

**ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ՄԵԽԱՆԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ**

ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ ՆԱՐԻՆԵ ՍԵՐԳԵՅԻ

**ՇԵՐՏԱՎՈՐ ԱՊԱԿԵՊԼԱՍՏԵ ՍԻՄԵՏՐԻԿ ԵՎ ՈՉ ՍԻՄԵՏՐԻԿ
ԱՄՐԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ԽՈՂՈՎԱԿԱՋԵՎ ԲԱՐԱԿԱՊԱՏ ՏԱՐԵՐԻ
ԴԵՖՈՐՄԱՑԻՄԸ ԵՎ ՔԱՅՔԱՑՈՒՄԸ ՏԱՐԲԵՐ ՈՒԺԻՄՆԵՐՈՎ
ԲԵՌՆԱՎՈՐՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ**

Ա.02.04 «Դեֆորմացվող պինդ մարմնի մեխանիկա» մասնագիտությամբ
տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական
աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2026

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ**

ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ

МУРАДЯН НАРИНЕ СЕРГЕЕВНА

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ СИММЕТРИЧНО И
АСИММЕТРИЧНО АРМИРОВАННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБЧАТЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СЛОЙСТОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук по специальности
01.02.04 - "Механика деформируемого твёрдого тела"

ЕРЕВАН 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԿԳՄՄՆ Մեխանիկայի
ինստիտուտում:

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ. Կորյուն Աշոտի Կարապետյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆ-մ.գ.դ. պրոֆեսոր Կարո Լերենցի Աղայան

տ.գ.թ., դոցենտ Հայկ Լևոնի Լևոնյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի Պետական Համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2026 թ. օգոստոսի 31-ին, ժամը 14:00-ին ՀՀ ԿԳՄՄՆ
Մեխանիկայի ինստիտուտում (հասցեն՝ Երևան, Մարշալ Բաղրամյան պող., 24/2)
գործող Մեխանիկայի-047 մասնագիտական խորհրդում:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԿԳՄՄՆ Մեխանիկայի ինստիտուտի
գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է՝ 2026 թվականի հուլիսի 29-ին:

047 մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտոր  Ա.Ա.Սահակյան

Тема диссертации утверждена в Институте механики МОНКС РА

Научный руководитель: д.т.н. Корюн Ашотович Карапетян

Официальные оппоненты: д.ф-м.н., профессор Каро Леренцович Агаян

к.т.н., доцент Гайк Левонович Левонян

Ведущая организация: Ереванский Государственный Университет

Защита диссертации состоится 31-ого августа 2026 г. в действующем при Инсти-
туте механики НАН РА по адресу: 0019, Ереван, пр. Маршала Баграмяна, 24/2
специализированном совете Механика -047.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики МОНКС РА.

Автореферат разослан 29-ого июля 2026 года.

Ученый секретарь специализированного совета 047,
доктор физико-математических наук



А.В.Саакян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из разновидностей композиционных материалов с управляемыми механическими свойствами являются армированные пластики (АП). Благодаря сбалансированности механических свойств, высокой удельной прочности и простоте переработки материала в изделие, АП еще с 70-80-ых годов прошлого столетия начали применять с целью изготовления слабонагруженных элементов и отдельных частей корпусов самолетов, планеров, судов, цилиндрических емкостей, предназначенных для хранения и транспортировки разных сред, находящихся под невысоким давлением, фитингов и т.п.

В результате разработки новых видов полимерных связующих с повышенными физико-механическими и адгезионными свойствами и улучшения индивидуальных характеристик армирующих наполнителей (стеклянные, углеродные, органические тонкие волокна) была расширена сфера применения АП. В настоящее время наблюдается бурное развитие этой тенденции.

Ответственные тонкостенные элементы современных конструкций типа балок, пластин и оболочек вращения из АП (угле-органо-стеклопластики) в последнее время стали применяться в аэрокосмической и военной промышленности, судостроении, транспортном машиностроении, в инфраструктуре (например, здания, мосты) и других областях.

Для успешной реализации дальнейшего расширения сфер применения АП необходимо расширить надежные данные о влиянии специфических особенностей материалов на деформационное поведение и разрушение изготовленных из них элементов при разнородных силовых воздействиях с целью полного учета этих данных на этапе проектирования конструкций.

Особенности механических свойств АП обусловлены как конструкционным их строением, так и естественными (старение - изменение свойств материала во времени) и технологическими факторами (разориентация направления армирующего материала компонента от предусмотренного и его искривление), чувствительностью к продолжительности действия нагрузки, проявляющейся уже при комнатной температуре (ползучесть материала) и др.

Одними из главных специфических недостатков, обусловленных конструкционным строением АП со слоистой и волокнистой структурой, являются их слабое сопротивление сдвигу, как межслойному, так и в плоскости армирования, и сильно выраженная сдвиговая ползучесть.

Одновременно практика подтверждает целесообразность (в некоторых случаях и экономическую) применения АП с целью изготовления из них цилиндрических оболочек вращения (например, автомобильные карданные валы, полые оси быстровращающихся роторов, высокоскоростных центробежных газогенераторов, роторных систем и др.), которые при эксплуатации, в основном, подвергаются чистому сдвигу, а иногда - и сдвигу, комбинированному с разнородными силовыми факторами, зачастую в условиях интенсивной вибрации. Оптимальное проектирование таких конструкций и конструкционных элементов можно

осуществлять с обязательным учетом экспериментально подтвержденных данных о специфике деформационного поведения и разрушения и о демпфирующих свойствах композитов и изготовленных из них конструкционных элементов в условиях, близких к эксплуатационным.

Для конструкций из композитов, в том числе и из АП, наиболее актуальным является вопрос оценки их работы в условиях сложного нагружения и сложного напряженно-деформированного состояния и усталости. Это вызвано тем, что в реальных условиях эксплуатации конструкции подвергаются комбинированным воздействиям статических или циклически изменяющихся разнородных силовых факторов. При этом возникающие в материале напряжения можно воссоздать приложением адекватной схемы статических и циклических растягивающих или сжимающих усилий и крутящих моментов.

Основной целью диссертационной работы является установление закономерностей изменения:

- деформируемости и разрушения симметрично армированных относительно оси тонкостенных труб из стеклопластика на основе ткани полотняного плетения с основным перекрытием (ППСОП) в условиях сложно-комбинированного нагружения кручением и внутренним гидростатическим давлением (растяжение труб в окружном направлении);
- деформационного поведения и диссипации энергии симметрично и асимметрично армированных тонкостенных труб из тканевого стеклопластика в процессе нагружения пульсирующим внутренним гидростатическим давлением;
- формулирование практических предложений, направленных на оптимальное проектирование изготовленных из тканевых стеклопластиков тонкостенных трансмиссионных полых валов с повышенной несущей способностью при кручении и цилиндрических тонкостенных резервуаров, предназначенных для эксплуатации в условиях воздействия пульсирующего внутреннего гидростатического давления.

Научная новизна работы:

1. Установлено монотонное снижение несущей способности при внутреннем гидростатическом давлении симметрично армированных тонкостенных труб из тканевого стеклопластика по мере увеличения уровня крутящего момента, приложенного на испытуемый объект на первом этапе нагружения.
2. Выявлено существенное увеличение (примерно на 40%) несущей способности при кручении симметрично армированных тонкостенных труб из тканевого стеклопластика находящихся под постоянным воздействием внутреннего гидростатического давления, соответствующего 0,4 доли от предельной величины этой механической характеристики.
3. Подтверждено возникновение циклических продольных деформаций, сопутствующих циклическим основным окружным деформациям одних и тех же симметрично армированных тонкостенных труб из тканевого стеклопластика, подвергаемых воздействию пульсирующего внутреннего гидростатического давления,

4. Установлено образование циклических, продольных и сдвиговых деформаций, сопутствующих циклическим основным окружным деформациям одних и тех же асимметрично армированных тонкостенных труб из тканевого стеклопластика в процессе нагружения их пульсирующим внутренним гидростатическим давлением
5. Обосновано существенное увеличение (более чем на 20%) относительного коэффициента рассеяния (диссипации) энергии цикла Ψ в процессе пульсирующего внутреннего гидростатического давления тонкостенных труб из тканевого стеклопластика, возникаемое вследствие искажения симметричности армирования относительно оси труб в пределах $\pm 8^\circ$.

