели, задачи, объект, предмет и методы исследования. Раскрыты научная новизна, практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту. Работа посвящена технологии получения высоконагруженных соединительных узлов стеклопластик-металл. Рассматривается технология и изделия, полученные из стеклопластика методами непрерывного формирования. Рассмотрены условия и проблемы применения насосных штанг в нефтедобыче, показаны преимущества использования стеклопластиковых насосных штанг (ШНС)

Первая глава диссертационной работы содержит литературный обзор, в котором рассмотрена область применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), особенности и специфика использования ПКМ в разных областях экономики.

Рассмотрены проблемы технологии получения изделий из ПКМ, обусловленные особенностью взаимодействия волоконных наполнителей и полимерной матрицы. Изучены вопросы влияния степени армирования на прочность композита, определены технологические требования к обеспечению прочности. Имеется некоторый оптимум степени армирования, при котором достигается максимум прочности композита. При трёхмерном нагружении характер разрушения может существенно измениться. Дан обзор литературных источников, формулирующих необходимые критерии обеспечения прочностных характеристик ПКМ, описывающих природу распространения трещин при нагружении ПКМ и технологические способы повышения его прочности. При получении соединений стеклопластик-металл рассмотрены проблемы конструктивной совместимости материалов. Рассмотрено влияние степени армирования на величину концентрации напряжений и рабочую температуру эксплуатации. Показана роль сдвиговых характеристик ПКМ на прочность соединения ПКМ - металл. Такие соединения могут быть получены тремя разными вариантами конструктивного исполнения с использованием:

–соединений «охватывающего» типа, когда однонаправленный стержень из стеклопластика жёстко соединён со стальным оконцевателем по его полой внутренней поверхности;

–соединений «заматываемого» типа, когда металлический элемент оконцевателя вклеен или заформован вовнутрь стеклопластикового стержня;

–соединений комбинированных схем, сочетающих в себе элементы заматываемого и охватываемого соединений.

Такие соединения могут быть использованы в высоконагруженных узлах соединений конструкции ШНС.

Конструкции стеклопластиковых насосных штанг известны с 1988 г. (патент США №4360288). ШНС используются в США примерно на 20% скважин со штанговой добычей. Технические условия на штанги стандартизованы в стандартах Американского института нефти (API) и ГОСТ Р 51161-98.

Конструкция ШНС (рисунок 1) представляет собой стеклопластиковый стержень круглого сечения 1 со стальными головками 2, имеющими резьбовые окончания для свинчивания штанг друг с другом.

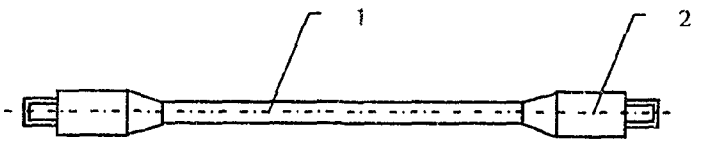
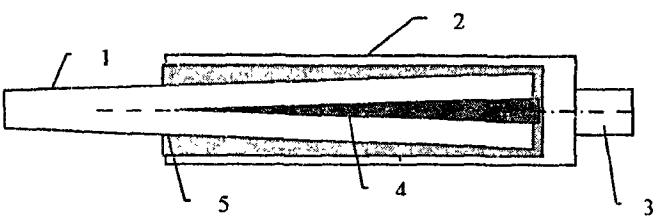


Рисунок 1 – Общий вид конструкции ШНС

На основе информационных исследований проведён патентный обзор соединений ШНС и рассмотрены технические требования к ним. Сформулированы принципы разработки соединений стеклопластик-сталь, сделан морфологический анализ универсальной конструкции (рисунок 2).

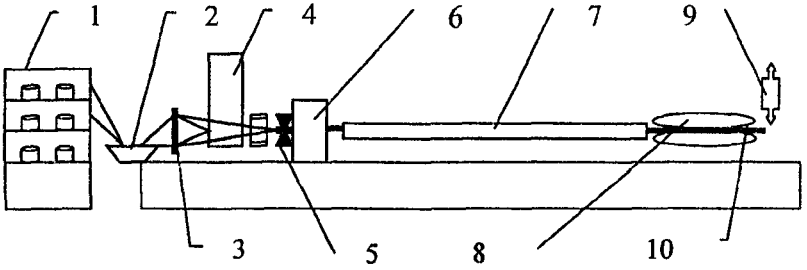


1 – стержень из стеклопластика; 2 – корпус с внутренней полостью; 3 – резьбовое окончание; 4 – закладной элемент; 5 – полимерная заливка или клеевой шов

Рисунок 2 – Универсальная морфологическая схема конструкции головки ШНС

Анализ конструкций ШНС «охватывающего типа» выявил их основной конструктивный и технологический недостаток – использование клеевых соединений, стабильность технологии которых целиком зависит от условий сборки. Соединения «заматываемого» типа при использовании станочной технологии имеют меньшие технологические разбросы и лучший адгезионный контакт металл - ПКМ за счет создания предварительных сжимающих напряжений. Таким образом, показано, что развитие непрерывных технологий может существенно улучшить качество формируемых высоконагруженных узлов соединений.

Во второй главе рассматриваются проблемы технологии получения стержней из ПКМ переменного диаметра с заформовыванными во внутрь стержня закладными элементами оконцевателей. Известен способ непрерывного получения стержней из ПКМ - пултрузия, который обеспечивает получение стержней постоянного сечения с массовым содержанием связующего около 20%. Известен другой способ по патенту РФ №2142039, когда формование стержней происходит по схеме рисунка 3. Фиксация формы стержня осуществляется кольцевой нитью. Обжатие пропитанных стекловолокон ограничено прочностью кольцевой нити. В ходе работы были разработаны специальные устройства обжатия пропитанного жгута в зоне фиксации кольцевой нитью формы изделия. Устройство такого типа получило у специалистов термин «утяжка». Место размещения утяжки показано на рисунках 3,4. Утяжка представляет собой фильеру с нежесткой границей контакта, позволяющей обжимать стержень переменного сечения. Это делает технологию пригодной для получения заматываемых соединений (рисунок 4).



