

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**к.т.н.<sup>1</sup> Шилько С.В., н.с.<sup>1</sup> Рябченко Т.В., н.с.<sup>1</sup> Петроковец Е.М., мл. н.с.<sup>1</sup> Башлакова А.Л.,к.т.н.<sup>2</sup> Кропотин О.В.<sup>1</sup>*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого, Гомель*<sup>2</sup>*Омский государственный технический университет, Омск*

**Введение.** Методы расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций из композитов должны учитывать специфику деформирования и разрушения указанных неоднородных и, как правило, физически нелинейных материалов. Так, полимерные композиты, широко используемые при изготовлении трубчатых элементов (муфт, фитингов, участков трубопроводов, оправок и т.д.), характеризуются большими (конечными) упругими деформациями и ярко выраженными вязкоупругими свойствами, что проявляется в виде ползучести и релаксации.

В ряде случаев вязкоупругие эффекты положительно влияют на прочность трубчатых элементов. Так, релаксация способствует снижению нагруженности последних, обеспечивая выравнивание объемных и контактных напряжений, вызванных осевыми гидродинамическими нагрузками и смещениями опорной поверхности, монтажными усилиями и начальными перекосами, а также термическими деформациями при воздействии теплоносителя.

С другой стороны, вязкоупругость полимерных материалов приводит к негативным явлениям: возникновению динамических усилий из-за появления несоосности вращающихся валов; нарушению прочности и герметичности трубных соединений, получаемых напрессовкой или термоусадкой соединительных муфт; появлению натяга в соединении вала с оправкой при намотке на нее пленки или нитей, и т.д. Прогнозировать уровень напряжений и деформаций в с учетом вязкоупругости необходимо также для оптимизации состава полимерных композитов исходя из противоречивых требований к прочности и деформативности. К примеру, армирующий эффект относительно жестких наполнителей (например, высокомодульных углеродных волокон) способствует уменьшению деформаций ползучести, но одновременно снижает гибкость трубопровода, что затрудняет его монтаж.

В этой связи в статье разрабатывается комплексный подход к оценке прочности и деформативности полимерных трубчатых конструкций, включающий испытания их фрагментов на статическое сжатие и релаксацию с последующим конечноэлементным расчетом параметров НДС в условиях осевого сжатия, бокового обжатия и сжатия с кручением.

**Экспериментальное исследование.** Особенностью механических испытаний полимерных материалов является выраженная зависимость результатов измерения от условий нагружения, а также необходимость проведения весьма длительных (в течение нескольких месяцев и даже лет) экспериментов на ползучесть и релаксацию [1-3]. Для оперативного получения информации о вязкоупругих свойствах на современном высокоточном автоматизированном оборудовании (например, машинах Instron, Zwick и т.п.) целесообразно проводить испытания фрагментов исследуемых натуральных трубчатых изделий на кратковременную (продолжительностью несколько часов) релаксацию при осевом сжатии. В этом случае напряженное состояние указанных фрагментов достаточно близко соответствует состоянию одноосного сжатия, реализуемого в стандартном образце цилиндрической формы при определении механических характеристик по ГОСТ 4651-82 [4]. Важно, что при испытании на релаксацию привод автоматизированной испытательной машины механического типа работает в облегченном режиме по сравнению с испытаниями на ползучесть.

В настоящей работе механические испытания проводили на машине Instron 5567 с программным обеспечением Merlin; в качестве образцов использовали трубчатые заготовки с наружным диаметром 140 мм, внутренним диаметром 114 мм и высотой 30 мм из углепластика Флувис на основе материала фторопласт-4, армированного неориентированными короткими волокнами (рисунок 1а), а также фрагменты шпульт из различных термопластов (рисунок 2а). Помимо регистрации перемещений штатным экстензометром, производилось измерение осевых деформаций на поверхности образца при помощи тензостанции TS-32 (ИПФ НАН Беларуси). Тензодатчики подключались по четвертьмостовой схеме и, как показано на рисунке 1б, размещались в направлении оси вращения образца и окружном направлении симметрично по высоте, чтобы исключить краевой эффект. Компенсационный датчик устанавливался на стандартном цилиндрическом образце

из аналогичного материала. Для минимизации неоднородности напряженно-деформированного состояния образец позиционировали по способу [5].