Практическая значимость. На основе сравнения данных, установленных прямыми измерениями, сформулированы следующие практические рекомендации:

- облегчение условий эксплуатации симметрично армированных относительно оси трансмиссионных полых валов машин из тканевого стеклопластика, предназначенных для передачи крутящего момента, и увеличение тем самым срока их надежной службы, в том числе и при возможном возникновении из-за различных причин непредусмотренных пульсирующих крутящих моментов, можно достичь предусмотрением:
 - демпферов по гашению колебаний крутящего момента, установленных в соответствующих узлах машин,
 - ориентированных ребер жесткости во взаимно - перекрестных направлениях на поверхности валов, оказывающих возможно максимальное сопротивление относительно деформаций сдвига;
- с целью увеличения срока надежной службы тонкостенных цилиндрических резервуаров из тканевого стеклопластика, предназначенных для эксплуатации в условиях воздействия пульсирующего внутреннего гидростатического давления (например, баллоны из композитов или металлические баллоны, усиленные снаружи тканевыми пластиками), целесообразно:
 - ставить ограничения на величину внутреннего рабочего давления $\sigma_{\theta\theta} \leq 0,45\sigma_{\theta\theta}^p$ ($\sigma_{\theta\theta}^p$ – окружное напряжение разрушающее резервуар), так как в таких условиях изделие подвергается только укорочению, а при $\sigma_{\theta\theta} > 0,45\sigma_{\theta\theta}^p$ - начальное укорочение изделия вызывает его удлинение,
 - предусмотреть на поверхности резервуаров как окружных, так и симметрично относительно оси расположенных ребер жесткости таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное сопротивление относительно как радиальных, так и продольных деформаций;
 - повышение не более чем на 20% демпфирующих свойств тонкостенных цилиндрических резервуаров из стеклопластика на основе ткани ППСОП, предназначенных для эксплуатации в условиях пульсирующего воздействия внутреннего гидростатического давления, можно достичь технологическим методом решения задачи. А именно - изготовление емкостей осуществлять таким образом, чтобы величина угла между направлениями их оси и основными волокнами вязки армирующей материал стеклоткани составляла примерно $\varphi = \pm 8^\circ$.

Обоснованность и достоверность. Представленные в диссертационной работе основные результаты были получены прямыми экспериментами, повторяемость

которых соответствует требованиям соответствующих стандартов и апробированных рекомендаций. Выявленные некоторые закономерности в частных случаях согласуются с закономерностями, установленными другими авторами при проведении исследований задач, примыкающих к рассмотренным в данной работе.

Основные положения, выносимые на защиту:

- базированные на известных оптимизированных положениях методы и разработанные автором подходы, применяемые при решении задач, включенных в рамках диссертационной работы;
- обоснование выбранной технологии изготовления испытываемых объектов, их размеров, режимов проведения соответствующих экспериментов, применяемых при испытаниях измерительных приборов и приспособлений, в том числе и разработанных автором;
- результаты исследования деформируемости и разрушения симметрично армированных относительно оси тонкостенных трубчатых элементов из тканевого стеклопластика в условиях сложного нагружения крутящим моментом и внутренним гидростатическим давлением (растяжение труб в окружном направлении) при различных соотношениях и очередностях приложения их на испытываемый объект;
- установленное влияние возможного технологического нарушения симметричности армирования в небольших пределах на закономерности изменения деформативных свойств, сопротивления разрушению и относительного коэффициента рассеяния энергии цикла тонкостенных труб из тканевого стеклопластика в процессе статического и циклического (пульсирующего) нагружения их внутренним гидростатическим давлением соответственно;
- сформулированные предложения, направленные на оптимальное проектирование изготовленных из тканевого стеклопластика тонкостенных трансмиссионных полых валов и цилиндрических резервуаров, предназначенных для эксплуатации, в основном, в условиях чистого сдвига и при пульсирующем внутреннем гидростатическом давлении соответственно.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- VI Международной конференции "Актуальные проблемы механики сплошной среды" (Дилижан, Армения, 2018г.);
- IX Международной конференции "Актуальные проблемы механики сплошной среды" (Цахкадзор, Армения, 2025г.);
- семинарах Лаборатории экспериментальных исследований Института механики НАН РА (Ереван, 2018-2025 гг.).

Диссертационная работа в целом обсуждалась на заседании Лаборатории экспериментальных исследований Института механики НАН РА (2025 г.) и на общем семинаре Института механики МОНКС РА (2026 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано семь научных статей, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов и списка цитируемой литературы, содержащего 154

наименования. Общий объем работы составляет 133 страницы печатного текста и содержит 1 таблицу и 23 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, изложено краткое содержание работы.

Первая глава посвящена обоснованию примененных автором методик проведения исследования задач, включенных в рамках работы. При выборе известных методов и разработке новых подходов к решению этих задач были учтены известные основные оптимизированные положения, краткое содержание которых приводится ниже.

Как известно, на этапе обработки данных экспериментов с применением опытных образцов из АП обычно пользуются теориями, разработанными для однородных анизотропных материалов. Однако, поскольку АП являются составными неоднородными (гетерогенными) материалами, то оптимальное решение упомянутого этапа исследования осуществляется известным из литературы допустимым переходом от гетерогенной к однородной сплошной среде. Суть этого перехода, или так называемого метода энергетического сглаживания, заключается в том, что армирующие ингредиенты АП, так сказать, размазываются по объему композита, и среда рассматривается как однородная, но обладающая новыми свойствами, зависящими от свойств входящих в состав АП ингредиентов. При этом принимается, что в направлении армирования главную роль играет армирующий материал ингредиент, а в трансверсальных плоскостях – связующий компонент (полимерная матрица), и считается, что такую идеализированную среду можно применять как однородную анизотропную.

Применение упомянутого выше перехода осуществляется введением трех уровней описания модели изделия из АП (рис.1.). Допускается, что масштаб нижнего уровня h , уровня структурной неоднородности, равен размеру армирующих материал ингредиентов (диаметру волокна, толщине армирующего монослоя). Следующим уровнем H служит тот, на котором возможна замена неоднородной среды эквивалентным по прочности и жесткости материалом, и тогда могут быть определены макроскопические характеристики композита из макроскопических опытов

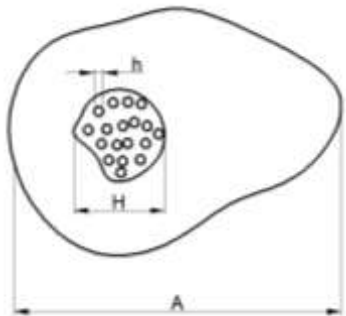


Рис 1. Известная схема модели изделия из армированных пластиков

(механические испытания). Самый высокий уровень, масштаб которого на рис.1. обозначен через A , принимается равным характерному размеру изделия. При этом

считается, что на этом уровне возможно получить аналитические зависимости, связывающие приложенное усилие и экспериментально определенные перемещения, деформации.

Отмеченное выше указывает на то, что при большом числе армирующих ингредиентов композит может быть рассмотрен как однородный анизотропный материал.