1 – шпулярник; 2 – ванна пропитки; 3 – кольцевая гребенка; 4 – укладчик закладных элементов; 5 — утяжка; 6 — кольцевой укладчик (вертлюг); 7 – тоннельная печь полимеризации; 8 – тянущее устройство; 9 – отрезное устройство; 10 – готовая штанга

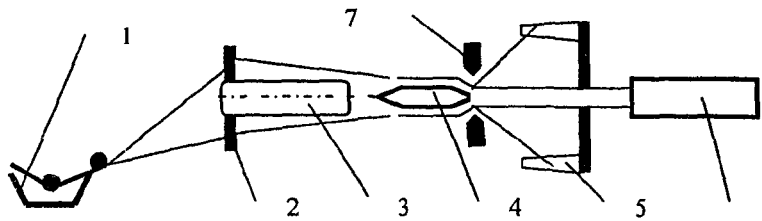
Рисунок 3 – Схема технологической линии формования ШНС

Результаты опытных формований стержней постоянного сечения показаны в таблице 1. При формовании использовался стеклопластик на эпоксидном связующем с ангидридным отвердителем – ЭДИ. Испытания проведены методом продольного изгиба

Таблица 1– Результаты формования стержней при помощи утяжки

Диаметр стержня, мм	Относительное удлинение ε,%	Модуль упругости $E_{си}$, МПа	Прочность при изгибе $\sigma_и$, МПа	Прочность при растяжении $\sigma_р$, МПа
13	5,20±0,42	43524±1352	1832±120	1809±119
16	4,17±0,15	47522±1491	1611±147	1633±149
19	4,00±0,72	47415±2270	1563±268	1594±268

Таблица 1 отражает тенденцию снижения прочностных характеристик с увеличением диаметра стержня. Это связано с неравномерностью натяжения армирующих волокон, отклонениями в их ориентации, пропиткой волокон связующим и другими технологическими факторами.



1 – ванна пропитки; 2 – кольцевая раскладочная гребёнка; 3 – устройство подачи вкладышей; 4 – вкладыш; 5 – вертлюг – укладчик кольцевых нитей; 6 – печь полимеризации; 7 – устройство утягивания (утяжка).

Рисунок 4 – Схема получения изделий при помощи утяжки для стержней с анкерными утолщениями и заматываемыми узлами соединений

Центральным элементом конструкции утяжки является рабочий элемент который обеспечивает функционирование утяжки благодаря контактному скольжению по периметру формуемого стержня. Разработанная утяжка обеспечивает следующие функциональные параметры:

– радиальное воздействие на жгут;

– обеспечение требуемой геометрии сечения по ходу движения формуемого стержня;

– обеспечение радиальной неподвижности оси формуемого стержня посредством уравновешивания воздействующих на стержень сил;

– в каждый момент времени боковое ускорение формуемого стержня под действием силовых факторов должно быть близким или равным нулю;

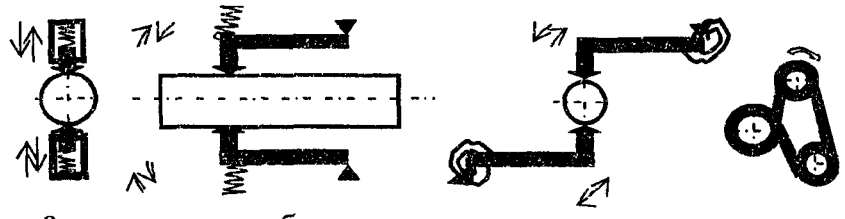
– геометрическая неподвижность места приложения сил относительно места укладки фиксирующих кольцевых нитей;

– точное дозирование контактных усилий обжатия формуемого стержня.

В работе предложены и проанализированы возможные конструктивные схемы исполнения утяжек. По кинематике движения рабочего элемента конструкции утяжек можно выполнить по схемам, показанным на рисунке 5.

Исходя из условия равновесия сил, возможны двух и многоточечные осесимметричные схемы размещения рабочих элементов утяжки.

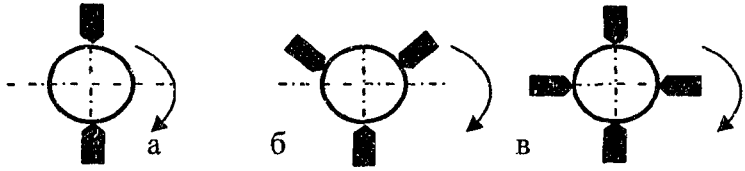
Линейность контакта обеспечивается вращением системы рабочих элементов вокруг формуемого стержня. Условие фиксации формы стержня в обжатом состоянии – в подаче кольцевых нитей в зону, непосредственно примыкающую к плоскости вращения рабочих элементов.



а – радиальные; б – работающие в плоскости продольного сечения стержня; в – работающие в плоскости поперечного сечения стержня; г – с петлевым охватом стержня

Рисунок 5 – Кинематические схемы утяжек

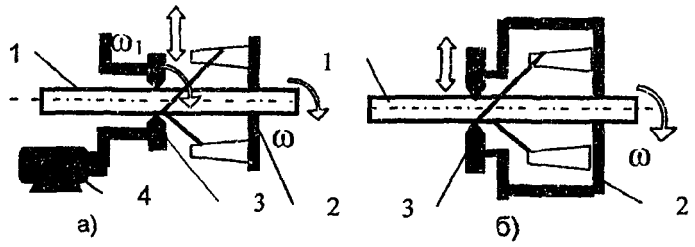
По зоне контакта рабочих элементов утяжки можно разделить на утяжки с точечным контактом (рисунок 6) и утяжки с линейным (криволинейным) контактом. Линейный контакт рабочего элемента конструктивно обеспечивается за счет прижатия к обжимаемому жгуту боковой поверхности стержня или ребра пластины. Отличие точечного контакта от линейного весьма условно, так как при форме рабочего элемента в виде прямого стержня или криволинейного стержня с радиусом кривизны большим, чем у формуемого стержня, имеется контактное пятно (точечный контакт). В то же время, форма рабочего элемента в такой геометрии облегчает скольжение рабочего элемента по формуемому стержню, снижая тем самым вероятность повреждения волокон. Условие линейного контакта должно удовлетворять условию $\delta \geq S$, где δ – ширина контактной зоны, S – шаг намотки кольцевой нити.