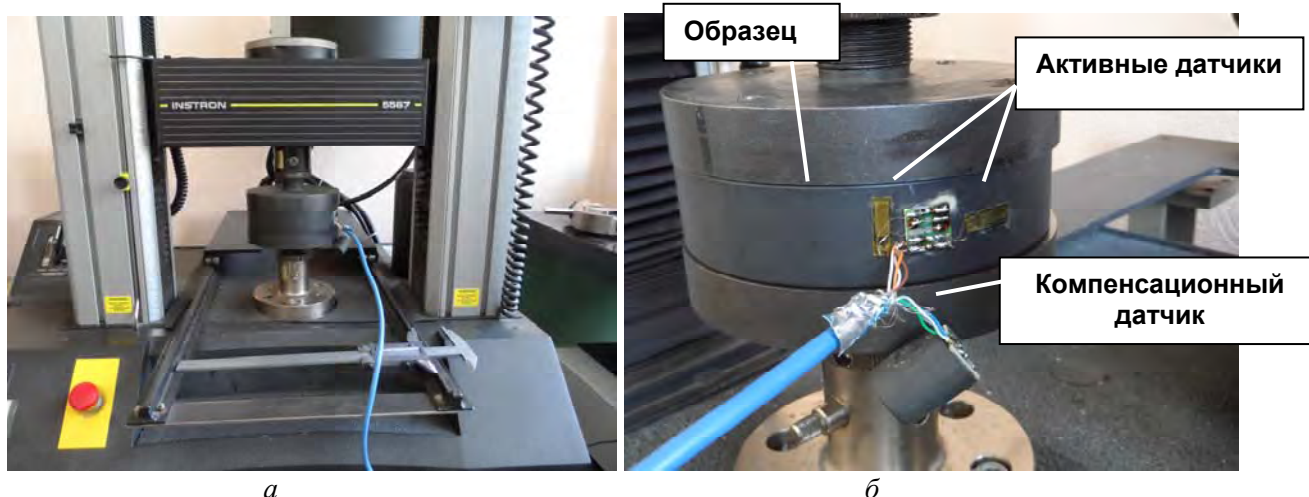


Рисунок 1 – Испытание композитной трубы на релаксацию при осевом сжатии: а) способ нагружения образца на машине Instron 5567; б) размещение датчиков деформации.

**Оценка корректности испытаний трубчатых образцов на осевое сжатие.** При существенных различиях диаграмм  $\sigma - \epsilon$ , полученных при осевом сжатии фрагментов шпульт из 5-ти материалов (рисунок 2а), очевидна возможность корректного определения модуля упругости и коэффициента Пуассона на участках линейно-упругого деформирования. Для оценки краевого эффекта и последующего анализа НДС трубчатых элементов при различных условиях нагружения были построены их конечноэлементные модели (например, модель осевого нагружения заготовки из углепластика Флувис показана на рисунке 2б).

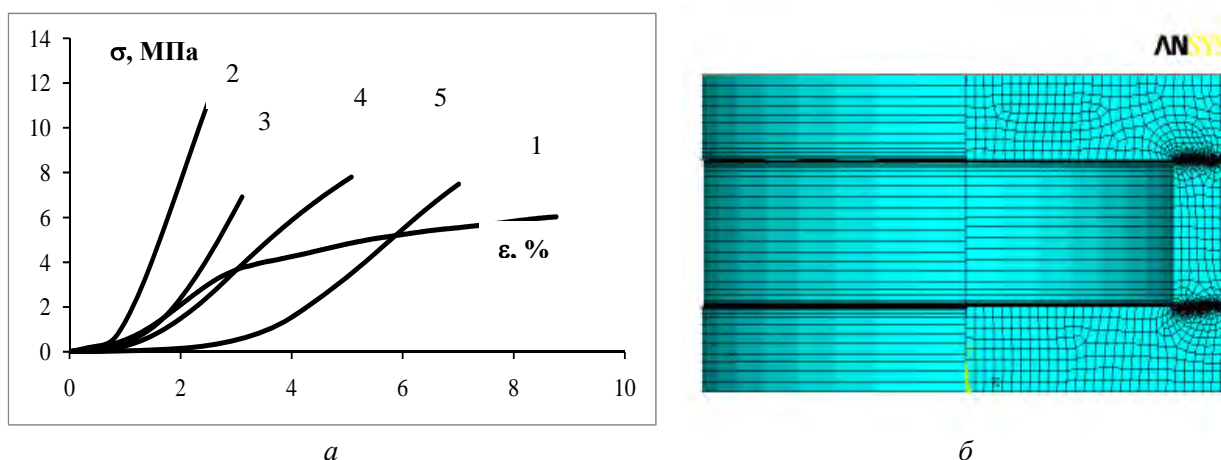


Рисунок 2 – Зависимости «напряжение (МПа) – деформация (%)» для фрагментов шпульт в виде цилиндрических колец (а) и конечноэлементная модель трубчатого элемента, сжимаемого опорными плитами испытательной машины (б).

В предположении линейно-упругого деформирования с учетом трения в контакте образца с опорными плитами были вычислены осевые перемещения (осадка), а также распределения внутренних и контактных напряжений (рисунок 3). Сопоставление расчетного и экспериментального значений осадки показало, что их различие не превышает 24%. При использованном соотношении высоты и толщины стенок образцов, а также низком коэффициенте трения углепластика по стали, (примерно 0,1), можно считать НДС образца одноосным, за исключением приконтактных зон (рисунок 3). Погрешность расчета в сторону занижения перемещений обусловлена пластическими деформациями в локальной краевой зоне образца и шероховатостью контактирующих поверхностей, что не учитывалось в модели.