При проведении механических испытаний опытных образцов из АП точность измеряемой деформации существенным образом зависит как от способа закрепления образцов в испытательное оборудование, так и от процесса нагружения (т.е. соблюдения принципа Сен-Венана). При этом считается, что внешние возмущения, вносимые самоуравновешенной системой усилий, в случае анизотропных материалов затухают неодинаково по различным направлениям, т.е. проявление принципа Сен-Венана для таких материалов оказывается анизотропным, а именно - в направлении наибольшей жесткости материала внешние возмущения затухают медленнее, а в направлении наименьшей жесткости – быстрее, в результате чего область возмущения вытягивается в направлении наибольшей жесткости.

Одной из хорошо изученной и наиболее распространенной методикой механических испытаний АП является одноосное растяжение изготовленных из таких материалов опытных плоских образцов с прямоугольным сечением. Эта методика стандартизирована во многих развитых странах мира, в том числе и в Республике Армения. Показатели основных механических характеристик (прочность Π_{11}^+ , модуль упругости E_{11}^+ , коэффициент Пуассона ν_{21}), устанавливаемые этими стандартами, обычно используются с целью паспортизации АП.

Определение показателей механических характеристик АП, возникающих в плоскости укладки арматуры при чистом сдвиге материала, можно осуществлять перекашиванием пластины (этот метод испытания стандартизирован), кручением тонкостенных труб, кручением или растяжением пластины.

Среди перечисленных выше методов испытания сравнительно универсальным, т.е. позволяющим оценить жесткость, а также прочность (предел разрушающего напряжения) при сдвиге является метод кручения тонкостенных трубчатых образцов из АП.

Доказано, что при кручении геометрически точных тонкостенных труб из АП распределение касательных напряжений по окружности и длине опытных образцов оказывается равномерным, а если толщина h опытного трубчатого образца достаточно мала по сравнению со средним его радиусом R , то можно пренебречь и изменением деформаций сдвига по толщине. При этом такая однородность для стеклопластиковых труб обеспечивается при соблюдении условия $R/h \geq 10$. Для удовлетворения этого условия минимальную длину L опытного трубчатого образца между захватами испытательной машины можно определить зависимостью $L = \ell + 4R$, где ℓ – база измерения продольных деформаций труб.

Трубчатые опытные образцы из АП, изготавливаемые обычно методом намотки волокна или ткани, могут быть испытаны на осевое растяжение и сжатие, на кручение, внутренним или наружным давлением, в том числе и гидростатическим. Форма таких образцов позволяет указанные силовые факторы приложить на испытуемый объект как раздельно, так и комбинированно - в различных их очередностях и сочетаниях.

В результате испытаний трубчатых образцов из АП на осевое растяжение или сжатие определяются пределы их прочности (разрушающего напряжения) P_{ZZ}^+ или P_{ZZ}^- , приведенного модуля упругости $\bar{E}_{ZZ}^+$ или $\bar{E}_{ZZ}^-$, коэффициента поперечных деформаций $\bar{\nu}_{\theta Z}$ (аналог коэффициента Пуассона упругого тела).

В результате испытания на простое кручение тонкостенных труб из АП определяются величины сдвиговых характеристик материала в плоскости укладки армирующего ингредиента: достаточно надежно приведенного модуля сдвига материала $\bar{G}_{\theta Z}$ и сравнительно менее точно - прочности (разрушающего напряжения) при чистом сдвиге $P_{\theta Z}$.

В результате испытаний трубчатых образцов из АП в условиях внутреннего гидростатического давления (растяжение в окружном направлении труб) определяются величины приведенного окружного модуля упругости $\bar{E}_{\theta\theta}$ и прочности (разрушающего напряжения) в окружном направлении $P_{\theta\theta}$.

Упомянутые выше основные положения и подходы, а также соответствующие апробированные рекомендации были учтены как при выборе оптимальных размеров испытываемых опытных трубчатых образцов, так и при решении соответствующих задач.

Для осуществления экспериментальной части исследований было изготовлено необходимое количество соответствующих стеклопластиковых трубчатых образцов с рекомендуемыми размерами (с внутренним диаметром 38 мм, толщиной стенки 2,25 мм и длиной 285 мм). Была использована стеклоткань полотняного плетения с основным перекрытием марки Т-23 (ТУ 6-11-231-76) с толщиной 0,27 мм. Связующее для стеклопластика изготавливалось на основе эпоксифенольных смол. Величина коэффициента армирования стеклопластика составляет $\mu = 0,45$

$$(\mu_{\text{основа}} = 0,28, \mu_{\text{уток}} = 0,16).$$

Опытные трубчатые образцы из слоистого стеклопластика с различной ориентацией армирующего ингредиента относительно их оси были изготовлены технологическим методом, известным в литературе как метод самопрессования.

Одним из важных этапов исследования деформационного поведения исследуемого объекта при различных силовых воздействиях является точное и надежное измерение деформаций. Для проведения одновременного измерения угловых, продольных и окружных деформаций, возникающих у одного и того же трубчатого образца,

подвергаемого кратковременному или циклически действующему кручению или внутреннему

гидростатическому давлению, а также в случае комбинированного их приложения на испытуемый объект было использовано имеющееся в Институте механики НАН РА специальное приспособление, которое хорошо зарекомендовало себя в процессе проведения экспериментов (рис.2).

Известно, что при проведении испытаний на внутреннее гидростатическое давление трубчатых образцов из АП первостепенной задачей становится создание равномерного внутреннего давления в них и обеспечение целостности труб вплоть до разрушения. С целью удовлетворения этих требований автором работы было разработано и изготовлено специальное устройство, предназначенное для испытания опытных трубчатых образцов на внутреннее гидростатическое



Рис.2. Опытный трубчатый образец с приспособлением измерения деформаций установленный на испытательной машине ZDMU-30T.

давление, а также на комбинированное воздействие внутреннего давления и крутящего момента.

Все кратковременные и циклические испытания опытных трубчатых образцов из слоистого стеклопластика были проведены на трехосной разрывной машине немецкого производства марки ZDMU-30T (рис.2), согласно разработанным автором методам.

Вторая глава диссертационной работы посвящена исследованию деформируемости и сопротивления разрушению тонкостенных труб из слоистого стеклопластика в условиях сложного нагружения крутящим моментом и внутренним гидростатическим давлением при различных очередностях и соотношениях приложения их на испытуемый объект.

Были использованы симметрично армированные относительно оси трубы, изготовленные из стеклопластика на основе ткани ППСОП (величина угла между направлениями основных волокон вязки армирующей композит стеклоткани и оси труб составляет $\varphi = 0^\circ$).

Предварительно применением одной части стеклопластиковых трубчатых опытных образцов с внешним диаметром 39,7 мм и длиной рабочей части 60 мм (они были получены из упомянутых в главе 1 стеклопластиковых труб путем шлифования через 30 лет после их изготовления) определяли пределы сопротивления разрушению труб при одноосном внутреннем гидростатическом давлении ($\sigma_{\theta\theta}^p = 458,2$ МПа) и при простом кручении ($\tau_{\theta z}^p = 36,2$ МПа). Остальная часть трубчатых опытных образцов использовалась с целью проведения исследований, результаты которых рассматриваются ниже.

В первом разделе главы исследован вопрос сопротивления деформированию и разрушению при внутреннем гидростатическом давлении стеклопластиковых тонкостенных труб, находящихся под постоянным воздействием крутящего момента различных уровней.

С этой целью опытные трубчатые образцы предварительно были нагружены крутящим моментом определенного уровня (соответствующего 0,4, 0,6 и 0,8 $\tau_{\theta z}^p$), а затем, сохраняя эту нагрузку постоянной, они были доведены до разрушения путем ступенчатого увеличения в трубах внутреннего гидростатического давления.

Было установлено, что предварительное приложение крутящего момента M_k , соответствующего 0,4 $\tau_{\theta z}^p$, мало влияет на разрушающее напряжение в окружном направлении $\sigma_{\theta\theta}^p$ стеклопластиковых труб. Величины $\sigma_{\theta\theta}^{ip}$ стеклопластиковых труб, предварительно нагруженных крутящими моментами, соответствующими 0,6 $\tau_{\theta z}^p$ и 0,8 $\tau_{\theta z}^p$, оказались, соответственно, примерно на 24% и 28% меньшими по сравнению со значением $\sigma_{\theta\theta}^p$.