а – двухточечная схема, б – трехточечная схема, в – четырехточечная

Рисунок 6 – Схемы утяжек с точечным контактом рабочих элементов

Утяжка может быть с независимым приводом вращения или может быть закреплена на вращающейся части кольцевого нитеукладчика — вертлюга. На рисунке 7 представлены два разных варианта приводов утяжек. Достоинство независимого привода – в возможности регулировки скорости и даже направления вращения, а схемы с размещением утяжки на вертлюге – в простоте компоновки узлов. Условие работы утяжки для независимого привода (рисунок 7а) — в синхронности обжатия и укладке фиксирующей кольцевой нити $\omega_1 \geq \omega$. В случае схемы рисунка 7б синхронность устанавливается автоматически. Смыкание – размыкание рабочих элементов утяжки обеспечивается с помощью энергии пружин разных конструкций или с помощью энергии сжатого газа или жидкости (рисунок 5).



1 – формуемый стержень; 2 – вертлюг; 3 – утяжка; 4 – независимый привод
Рисунок 7 – Схемы передачи энергии вращения на утяжку: а) с независимым приводом; б) с установкой на вертлюге

В технологическом процессе утяжка обеспечивает следующие свойства при формовании композитного материала:

– Свойство обжатия и формования структуры стержня. Основное назначение утяжки в обжатии и формовании отдельных пропитанных жгутов стекловолокон в единый жгут, в том числе с вложенным вовнутрь вкладышем, с одновременной фиксацией формы кольцевой нитью.

– Свойство утяжки к удалению излишков связующего. Пропитанный в ванне жгут стеклянной арматуры, в виде набора ровингов или нитей, представляет собой материал с избытком связующего (40-50%) от массы материала, вместо потребных (15 - 20%). Утяжка обеспечивает удаление излишка связующего за счет деформирования (обжатия) жгута перед нанесением кольцевого слоя.

– Вибрационное воздействие утяжки на формуемый жгут. Рабочие элементы утяжки имеют некоторую несоосность с формуемым изделием. Имеющийся небольшой дисбаланс прикладываемых к изделию сил вместе с несоосностью, в совокупности приводят к вибрационным воздействиям на изделие. При действии вибраций появляются следующие эффекты:

– реологическая нелинейность (в результате низкочастотных сдвиговых колебаний увеличивается средне-интегральная скорость движения связующего, т.е. растет скорость пропитки);

– пристенное скольжение. При достаточно большой интенсивности периодического сдвигового деформирования пропитанный стекломатериал (жгут) переходит в вынужденное высокоэластичное состояние, в результате чего нарушается адгезионное взаимодействие с твердой стенкой закладного элемента. Это приводит к выравниванию плотности по толщине стеклопластика.

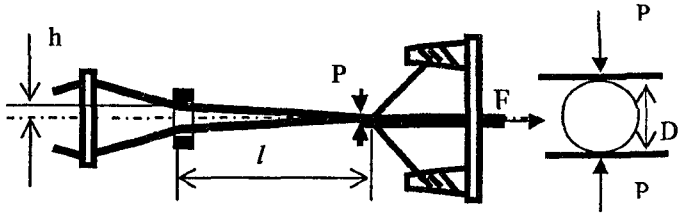
– Виброуплотнение и дегазация. Периодические импульсы вызывают в вязкотекучей среде пропитанного ровинга вибрацию стекловолокон и молекул связующего, что приводит к дегазации с образованием однородной, плотной, безпористой структуры.

– Ускорение релаксационных процессов. Под воздействием вибрационных импульсов у пропитанного стекломатериала ускоряются релаксационные процессы. При этом снижаются остаточные напряжения, интенсифицируется процесс укладки ровингов в плотную структуру. Качество изделий со сложными и глубокими выемками улучшается Волнообразное циклическое при-

ложение давления позволяет достичь оптимального уплотнения стеклопластика.

Таким образом, устройство утяжки уменьшает влияние известных недостатков технологии формования, в частности, несоосность оси формообразующего узла и оси изделия и создает меньшее трение , чем при формовании через жёсткую длинную фильеру при технологии пултрузии.

В диссертации представлен разработанный алгоритм расчётов для выбора параметров утяжки. Расчетные схемы работы устройства показаны на рисунке 8. Основой расчета служит критерий обеспечения прочности стеклопластика — оптимум объёмного армирования, при котором прочность максимальная. Особенность применения утяжек состоит в том, что усилие обжатия формуемого материала зависит от диаметра сечения в плоскости обжатия. В результате этого, на большем диаметре плотность материала получается выше. Кроме того, скольжение рабочих элементов утяжки по жгуту стекломатериала, пропитанного связующим, имеет ограничение по контактному давлению, при превышении которого возможно перерезание элементарных волокон. Алгоритм расчета построен на решении задачи прогиба гибкой нити под воздействием поперечной силы и контактной задачи Герца при взаимодействии упругих тел.