Уменьшение величины $\sigma_{\theta\theta}^{ip}$, наблюдаемое у стеклопластиковых труб, предварительно нагруженных крутящим моментом высоких уровней, объясняется, в основном, продолжающимся в процессе увеличения внутреннего гидростатического давления неравномерного развития внутренних напряжений в армирующем материал ингредиенте, и это развитие оказывается тем интенсивнее, чем выше уровень крутящего момента, постоянно действующего на трубчатый образец.

Выявлено, что связь между растягивающими напряжениями в окружном направлении $\sigma_{\theta\theta}$ и окружными деформациями $\varepsilon_{\theta\theta}$ (основные деформации, зарегистрированные в направлении действия напряжения, увеличивающегося в процессе испытания) стеклопластиковых труб носит практически прямолинейный характер, что объясняется структурной особенностью утковых волокон армирующей материал стеклоткани типа ППСОП. При этом чем выше уровень M_k , предварительно приложенного на опытный трубчатый образец, тем меньше сопротивляемость труб относительно окружных деформаций.

Показано, что в процессе повышения уровня $\sigma_{\theta\theta}$ появляются и развиваются существенные сдвиговые деформации $\gamma_{\theta z}$, сопутствующие основным окружным деформациям $\varepsilon_{\theta\theta}$ одних и тех же стеклопластиковых трубчатых образцов, и эти деформации оказываются тем существеннее, чем выше уровень M_k , предварительно приложенного на испытуемый образец.

В случае $M_k=0$ деформации сдвига у труб не наблюдаются.

Установлено, что в случае одноосного внутреннего гидростатического давления ($\tau_{\theta z} = 0$) увеличение напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ до некоторого уровня (в данном случае до $\sigma_{\theta\theta} = 205,7$ МПа, когда $\sigma_{\theta\theta}/\sigma_{\theta\theta}^p \approx 0,45$) приводит к монотонному укорочению стеклопластиковых трубчатых образцов, продольные деформации которых достигают $\varepsilon_{zz} \approx 0,63 \times 10^{-3}$. При дальнейшем увеличении $\sigma_{\theta\theta}$ наблюдается монотонное удлинение труб, величина которого достигает $\varepsilon_{zz} \approx 0,81 \times 10^3$ (рис.2.1).

Аналогичное явление наблюдается и при увеличении уровня напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ на стеклопластиковые трубы, предварительно нагруженные крутящими моментами, соответствующими $\tau_{\theta z} = 0,4$ $\tau_{\theta z}^p = const$ и $\tau_{\theta z} = 0,6$ $\tau_{\theta z}^p = const$. Однако в этих случаях происходящее максимальное укорочение труб наблюдается при сравнительно низких уровнях напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ (рис.3).

В процессе пошагового увеличения уровня напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ на стеклопластиковые трубы, находящиеся под постоянным воздействием крутящем момента M_k , соответствующего $\tau_{\theta z} = 0,8$ $\tau_{\theta z}^p$, происходит монотонное удлинение труб (рис.3).

Деформирование в направлении оси стеклопластиковых труб, наблюдаемое в ходе увеличения одноосного внутреннего гидростатического давления (при $\tau_{\theta z} = 0$), можно объяснить, в основном, параллельно развивающимися деформациями, обусловленными факторами приобретения трубами некоторой бочкообразной формы и выпрямления регулярно искривленных основных волокон вязки армирующей материал стеклоткани. При этом при низких уровнях $\sigma_{\theta\theta}$ упомянутый выше первый фактор превалирует над вторым фактором, в результате чего наблюдается начальное укорочение труб. А при высоких уровнях $\sigma_{\theta\theta}$ имеет место обратное явление, приводящее к постепенному удлинению труб.

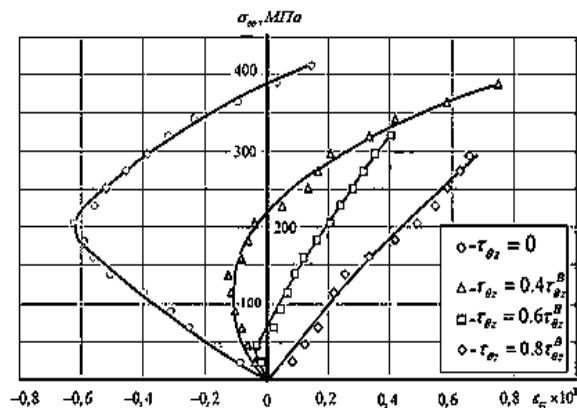


Рис.3. Кривые, описывающие деформирование стеклотканевых труб в продольном направлении ϵ_{zz} , подвергаемых внутреннему гидростатическому давлению в условиях постоянно действующего крутящего момента ($\tau_{\theta z}$) различных уровней.

В случае сложного нагружения на деформационное поведение в направлении оси стеклопластиковых труб, кроме упомянутых выше факторов, существенную роль могут сыграть деформации сдвига, возникающие от предварительного приложения к трубам постоянного крутящего момента различных уровней, а также сдвиговая ползучесть труб, появляющаяся в ходе пошагового увеличения уровня внутреннего гидростатического давления.

Во втором разделе главы обсуждаются результаты исследования зависимости сопротивления деформированию и разрушению симметрично армированных относительно оси стеклопластиковых труб от внутреннего гидростатического давления при нагружении ступенчато увеличивающимся крутящим моментом.

При проведении экспериментальной части исследования стеклопластиковые трубчатые опытные образцы предварительно были нагружены внутренним гидростатическим давлением определенного уровня (соответствующего 0,4, 0,6 и 0,8 $\sigma_{\theta\theta}^p$), а затем, сохраняя эту нагрузку постоянной, они были доведены до разрушения путем приложения ступенчато увеличивающегося крутящего момента.

Было установлено, что величина разрушающего напряжения при кручении стеклопластиковых труб $\tau_{\theta z}^{ip}$, предварительно нагруженных внутренним гидростатическим давлением, соответствующим 0,4 $\sigma_{\theta\theta}^p$, оказывается примерно на 40% выше по сравнению с определенным при простом кручении $\tau_{\theta z}^p$ идентичных трубчатых образцов. Величины разрушающего напряжения при кручении стеклопластиковых труб $\tau_{\theta z}^{ip}$, находящихся под воздействием окружного напряжения 0,6 $\sigma_{\theta\theta}^p$ и 0,8 $\sigma_{\theta\theta}^p$, оказываются, соответственно, примерно на 22% и на 47% меньшими по сравнению со значением $\tau_{\theta z}^p$.

Существенное увеличение разрушающего напряжения при кручении стеклопластиковых труб, находящихся в условиях $\sigma_{\theta\theta} = 0,4 \sigma_{\theta\theta}^p = const$, объясняется, в основном, более равномерным распределением внутренних напряжений, возникающих между волокнами вязки армирующей материал стеклоткани в процессе испытания. При этом наблюдаемое уменьшение $\tau_{\theta z}^{ip}$ стеклопластиковых труб, предварительно нагруженных внутренним давлением высоких уровней, связано, в основном, с тем, что трубы еще до начала процесса кручения приобретают некоторую бочкообразную форму, приводящую к увеличению податливости труб относительно кручения.

Показано, что пошаговое повышение уровня крутящего момента приводит к монотонному увеличению деформаций сдвига $\gamma_{\theta z}$ (основные деформации) тонкостенных стеклопластиковых труб в рассматриваемых здесь случаях испытания. При этом скорость нарастания этих деформаций оказывается тем существеннее, чем выше уровень внутреннего гидростатического давления, предварительно приложенного на трубу.

Выявлено, что в условиях простого кручения (при $\sigma_{\theta\theta} = 0$) в процессе повышения крутящего момента, кроме увеличения угловых деформаций ($\gamma_{\theta z}$), происходит и монотонное уменьшение с переменнo изменяющейся скоростью деформаций в окружном направлении стеклопластиковых трубчатых образцов (происходит сужение труб).

В случае сложного нагружения пошаговое повышение крутящего момента приводит к увеличению с возрастающей скоростью деформации $\epsilon_{\theta\theta}$ (происходит расширение труб), при чем более существенному, чем выше уровень предварительно приложенного к трубам внутреннего гидростатического давления.

Показано, что в условиях простого кручения пошаговое увеличение крутящего момента приводит к монотонному укорочению труб, сопутствующему основным угловым (сдвиговым) деформациям этих же труб (рис.4). Такое поведение продольных деформаций можно объяснить постепенным искажением начального угла (направления) основных волокон армирующей материал стеклоткани, происходящим в результате развития угловых деформаций (деформации сдвига) в процессе пошагового увеличения крутящего момента, а также сужением (см. выше) и развитием сдвиговой ползучести труб, происходящими в течение этого процесса.

В случаях кручения стеклопластиковых труб, предварительно нагруженных внутренним гидростатическим давлением различных уровней, происходит начальное их удлинение и дальнейшее укорочение. При этом величины начального максимального удлинения и действующего на стеклопластиковые трубы касательного напряжения, под воздействием которого происходит изменение направления деформирования в направлении оси, существенным образом зависят от уровня предварительно приложенного к трубам внутреннего гидростатического давления (рис.4).

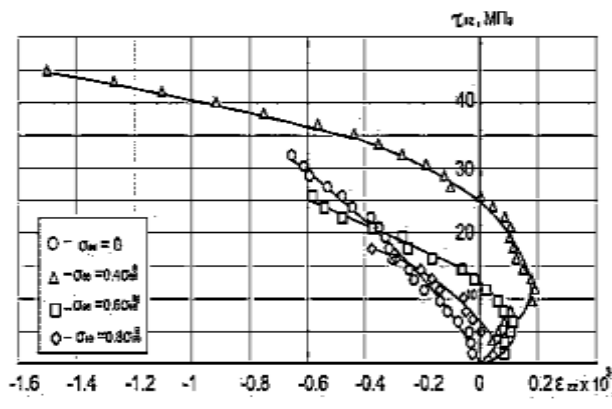


Рис. 4. Кривые, описывающие деформирование стеклопластиковых труб в продольном направлении ε_{zz} , подвергаемых кручению в условиях постоянно действующего внутреннего гидростатического давления ($\sigma_{\theta\theta}$) различных уровней

Деформационное поведение в осевом направлении, наблюдаемое в процессе увеличения крутящего момента на стеклопластиковые трубы, находящиеся в условиях постоянно действующего внутреннего гидростатического давления, можно объяснить, в основном, параллельно развивающимися деформациями, обусловленными факторами продолжающегося выпрямления регулярно искривленных основных волокон армирующей материал стеклоткани, имевшего место вследствие наличия в трубах внутреннего гидростатического давления, и искажения первоначального направления основных волокон стеклоткани. При этом при низких уровнях приложенного на опытный трубчатый образец крутящего момента M_k упомянутый выше первый фактор превалирует над вторым фактором, в результате чего происходит удлинение труб. А при высоких уровнях M_k имеет место обратное явление.

В третьей главе работы обсуждаются вопросы:

- влияния возможной симметричности (начального) отклонения армирования от предусмотренной относительно оси в небольших пределах на деформационное поведение и сопротивление разрушению тонкостенных труб из слоистого стеклопластика при кратковременном внутреннем гидростатическом давлении;
- поведения деформирования и рассеяния (диссипации) энергии симметрично и асимметрично армированных тонкостенных труб из слоистого стеклопластика в процессе воздействия пульсирующего внутреннего гидростатического давления.

Проведение экспериментальной части исследований было осуществлено с использованием симметрично и асимметрично армированных трубчатых опытных образцов с внешним диаметром 39,7 мм и длиной рабочей части 60 мм. Они были получены при помощи шлифования из соответствующих трубчатых элементов

(исходные трубы) с внутренним диаметром 38 мм, толщиной стенки 2,25 мм и длиной 285 мм, изготовленных из стеклопластика на основе стеклоткани типа ППСОП. Опытные образцы были выточены, а экспериментальные исследования были осуществлены через 30 лет после изготовления исходных труб.

В первом разделе главы рассматриваются результаты исследования влияния начального отклонения армирования от предусмотренной симметричности относительно оси в пределах $\pm(6...8^\circ)$ на сопротивляемость разрушению и деформационное поведение тонкостенных трубчатых образцов из слоистого стеклопластика, подвергаемых ступенчато-возрастающему (кратковременному) внутреннему гидростатическому давлению.

Отметим, что отклонение армирования от предусмотренной симметричности в упомянутых пределах было обнаружено при изготовлении в лабораторных условиях тонкостенных труб из тканевого стеклопластика таким образом, чтобы они оказались армированными симметрично относительно оси (величина угла между направлениями основных волокон вязки стеклоткани и оси труб составляет $\varphi=0^\circ$). Однако в результате проведенных измерений у части готовых труб (более чем 8% от общего количества) было зафиксировано начальное отклонение армирования от предусмотренной симметричности, среднее значение которого колебалось в пределах $\pm(6...8^\circ)$ (трубы, армированные асимметрично относительно оси).

Средняя скорость нарастания давления в трубах составляет $q = 6 \pm 0,3$ атм/мин, что соответствует скорости увеличения напряжения в окружном направлении труб $\sigma_{\theta\theta} = 5,8 \pm 0,28$ МПа/мин. В процессе проведения испытаний измерялись окружные и угловые деформации, возникаемые одних и тех же трубчатых образцов.

Было установлено, что влияние начального отклонения армирования от предусмотренной симметричности в упомянутых выше пределах мало влияет на разрушающее напряжение по окружному направлению стеклопластиковых трубчатых опытных образцов. Среднюю величину этой характеристики для стеклопластиковых труб и с симметричным, и с асимметричным армированиями можно принять равной $\sigma_{\theta\theta}^p = 458.2$ МПа.

Выявлено, что величина отношения $\sigma_{\theta\theta}/\varepsilon_{\theta\theta}$, рассчитанная на основе данных, взятых из практически прямолинейного участка кривой, описывающей экспериментально установленную связь между $\sigma_{\theta\theta}$ и $\varepsilon_{\theta\theta}$ (эту характеристику назовем приведенным модулем упругости по окружному направлению и обозначим через $\bar{E}_{\theta\theta}$), в случае стеклопластиковых симметрично армированных тонкостенных труб составляет $\bar{E}_{\theta\theta} = 29,2 \times 10^3$ МПа, а в случае армированных асимметрично труб, $-\bar{E}_{\theta\theta} = 24,3 \times 10^3$ МПа. Это означает, что возможное отклонение армирования от предусмотренной симметричности в пределах $\pm(6...8^\circ)$ может привести к спаду примерно на 17% приведенного модуля упругости по окружному направлению $\bar{E}_{\theta\theta}$, определенного на основе данных испытания труб на внутреннее гидростатическое давление, когда основная нагрузка воспринимается утковыми волокнами армирующей материал стеклоткани.

В таблице, для сравнения, представлены величины прочности (сопротивления разрушению) и упругих характеристик слоистого стеклопластика при растяжении в направлении утковых волокон армирующей материал стеклоткани, установленные испытаниями опытных образцов различной геометрии. При определении этих характеристик учитывался фактор начального отклонения направления утковых

волокон вязки армирующей материал стеклоткани в пределах $\pm(6...8^\circ)$ от предусмотренного ($\varphi=0^\circ$).