а – прогиба гибкой нити; б – контактной задачи Герца

Рисунок 8 – Схемы расчета

Силу прижатия рабочих элементов утяжки P в зависимости от натяжения жгута ровингов можно оценить (рисунок 8а) по формуле

$$P = 2F \Big/ \sqrt{1 + \frac{1}{\frac{16}{3}\left(\frac{h}{l}\right)^2\left[1 + \frac{4}{3}\left(\frac{h}{l}\right)^2\right]}}$$

где F – усилие натяжения жгута, Н; l – расстояние между зоной обжатия и ближайщей точкой перегиба, м; h – глубина обжатия жгута, м

Классическая теория контакта соприкасающихся тел создана из следующих допущений контактных задач Герца:

– материалы соприкасающихся тел однородны и изотропны;

– нагрузки, приложенные к телам, создают в зоне контакта только упругие деформации, подчинённые закону Гука;
– площадка контакта весьма мала по сравнению с общими поверхностями соприкасающихся тел,
– силы давления нормальны к поверхности контакта тел;– силами трения на площадке контакта пренебрегают.

Несмотря на некоторые ограничения, зависимости, основанные на теории Г.Герца, корректны, поскольку:
– контакт соприкасающихся тел проходит при скольжении одного тела по периметру другого, и поэтому, с учётом уравновешенности радиальных сил воздействующих на рабочие элементы утяжки, можно считать жгут ровингов упругим;
– силами трения можно пренебречь, т.к. при обжатии жгута, выдавливаемое связующее играет роль жидкой смазки. Схема приложения сил показана на рисунке 8б.

Наибольшее давление на площадке контакта рабочего элемента утяжки равно:

$$q_0 = 0.798 \sqrt[3]{\frac{P}{D\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}}$$

где D – диаметр жгута, м; P – сила прижатия, Н; q_0 – наибольшее давление на площадке контакта, равное наибольшему сжимающему напряжению контакта, Па; E_1– модуль продольной упругости рабочего элемента, Па; E_2 – модуль упругости при сжатии жгута поперёк волокон, Па; μ_1, μ_2– коэффициенты Пуассона элементов утяжки и жгута ровинга.

Утяжки различных конструкций были исследованы при отработке технологии формования стержней с утолщениями. В таблице 2 даны некоторые результаты формования стержней разного диаметра.

Таблица 2 – Результаты исследования утяжки на стержнях с утолщениями

№ опыта	Количество рабочих элементов утяжки по Рис 6.	Обжатие цилиндрического стержня		Обжатие стержня в зоне закладного элемента	
		$Д_{стержн}$, мм	Плотность, кг/м^3	$Д_{стержн}$, мм	Плотность, кг/м^3
1	2	12,5	2180	22	2230
2	2	12,5	2130	22	2150
3	3	15,3	2100	24	2170
4	3	19,13	2090	32	2230
5	2ряда по 3	20,1	2060	32	2120
6	3	19,7	2170	28-34	2190
7	2ряда по 3	19,6	2160	28-34	2190
8	3	19	2153	22-30	2170*

* связующее на аминном отвердителе

Формование проводилось с использованием стеклоровинга 1200 - 2500 текс и связующего ЭДИ. В части опытов использовалось связующее с аминным отвердителем, имеющим бóльшую вязкость. По величине плотности ПКМ, сделанной расчетным путем, исходя из содержания связующего, видно влияние степени обжатия на плотность стеклопластика. На большем диаметре стержня в зоне закладного элемента в сравнении с основным диаметром плотность имеет большую величину, за счет большего усилия прижатия пружиной рабочего элемента к стержню.

В третьей главе приводятся результаты исследования ПКМ в условиях, имитирующих агрессивные среды нефтяных месторождений. Сделан литературный обзор источников по проблемам влияния различных сред на стеклопластик и другие ПКМ водных сред, кислых сред и сред из нефтепродуктов.

Были проведены трёхмесячные испытания ПКМ однонаправленного армирования в агрессивных средах на модельных образцах стеклопластика и базальтопластика диаметром 5,5 мм с ежемесячной проверкой их прочностных характеристик. Исследования проводились: в водной среде, в 2% растворе NaCl, 10% растворе соляной кислоты и дизельном топливе при температуре среды 20°С и 55°С. При механических испытаниях образцов диаметром 5,5 мм методом продольного изгиба определялись изгибное напряжение и модуль упругости. Подтверждено снижение прочности ПКМ, находившимся в течение 10 - 15 суток в среде, с частичным восстановлением свойств к концу 30 суток и с дальнейшим их монотонным снижением.

С учетом характера снижения прочности в течение 10 - 15 суток разработан сравнительный метод экспресс-анализа образцов микропластика, изготовленных из разных материалов. Испытания на образцах микропластика, проводившиеся методом осевого растяжения, подтвердили выводы, сделанные на модельных образцах.

Выявлено, что определяющее влияние на снижение прочности ПКМ оказывает химическое и физическое воздействие воды на структуру материала. При выдержке образцов в среде с температурой, превышающей температуру стеклования (80°С), наблюдается резкое падение прочности ПКМ. Другим важным фактором стойкости ПКМ к влиянию среды является вид и технология нанесения замасливателя. После обработки результатов были получены зависимости изменения прочностных характеристик для воды, 2 % раствора NaCl в воде, 10 % HCl и дизельного топлива. На рисунках 9 и 10 показаны изменения относительной прочности стеклопластиковой (СПА) и базальтопластиковой (БПА) арматуры в воде и дизельном топливе. В результате исследований показано, что солесодержащая среда в меньшей степени влияет на снижение прочностных характеристик, чем вода с малым содержанием солей. Наиболее сильное влияние на снижение прочности оказывает 10 % соляная кислота. Дизельное топливо оказывает меньшее влияние на снижение прочности, чем вода.