Отметим, что представленные в таблице величины прочности при растяжении σ_B и модуля упругости E слоистого стеклопластика были определены стандартными методами испытания с использованием плоских образцов прямоугольного сечения толщиной 4 мм и 6мм, соответственно, а испытаниями стеклопластиковых тонкостенных труб с толщиной стенки 2,25 мм на внутреннее гидростатическое давление (растяжение труб по окружному направлению) были определены величины разрушающего напряжения по окружному направлению $\sigma_{\theta\theta}^p$ и приведенного модуля упругости $\bar{E}_{\theta\theta}$ по этому же направлению.

Таблица

Величины прочностных и упругих характеристик слоистого стеклопластика

Вид испытания	Опытные образцы с углом армирования, φ^0	Значения определенных характеристик	
		$\sigma_B (\sigma_{\theta\theta}^p)$, МПа	$E(\bar{E}_{\theta\theta}) \times 10^{-3}$, МПа
Растяжение стандартных плоских образцов	$\varphi=0^0$	77,0	11,4
	$\varphi=6-8^0$		9,2
Внутреннее гидростатическое давление тонкостенных трубчатых элементов	$\varphi=0^0$	(458,2)	(29,2)
	$\varphi=6-8^0$		(24,3)

В результате проведенных прямых измерений было установлено, что в процессе пошагового увеличения внутреннего гидростатического давления у асимметрично армированных стеклопластиковых труб, в отличие от труб, армированных симметрично относительно оси, возникают и развиваются сдвиговые деформации $\gamma_{\theta z}$, сопутствующие основным окружным деформациям $\varepsilon_{\theta\theta}$ этих же труб. При этом при уровне окружного напряжения $\sigma_{\theta\theta} = 0,6 \sigma_{\theta\theta}^p$ величина сдвиговых деформаций у асимметрично армированных стеклопластиковых трубчатых образцов составляет более чем $\gamma_{\theta z} = 1,1 \times 10^{-3}$, в то время как значение деформаций в окружном направлении этих же труб составляет примерно $\varepsilon_{\theta\theta} = 11,2 \times 10^{-3}$.

Во втором разделе главы обсуждаются результаты исследования влияния начального отклонения армирования от предусмотренной симметричности в пределах $\pm (6...8^\circ)$ на поведение деформирования и энергорассеивающих (диссипативных) свойств тонкостенных труб из слоистого стеклопластика в

процессе пульсирующего (повторно-статического) внутреннего гидростатического давления.

Средняя скорость изменения внутреннего гидростатического давления в стеклопластиковых трубах составляет 26,7 атм/мин, что соответствует скорости изменения напряжения в трубах в окружном направлении $\sigma_{\theta\theta} = 25,8$ МПа/мин. Величина амплитудного окружного напряжения применялась равной $0,42\sigma_{\theta\theta}^p$, что обусловлено результатами проведенных предварительных испытаний. Согласно данным этих испытаний, в условиях $\sigma_{\theta\theta} \leq 0,45\sigma_{\theta\theta}^p$ трубы испытывают только укорочение (см. выше). Базовое значение числа циклов испытания внутренним гидростатическим давлением стеклопластиковых труб применялось равным 6. В процессе проведения циклических испытаний измерялись как основные окружные $\varepsilon_{\theta\theta}$, так и сопутствующие основным угловые $\gamma_{\theta z}$ и продольные (осевые) ε_{zz} деформации, появляющиеся у одного и того же трубчатого образца.

Обсуждение поведения диссипации (рассеяния) энергии в процессе рассматриваемого здесь циклического нагружения стеклопластиковых труб с симметричным и асимметричным армированием было осуществлено с использованием коэффициента относительного рассеяния энергии Ψ цикла, определенного по формуле:

$$\Psi = 1 - \frac{\bar{b} \left[-(\Gamma_{\text{амп}} - \Gamma_{\text{ост}}) - \bar{X} \ln \left| 1 - \frac{1}{\bar{X}} (\bar{\Gamma} - \Gamma_{\text{ост}}) \right| \right]}{\bar{b} \left[\Gamma_{\text{амп}} - \bar{X} \ln \left(1 + \frac{1}{\bar{X}} \Gamma_{\text{амп}} \right) \right]}. \quad (1)$$

Здесь Γ , $\Gamma_{\text{амп}}$ и $\Gamma_{\text{ост}}$ – величины интенсивностей текущих, амплитудных и остаточных деформаций сдвига цикла соответственно; $\vec{X} = \vec{a} / \vec{b}$, где a и b – экспериментально установленные параметры, фигурирующие в соответствующей зависимости, удовлетворительно описывающей деформирование стеклопластиковых труб на участках восходящей ($\rightarrow$) и нисходящей ($\leftarrow$) ветвей петли гистерезиса цикла нагружения–разгрузки.

При выведении формулы (1) использовались известные соотношения, в которых фигурируют представленные в цилиндрической системе координат выражения интенсивностей касательных напряжений T и деформаций сдвига Γ .

Было установлено, что в процессе циклического нагружения у одних и тех же симметрично армированных стеклопластиковых трубчатых образцов, кроме циклических основных окружных деформации $\varepsilon_{\theta\theta}$, возникают и сопутствующие основным циклические продольные деформации ε_{zz} , а у асимметрично армированных труб – еще и сопутствующие циклические сдвиговые деформации $\gamma_{\theta z}$.

Показано, что с начальным увеличением числа циклов n нагружения–разгрузки до 3 наблюдается некоторое уменьшение как основных, так и сопутствующих основным амплитудных деформаций ($\varepsilon_{\theta\theta}^{\text{амп}}$, $\varepsilon_{zz}^{\text{амп}}$, $\gamma_{\theta z}^{\text{амп}}$ – зарегистрированные при $\sigma_{\theta\theta} = 0,42\sigma_{\theta\theta}^B$) одних и тех же стеклопластиковых труб с рассматриваемыми ориентациями армирования. При дальнейшем увеличении n до 6 имеет место слабая тенденция возрастания амплитудных величин упомянутых деформаций.

Аналогичное поведение проявляют основные остаточные деформации цикла $\varepsilon_{zz}^{\text{ост}}$ (измеренные после полной разгрузки труб) асимметрично армированных стеклопластиковых труб, а также сопутствующие основным продольные остаточные деформации труб с рассматриваемыми здесь обеими ориентациями армирования. Характеры изменения в зависимости от номера цикла испытания n основных остаточных деформации цикла $\varepsilon_{\theta\theta}^{\text{ост}}$ симметрично армированных труб и

сопутствующих основным сдвиговым остаточным деформациям цикла $\gamma_{\theta z}^{\text{ост}}$ асимметрично армированных труб одинаковый: при начальном увеличении n до 4-ех происходит монотонное уменьшение с высокой скоростью показателей этих деформационных характеристик, а при дальнейшем увеличении n до 6 наблюдается постепенное падение этой скорости.

На основе сравнения величин остаточных и амплитудных одноименных деформаций, установленных для одного и того же номера цикла испытания, показано, что образование замкнутой петли гистерезиса основных деформаций $\varepsilon_{\theta\theta}$ стеклопластиковых труб с рассматриваемыми ориентациями армирования происходит уже на первом цикле нагружения—разгрузки. В случаях деформаций ε_{zz} и $\gamma_{\theta z}$, сопутствующих основным деформациям $\varepsilon_{\theta\theta}$, образование замкнутой петли гистерезиса наблюдается после третьего цикла нагружения-разгрузки труб.

Выявлено, что начальное увеличение числа циклов нагружения-разгрузки до 4-ех внутренним гидростатическим давлением приводит к некоторому монотонному уменьшению с убывающей скоростью рассчитанного согласно (1) коэффициента рассеяния энергии цикла Ψ стеклопластиковых трубчатых элементов, армированных как симметрично, так и асимметрично относительно оси (рис.5). При дальнейшем увеличении числа циклов n вплоть до конца проведения испытаний изменение величин коэффициента Ψ у упомянутых стеклопластиковых труб практически не наблюдается.