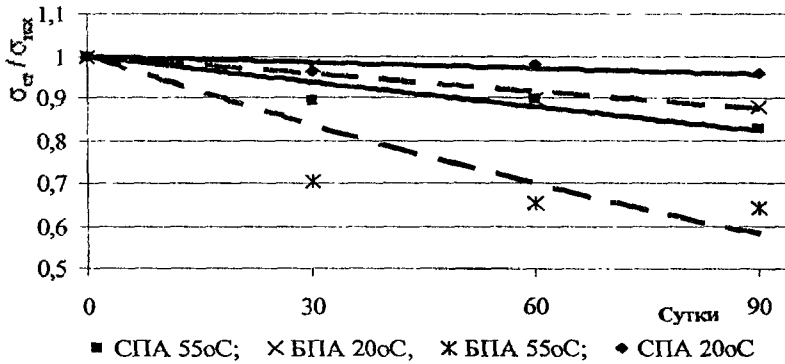


Рисунок 9 – Относительное изменение прочности СПА и БПА от времени экспозиции в воде

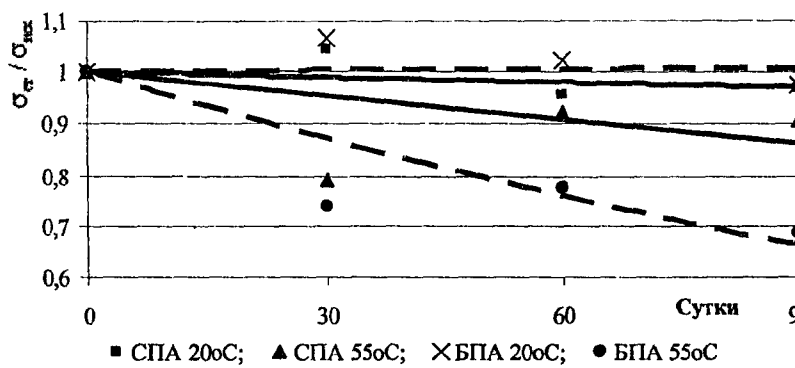


Рисунок 10 – Относительное изменение прочности СПА и БПА от времени экспозиции в дизельном топливе

Из представленных данных следует, что образцы базальтопластика на аминном отвердителе показал худшие характеристики стойкости к агрессивным средам, чем образцы стеклопластика на ангидридном отвердителе. Сравнительные испытания БПА на ангидридном и аминных отвердителях подтвердили лучшую стойкость к соляной кислоте (примерно на 50%) ПКМ с ангидридным отвердителем.

На рисунке 11 приведена зависимость прогноза прочности СПА для воды при разных температурах эксплуатации. Из прошедших старение образцов были изготовлены шлифы и получены фотографии на электронном сканирующем микроскопе ASM - 840. На рисунке 12 показаны структурные изменения СПА в водной среде. Изменения коснулись матрицы и волокон. Видно нарушение адгезии на границе волокно- матрица. Волокна получили коррозионное разрушение, что подтвердило влияние качества замасливателя волокон и технологии его нанесения на снижение прочностных характеристик ПКМ в условиях агрессивных сред.

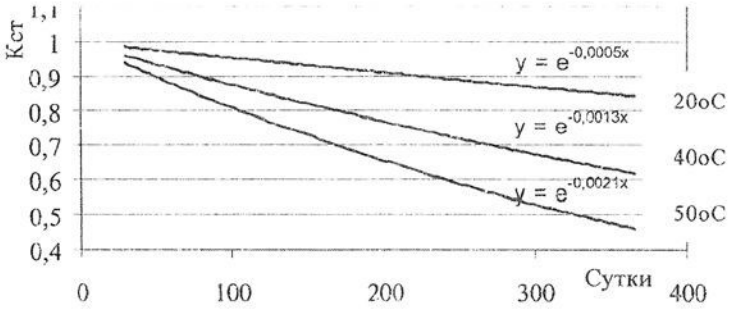


Рисунок 11 – Прогнозные характеристики снижения прочности СПА 5.5 мм в воде при разных температурах эксплуатации, полученные на основе обработки результатов 3х месячной экспозиции образцов в воде

Прогноз влияния среды на прочность показывает тенденцию снижения прочностных показателей ПКМ от времени и температуры. При этом, перенос результатов испытаний на стержни большого диаметра требует учета масштабного фактора, а также учета снижения скорости падения прочности при более длительных экспозициях, что следует из анализа литературных данных.

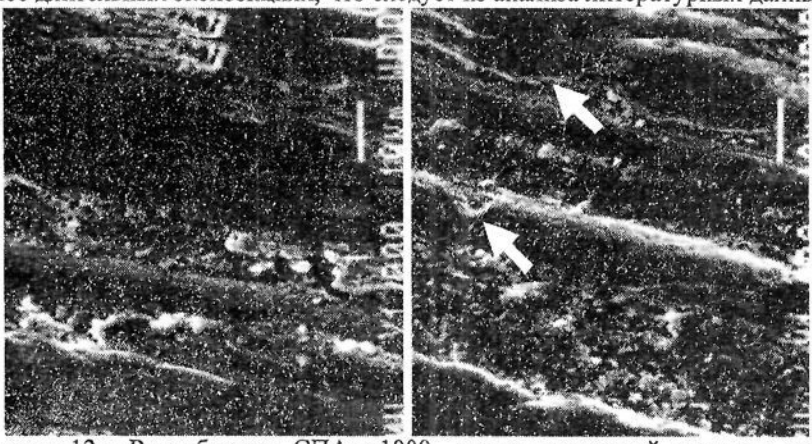
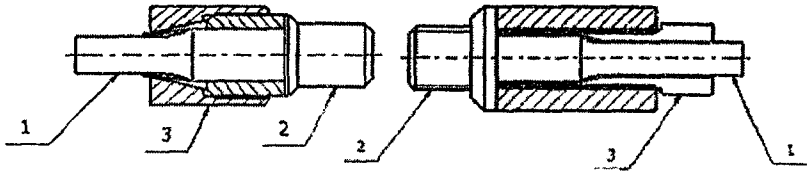


Рисунок 12 – Вид образцов СПА: х1000 , слева – исходный, справа – после выдержки в воде при 80°С в течение 90 суток (стрелками показана коррозия волокна и нарушение адгезии на границе волокно-матрица)

Анализ фотографий показывает влияние на стойкость ПКМ к агрессивным средам разделительного слоя волокно – матрица, связанное с видом замасливателя и технологией его нанесения.

В четвертой главе представлены результаты разработки конструкции ШНС и ее испытаний. Сделан сравнительный анализ конструктивных схем ШНС относительно ШНС «идеальной» конструкции (с прочностью узла соединения равной прочности стержня).

На макетных образцах исследованы варианты схем с цанговым охватом анкера и соединения с разрезной гайкой (рисунок 13). Схемы с анкерным стержнем неприменимы в ШНС из-за больших габаритов головки ШНС. Вариантом соединения с анкерным стержнем является замагываемое соединение, когда вкладышем анкера является стальной закладной элемент.



а) б)

1 – стержень с анкерным уширением; 2 – корпус; 3 – накидная гайка;
а – схема ШНС с цанговым соединением; б) – схема с разрезной гайкой

Рисунок 13 – Схемы ШНС с охватом анкерного уширения стержня

Схема заматываемого типа, когда в процессе формования в стержень вставляется закладной вматываемый элемент, обеспечивает стабильность технологии. Выбор геометрии тела закладного элемента представляет известную сложность из-за расклинивающих радиальных усилий и концентраций напряжений.

Комбинированная схема представляет собой заматываемую конструкцию, усиленную снаружи бандажом. Бандаж позволяет блокировать распирающие усилия, а форма закладного элемента может иметь сложную конфигурацию, дополняя адгезионную связь механической.

При работе с различными конструктивными схемами вматываемых закладных элементов (рисунок 14) выявлено влияние конфигурации закладных элементов на прочностные характеристики соединений. Определены диапазоны длин и диаметров закладных элементов, обеспечивающих низкие концентрации напряжений и улучшающих адгезионные связи.

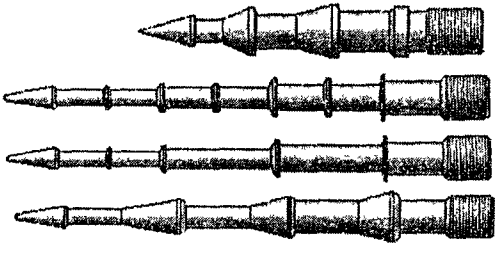


Рисунок 14 — Варианты отработанных конструкций закладных элементов

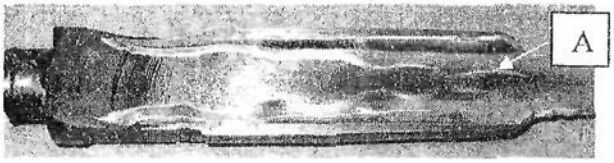


Рисунок 15 – Вид разработанной конструкции ШНС в разрезе по патенту РФ №2236542 (стрелкой показано типичное место обрыва стержня при циклических испытаниях)

В результате исследований предложена конструкция штанги с закладным элементом волнообразной формы и стальным бандажом (рисунок 15). Проведено опытное формование ШНС19 и ШНС22, отличающихся диаметрами стержня. Сделан анализ применения ШНС в реальных условиях эксплуатации. Даны результаты проверки на прочность натурных образцов ШНС. В качестве образцов использовались макеты, полученные формованием по разработанной технологии с получением стеклопластиковых стержней с вмотанными вовнутрь стержня закладными элементами. Длина макетных образцов составляла 800-1200 мм. На рисунке 16 приведены результаты статических испытаний ШНС19 и ШНС 22. Вид образцов ШНС19 после испытаний показан на рисунке 17.

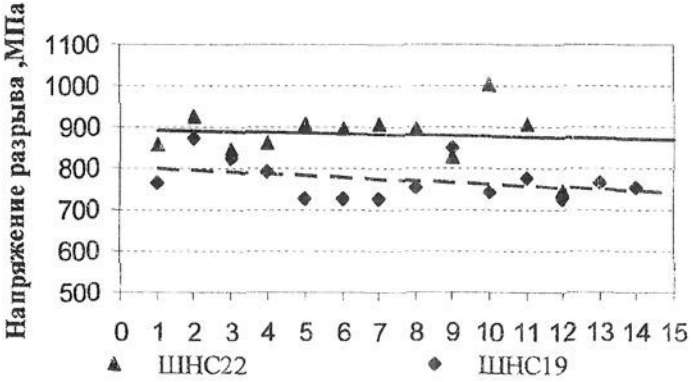


Рисунок 16 – Результаты статических испытаний на разрыв образцов ШНС19 и ШНС22

Учитывая циклический характер эксплуатационного нагружения, проведены циклические испытания ШНС. Выявлена связь между статическим и циклическим нагружениями по разрушающим напряжениям. Исследования ШНС на циклическую прочность показали, что результаты циклического нагружения соединений с анкерным уширением стержня для разных видов изделий приводит к подобным по форме зависимостям. На рисунке 18 по результатам циклических испытаний видно, что форма кривой циклической прочности СПА 5,5 мм подобна кривой, полученной для ШНС19.

Циклические испытания проводили со знакопостоянной (растягивающей) нагрузкой. Нагрузку варьировали изменением максимума в цикле при постоянном значении минимума. Значение минимального напряжения в цикле составляло 34,6 МПа для образцов ШНС и 69,3 МПа для образцов СПА. Частота колебаний нагрузки составила 230 циклов в минуту. На рисунке 19 показан вид образцов ШНС19 после циклических испытаний. Образцы ШНС разрушались по стеклопластику, расположенному внутри оконцевателя (рисунки 15,19). Подобное разрушение по анкеру наблюдалось и для СПА.

Циклические испытания выявили существенную разницу в характере разрушений по сравнению со статическими испытаниями.

Видно, что при максимальной разрывной статической нагрузке разрыв происходит в местах концентраций напряжений (рисунок 17). При циклической же нагрузке (рисунок 19) при меньших напряжениях – в месте изменения жесткости материалов в поперечном сечении соединения (сечение А рисунка 15).