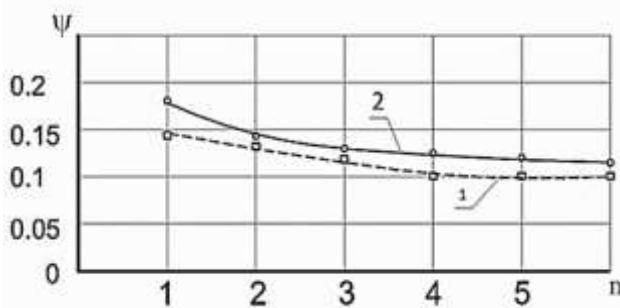


Рис.5. Кривые, описывающие изменение коэффициента рассеяния энергии цикла Ψ от номера цикла испытания n симметрично (кривая 1) и асимметрично (кривая 2) армированных стеклопластиковых труб в процессе циклического внутреннего гидростатического давления

Согласно проведенным расчетам, возможное отклонение армирования от предусмотренной симметричности в пределах $\pm(6...8^\circ)$ приводит к увеличению на более чем на 20% величины относительного коэффициента рассеяния энергии цикла Ψ стеклопластиковых труб, подвергаемых циклическому внутреннему гидростатическому давлению, и эта разница практически инвариантна относительно количества циклов испытания в рассматриваемом здесь диапазоне нагружения-разгрузки.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Симметрично армированные относительно оси тонкостенные конструкционные трубчатые элементы из стеклопластика на основе ткани типа ППСОП, эксплуатирующиеся, в основном, в условиях простого кручения (например, трансмиссионные валы карданных передач машин, полые оси быстровращающихся роторов, высокоскоростных центробежных газогенераторов и др.), могут подвергаться циклическому сужению, приводящему к циклическому укорочению элементов и, тем самым, к образованию в них циклически повторяющегося непредусмотренного сложного напряженно - деформированного состояния..

2. Касательные напряжения $\tau_{\theta z}$, образовавшиеся в симметрично армированных тонкостенных стеклопластиковых трубчатых элементах из-за различных причин, если их величина не превышает 0,4 доли от предельного (разрушающего элемент) значения этой характеристики $\tau_{\theta z}^P$, оказывают малое влияние на несущую способность труб при внутреннем гидростатическом давлении.

3. В процессе эксплуатации в условиях воздействия пульсирующего внутреннего гидростатического давления у симметрично армированных тонкостенных цилиндрических резервуаров из тканевого стеклопластика (например, баллоны из композитов или металлические баллоны, усиленные снаружи тканевыми стеклопластиками), кроме циклических окружных (основных) деформаций $\epsilon_{\theta\theta}$, могут возникнуть и сопутствующие основным продольные деформации ϵ_{zz} с циклически изменяющимся направлением, приводящие к образованию в материале изделия циклически изменяющегося сложного напряженно-деформированного состояния, а в некоторых случаях - знакопеременного.

4. Выявлено, что возможное отклонение армирования от предусмотренной симметричности в пределах $\pm(6...8^\circ)$, происходящее на этапе технологического процесса переработки материала в изделие (технологическое отклонение армирования от предусмотренной симметричности), оказывает малое влияние на несущую способность тонкостенных труб из тканевого стеклопластика при внутреннем гидростатическом давлении (т.е. на $\sigma_{\theta\theta}^P$). Одновременно, технологическое отклонение армирования от предусмотренной симметричности может привести к существенному (более чем на 17%) увеличению степени податливости таких трубчатых элементов относительно деформирования в окружном направлении.

5. Показано, что экспериментально определенная величина несущей способности при внутреннем гидростатическом давлении тонкостенных труб с толщиной стенки 2,25 мм, изготовленных из стеклопластика на основе ткани типа ППСОП, утковые волокна которой воспринимают окружные растягивающие напряжения, может до 6 раз превосходить расчётное ее значение, осуществлённое на основе стандартной прочности стеклопластика при растяжении по направлению утковых волокон армирующей материал ткани, и эта разница практически инвариантна относительно технологического отклонения армирования от предусмотренной симметричности относительно оси труб. Величину стандартной прочности при растяжении стеклопластиков обычно устанавливают испытанием стандартных плоских образцов с размерами сечения 4x10 мм.

6. Установлено, что в условиях пульсирующего внутреннего гидростатического давления определенная для одного и того же номера цикла нагружения-разгрузки величина относительного коэффициента рассеяния энергии Ψ тонкостенных труб из

тканевого стеклопластика с технологическим отклонением армирования от предусмотренной симметричности относительно оси может оказаться на более чем на 20% больше по сравнению с определенной для аналогичных труб, армированных симметрично.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Карапетян К.А., Валесян С.Ш., Мурадян Н.С. Влияние технологической разориентации армирования на деформационное поведение и сопротивляемость разрушению стеклопластиковых труб при осевом растяжении и внутреннем гидростатическом давлении// Изв. НАН РА. Механика.-2018.-Т.71,№3.-С. 36-43.
2. Карапетян К.А., Валесян С.Ш., Мурадян Н.С. Влияние внутреннего гидростатического давления и осевого растягивающего усилия на сопротивление разрушению стеклопластиковых труб при кручении // Докл. НАН Армении 2018.-Т.118,№3.-С.246-253.
3. Карапетян К.А., Валесян С.Ш., Мурадян Н.С. Сопротивляемость деформаций сдвига стеклопластиковых труб в условиях сложного нагружения //Актуальные проблемы механики сплошной среды: Тр.VI Межд. Конференции, 01-06 октября 2019г.- Дилижан, Армения, 2019.-С.185-188.
4. Карапетян К.А., Валесян С.Ш., Мурадян Н.С. Зависимость деформативности и разрушения стеклопластиковых труб от предварительного кручения при действии внутреннего давления //Изв. НАН РА,Механика.-2019.-Т.2(1).-С49-60.
5. Karapetyan K.A., Valesyan S.Sh., Muradyan N.S. Deformation behavior and resistance to fracture of glass-fabric pipes, subjected to complex loading with torque and internal hydrostatic pressure // IOP Conf. series: Journal of Physics: Conf. series.1474 (2020) 012020
6. Karapetyan K.A., Valesyan S.Sh., Muradyan N.S. The dependence of the deformation behavior on the initial disorientation of reinforcement subjected to repeated-static internal hydrostatic pressure and axial tension // IOP Conf. series: Journal of Physics: Conf. series.2231 (2022) 012015.
7. Мурадян Н.С. Зависимость сопротивления деформированию и разрушению при кручении стеклопластиковых труб от предварительно приложенных нормальных напряжений // Актуальные проблемы механики сплошной среды:Тр.IX Международной конференции, 22-26 сентября 2025г.Цахкадзор, Армения, 2025.-С.167-170.

Նարինե Սերգեյի Մուրադյան

**ՇԵՐՏԱՎՈՐ ԱՊԱԿԵՊԼԱՍՏԵ ՍԻՄԵՏՐԻԿ ԵՎ ՈՉ ՍԻՄԵՏՐԻԿ
ԱՄՐԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ԽՈՂՈՎԱԿԱԶԵՎ ԲԱՐԱԿԱՊԱՏ ՏԱՐԵՐԻ
ԴԵՖՈՐՄԱՑՈՒՄԸ ԵՎ ՔԱՅՔԱՑՈՒՄԸ ՏԱՐԵՐ ՌԵԺԻՄՆԵՐՈՎ
ԲԵՌՆԱՎՈՐՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ**

Ամփոփում

Ատենախոսական աշխատանքի հիմնական եզրակացությունները և արդյունքները

1. Հիմնականում պարզ ոլորման պայմաններում շահագործվող հենքային նրբաթելերի վրա ծածկմամբ քաթանային հյուսվածքով (ՀՆՎԲՀ) գործվածքի հիմքով շերտավոր ապակեպլաստե սիմետրիկորեն ամրանավորված բարակապատ խողովակաձև կոնստրուկցիոն տարրերը (օրինակ մեքենաների կարդանային փոխանցումների լիսեռներ, արագապտույտ ռոտորների, բարձրարագ գազագեներատորների սնամեջ սոնիներ և այլն) կարող են ենթարկվել նեղացման, իսկ որոշ դեպքերում՝ ցիկլիկ, ինչը կարող է հանգեցնել տարրերում նաև առանցքային ցիկլիկ լարումների և, հետևաբար, բարդ լարվածադեֆորմացիոն վիճակի առաջացման:

2. Տարբեր պատճառների հետևանքով առաջացող շոշափող լարումները ($\tau_{\theta z}$), եթե դրանց մեծությունը չի գերազանցում իրենց իսկ սահմանային արժեքի ($\tau_{\theta z}^0$) 0,4 մասը, չեն կարող էական ազդեցություն ունենալ շերտավոր ապակեպլաստե սիմետրիկորեն ամրանավորված բարակապատ խողովակաձև տարրերի՝ ըստ ներքին հիդրոստատիկ ճնշման կրողունակության վրա:

3. Բաբախող Ներքին հիդրոստատիկ ճնշման պայմաններում շահագործվող գործվածքային ապակեպլաստե սիմետրիկորեն ամրանավորված խողովակաձև բարակապատ ռեզերվուարներում (օրինակ, կոմպոզիտե կամ կոմպոզիտով արտաքնապես ուժեղացված մետաղական բալոններ) բացի հիմնական (շրջանային) ցիկլիկ դեֆորմացիաներից, կարող են առաջանալ նաև փոփոխվող ուղղությամբ առանցքային (ուղեկցող) դեֆորմացիաներ, ինչը կարող է հանգեցնել արտադրափրերի նյութում ցիկլիկ, իսկ որոշ դեպքերում նաև նշանափոխ բարդ լարվածադեֆորմացիոն վիճակի առաջացման:

4. Բացահայտվել է, որ նյութից արտադրափրի ստացման գործընթացում ամրանավորման սիմետրիկության հնարավոր աղավաղելը մինչև $\pm(6-8^\circ)$ -ի սահմաններում (ամրանավորման սիմետրիկության տեխնոլոգիական աղավաղում) նվազ ազդեցություն ունի գործվածքային ապակեպլաստե

բարակապատ խողովակների՝ ըստ ներքին հիդրոստատիկ ճնշման կրողունակության վրա: Միաժամանակ, ամրանավորման սիմետրիկության այդպիսի աղավաղումը կարող է հանգեցնել խողովակների շրջանային ուղղությամբ դեֆորմացման նկատմամբ ենթարկվողության աստիճանի էական (ավելի քան 17 %) աճի :

5. Յույց է տված, որ ՀՆՎԶ գործվածքի հիմքով շերտավոր ապակեպլաստե բարակապատ խողովակների՝ ըստ ներքին հիդրոստատիկ ճնշման կրողականության փորձնականորեն որոշված մեծությունը, երբ շրջանային ձգող լարումները գլխավորապես կրում են գործվածքի թեզանային նրբաթելերը, կարող է էապես (մինչև 6 անգամ) գերազանցել այդ բնութագրիչի հաշվարկներով որոշված արժեքին, որն իրականացնելիս հիմք է ընդունվում ամրանավորող գործվածքային ինգրիդիենտի թեզանային թելիկների ուղղությամբ ապակեպլաստի ստանդարտ ձգման ամրությունը և, այդ տարբերությունը գործնականում մնում է անփոփոխ ամրավանդման սիմետրիկության տեխնոլոգիական աղավաղման նկատմամբ: Ապակեպլաստների ձգման ստանդարտ ամրությունը, սովորաբար, որոշվում է ուղղանկյուն կտրվածքով հարթ փորձանմուշների փորձարկմամբ:

6. Հաստատված է, որ, բաբախող ներքին հիդրոստատիկ ճնշմամբ բեռնավորման պրոցեսում ամրանավորման սիմետրիկության տեխնոլոգիական աղավաղմամբ շերտավոր ապակեպլաստե բարակապատ խողովակների՝ բեռնավորում-բեռնաթափում նույն և միևնույն ցիկլի համար որոշված էներգիայի ցրման հարաբերական գործակցի մեծությունը կարող է էապես (ավելի քան 20%-ով) գերազանցել սիմետրիկորեն ամրանավորված համանման խողովակների համար որոշված նույնանուն բնութագրիչի արժեքին:

Narine Muradyan

DEFORMATION AND BREAKAGE OF SYMMETRICALLY AND ASYMMETRICALLY REINFORCED TUBULAR MEMBRANE ELEMENTS UNDER VARIOUS LOADING MODES

Summary

MAIN CONCLUSIONS AND RESULTS OF THE WORK

1. Symmetrically reinforced thin-walled structural tubular elements made of fiberglass based on PPSOP fabric, operated mainly under simple torsion conditions (e.g. transmission shafts of cardan drives of machines, hollow axes of high-speed rotors, high-speed centrifugal gas generators, etc.), can be subject to cyclic narrowing, leading to cyclic shortening of the elements and, thereby, to the formation of a cyclically repeating unforeseen complex stress-strain state in them.

2. Shear stresses $\tau_{\theta z}$ formed for various reasons in symmetrically reinforced thin-walled fiberglass tubular elements, if their value does not exceed 0.4 of the ultimate

(destroying element) value of this characteristic $\tau_{\theta z}^p$, have little effect on the load-bearing capacity pipes under internal hydrostatic pressure.

3. During operation under conditions of pulsating internal hydrostatic pressure in symmetrically reinforced thin-walled cylindrical tanks made of fabric fiberglass (for example, cylinders made of composites or metal cylinders reinforced externally with fabric fiberglass), in addition to cyclic circumferential (primary) deformations $\varepsilon_{\theta\theta}$, longitudinal deformations ε_{zz} may also occur that accompany the primary deformations with a cyclically changing direction, leading to the formation of a cyclically changing complex stress-strain state in the product material, and in some cases, an alternating state.

4. It was found that possible deviation of reinforcement from the intended symmetry within the range of $\pm(6...8^\circ)$, occurring during the technological process of processing the material into a product (technological deviation of reinforcement from the intended symmetry), has little effect on the load-bearing capacity of thin-walled fiberglass pipes under internal hydrostatic pressure (i.e., by $\sigma_{\theta\theta}^p$). At the same time, technological deviation of reinforcement from the intended symmetry can lead to a significant (more than 17%) increase in the degree of compliance of such tubular elements with respect to deformation in the circumferential direction.

5. It has been shown that the experimentally determined value of the load-bearing capacity under internal hydrostatic pressure of thin-walled pipes with a wall thickness of 2.25 mm, made of fiberglass reinforced plastic (FRP) using a PPSOF-type fabric, the weft fibers of which absorb circumferential tensile stresses, can be up to 6 times greater than the calculated value, calculated based on the standard tensile strength of the fiberglass in the direction of the weft fibers of the reinforcing fabric. This difference is virtually invariant with respect to the technological deviation of the reinforcement from the intended symmetry relative to the pipe axis. The standard tensile strength of fiberglass is usually determined by testing standard flat specimens with cross-sectional dimensions of 4 x 10 mm.

6. It has been established that under conditions of pulsating internal hydrostatic pressure, the value of the relative energy dissipation coefficient Ψ of thin-walled pipes made of fabric fiberglass with technological deviation of reinforcement from the intended symmetry relative to the axis, determined for the same number of loading-unloading cycles, may turn out to be more than 20% greater than that determined for similar pipes reinforced symmetrically.