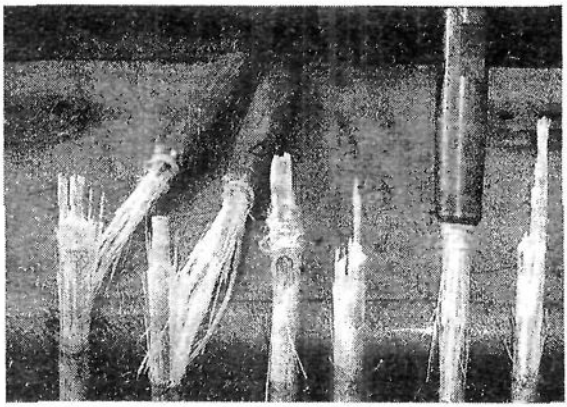


Рисунок 17 – Вид разрушений ШНС19 после статических испытаний

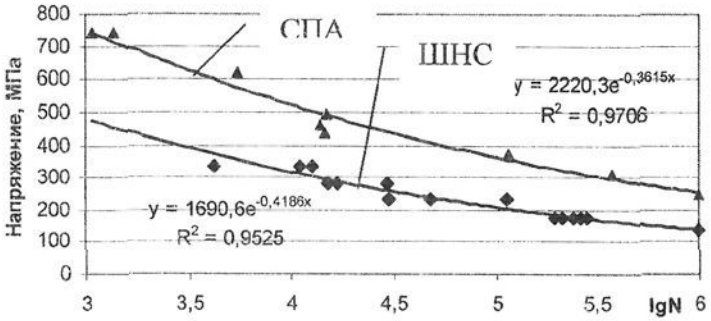


Рисунок 18 – Кривые циклической прочности ШНС19 и СПА5,5

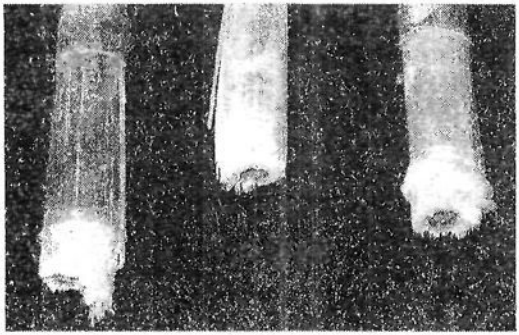


Рисунок 19 – Вид образцов ШНС19 после циклических испытаний.

Получена обобщенная зависимость циклической прочности для разных видов изделий, выраженная через относительную приведенную нагрузку, которая зависит от временной прочности, от значения максимального напряжения в цикле и от величины амплитуды в цикле. Выявленная зависимость приведена в формуле

$$\{\sigma\}=0{,}462\cdot(N\cdot 10^{-4})^{-0{,}168},$$

где N- число циклов; $\{\sigma\}$ – относительная приведенная нагрузка в цикле: $\{\sigma\}=\frac{\sqrt{\sigma_u^{max}\cdot\sigma_u^a}}{\sigma_в^{min}}\cdot\exp(0.0002\cdot\sigma_в^{min})$; $\sigma_в^{min}$ - минимальное значение временной прочности образцов, Па; σ_u^{max} - максимальное значение напряжения в цикле, Па; σ_u^a - амплитуда напряжений в цикле, Па. При 7,5 млн циклов нагружения для узлов соединения анкерного (заматываемого) типа $\{\sigma\}=0{,}152$.

Проведена оценка качества различных аналогов ШНС по предложенному автором критерию «удельная материалоёмкость». Формула разработана с учётом особенностей конструкций штанг

$$\nu=\frac{\frac{\sum m_{c/n}}{\rho_1}+\frac{\sum m_{сталь}}{\rho_2}+\frac{\sum m_{км}}{\rho_i}}{\sigma_p/\sigma_\partial}$$

где $\sum m_{c/n}$, $\sum m_{сталь}$, $\sum m_{км}$ – суммарные массы деталей, изготовленных соответственно из материалов стеклопластика, стали, композита используемого в бандаже, *кг*; $\rho_{c/n}, \rho_{сталь}, \rho_{км}$ – плотность материалов, *кг/м*^{3}; σ_p – разрушающее напряжение разрыва штанги, Па; $\sigma_\partial=\frac{F_{дин_макс}}{S}$ – напряжение от максимальной динамической нагрузки от одной штанги, отнесенной к площади сечения стержня, Па; $F_{дин_макс}=(G_g+G_f)(1+c)$ – формула Миллса;

$c = \frac{h_p \cdot n^2}{178913}$, где h_p – длина хода полированного штока ,см; n ,– число ходов (частота движения штока) насоса, мин$^{-1}$; G_g, G_f – вес штанги в воздухе и сила Архимеда. В силу малости **c:** (1+c) ≈ 1. На рисунке 20 показана диаграмма удельной материалоемкости различных вариантов и конструкций штанг.

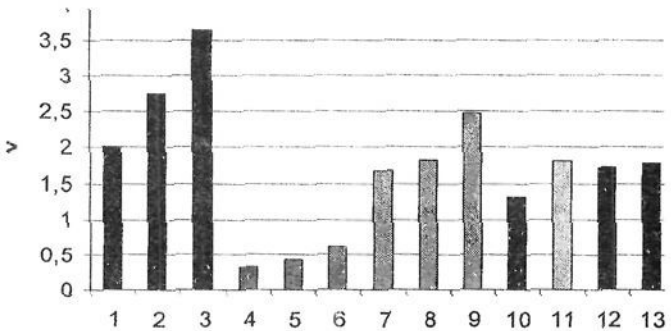


Рисунок 20 – Диаграмма удельной материалоемкости различных вариантов и конструкций штанг. 1-3 – стальные (19,22,25мм) по ГОСТ; 4-6 – ШНСи (19,22,25) «идеальные»; 7-9 – ШНС (19;22;25,4) по API; 10-13 – разработанные конструкции ШНС, в том числе, 10 – ШНС19; 11 – ШНС19 со стеклопластиковым бандажом; 12,13 – ШНС22

Анализ диаграммы показывает, что в конструкциях ШНС выполненных из материалов с более высокой удельной прочностью коэффициент удельной материалоемкости уменьшается. Условно взятая для сравнения конструкция «идеальной» ШНСи представляет собой равнопрочную (без применения стали) конструкцию, полностью реализующую прочность стеклопластика.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана и реализована на Бийском заводе стеклопластиков технология непрерывного формирования высоконагруженных узлов соединений для использования в условиях динамического нагружения стеклопластиковых насосных штанг.
2. Разработан способ и устройство узла обжатия (утяжка), позволяющие заформовывать методом радиального обжатия в стеклопластиковый стержень стальные закладные элементы головок штанг. На способ и устройство узла обжатия получен патент РФ.
3. На основе проведенных исследований составлен алгоритм расчета параметров узла обжатия стеклопластика вокруг заматываемого закладного элемента позволяющий оценить технологические параметры обжатия.
4. Установлено, что снижение прочностных свойств ПКМ в водосодержащих средах обусловлено диффузией их в полимерную матрицу,

приводящей к нарушению адгезионной связи между полимером и волокном.

5. Показано различие в характере разрушения ШНС при разных видах нагружения. При статических испытаниях разрыв стержня происходит в местах концентрации напряжений внутри узла соединения, а при циклических испытаниях при меньших напряжениях – в месте выхода стеклопластикового стержня из узла соединения.
6. Предложена конструкция стеклопластиковых насосных штанг удовлетворяющая эксплуатационным характеристикам в условиях применения их в нефтедобывающих скважинах. Конструкция ШНС отличается от своих аналогов заматываемой конструкцией соединения получаемого механизированным способом. На конструкцию ШНС получен патент РФ.

Опубликованные работы по теме диссертации

1. Патент РФ №2236542 МПК[7] Е21В 17/00.Насосная штанга./ Г.И.Русских
В.А. Башара,- №2003113137, опубл. 20.09.2004., бюл. № 26, приоритет от 05.05.2003.

2. Русских, Г.И. Насосная штанга из стеклопластика. //Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады IV Всероссийской научно-практической конференции. 1- 4 июня, г. Бийск-М.: ЦЭИ «Химмаш», – 2004. – С. 90.

3. Кузнецов, Н.П. К выбору оптимальной конструктивно-компоновочной схемы насосной штанги из стеклопластика./Н.П.Кузнецов, Г.И. Русских//Вестник Ижевского гос. техн. ун.-та. – 2004,-№4, – Ижевск: ИжГТУ, – С 13 -16.

4. Блазнов, А.Н. Стеклопластиковые стержни ООО «Бийский завод стеклопластиков» для полимерных изоляторов./А.Н.Блазнов, Ю.И.Ладыгин., А.Н.Луговой, Г.И.Русских, В.Ф.Савин // Сб. «Подвесные и опорные полимерные изоляторы: производство, технические требования, методы испытаний, опыт эксплуатации, диагностика». Материалы международной научно-технической конференции 4 - 9 окт. 2004г. – С-Петербург: ПЭИПК, – 2004, – С.57.

5. Блазнов, А.Н. Усталостная прочность стеклопластиковых стержней с оконцевателями./ А.Н. Блазнов, А.Н. Луговой, Г.И. Русских, В.Ф. Савин //Труды XIX Всероссийской конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности», Бийск, 28 - 31 августа 2005г. – Новосибирск: «Параллель», – 2005, – С.43 - 46.

6. Блазнов, А.Н Влияние методики на результат испытаний однонаправленных стеклопластиков/А.Н. Блазнов, Ю.П. Волков, А.Н.Луговой, В.Ф.Савин , Г.И. Русских// Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях. Межвуз. сборник. – Бийск: АлтГТУ, – 2005, — С.39 - 42.

7. Русских, Г.И. Исследование химической стойкости полимерных композитов на микропластике с разным типом волокна./Г.И.Русских, М.А. Титова, О.Г. Силинская, Ю.Г.Афанасьев // Техника и технология производ-

ства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VI Всероссийской научно-практической конференции 31 мая-2 июня 2006 г. (г. Белокуриха). – М.: ФГУП «ЦНИИХМ»,— 2006, — С. 218 -220.

8. Патент РФ № 2274715, МПК[7] Е04 С5/07 Способ изготовления стержня переменного сечения из композиционного материала и установка для его осуществления./ Башара В.А., Гаврилов В.В., Дробышев В.А. Кархин С.А., Русских Г.И., 200428397/03, опубл.20.04.2006, бюл. № 11, приор. 24.09.04г.

9. Русских, Г.И. Технология формования композитных стержней способом радиального обжатия. Ч.1.Анализ конструкций утяжек. / Г.И.Русских, Ю.Г. Афанасьев // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2-2. – С. 134 -140.

10. Русских, Г.И. Технология формования композитных стержней способом радиального обжатия. Ч. 2.Метод расчёта./Г.И.Русских, Ю.Г.Афанасьев // Ползуновский вестник, – 2006. – № 2 – 2. – С. 140 - 147.

11. Русских, Г.И. Оценка качества конструкций насосных штанг по критерию «удельная материалоемкость»/ Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды» 6 - 7июля 2006г. – Бийск: АлтГТУ, – С. 254 - 259.

12. Русских, Г.И. Влияние агрессивных сред на прочность полимерных композитов/ Г.И.Русских, Ю.Г. Афанасьев//Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Материалы 5-ой Всероссийской научно-практической конференции 21 - 22 сентября 2006 года. – Бийск: Алт ГТУ, БТИ. – 2006. – С. 126 - 131.

Сдано в набор 07.03.2007. Подписано в печать 16.03.2007.
Формат 60х84/16. Гарнитура Times. Бумага офсетная.
Печать оперативная.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз.

Отпечатано в полном соответствии с авторским оригиналом.

ООО "Издательство "Формат"
г. Бийск, пер. Муромцевский, 2