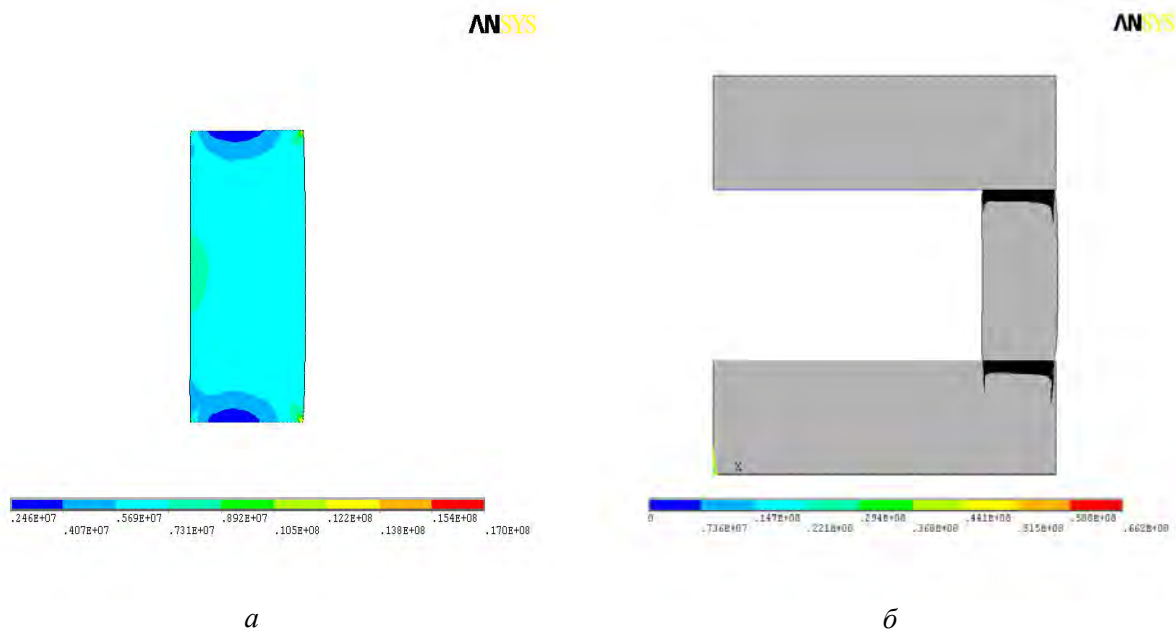


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений (а) и давлений в контакте с опорными плитами (б).

Испытания на релаксацию проводились при уровнях сжатия (осадке) 0,5 мм и 1 мм. Средняя температура испытания составляла  $26^{\circ}\text{C}$ . В частности, на рисунке 3 приведена зависимость сжимающего усилия во времени для начального сжатия 1 мм; а на рисунке 4 показаны зависимости осевой деформации на наружной поверхности образца от времени, полученные на одном образце с «отдыхом» в течение 24 часов. Видно, что скорость релаксации максимальна в начальный период в пределах 10 мин. Весьма высокая дискретность измерения усилия позволяет экстраполировать экспериментальные данные кратковременной релаксации на более длительный период при использовании имеющихся в конечноэлементных программах реологических моделей, например, описания Прони [6].

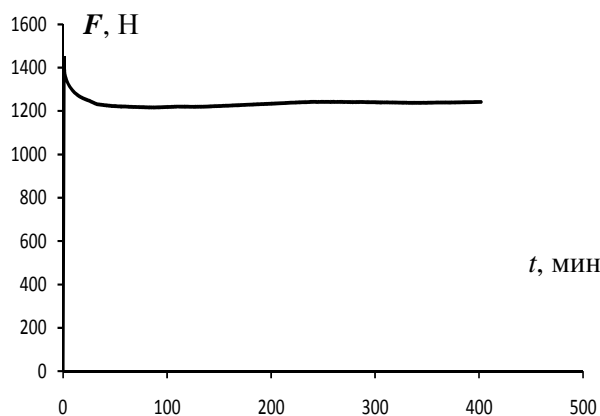


Рисунок 4 – Зависимость сжимающего усилия от времени при сжатии образца трубы из углепластика на 1 мм.

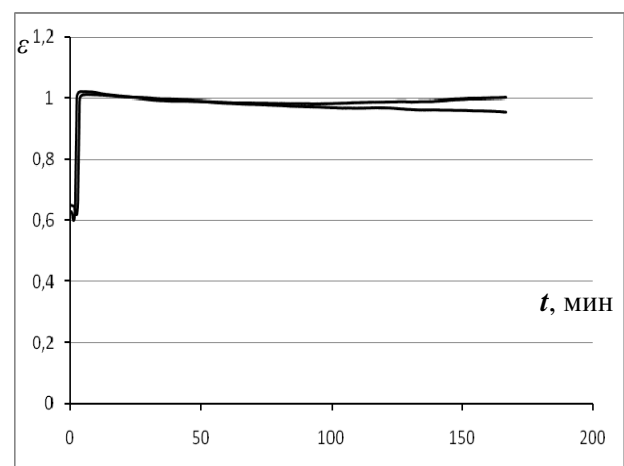


Рисунок 5 – Зависимость осевой деформации от времени при сжатии трубы из углепластика на 1 мм.

Наблюдается хорошее соответствие результатов измерения сжимающего усилия и осевой деформации при испытании трубы из углепластика на кратковременную релаксацию при сжатии. Кроме того, из рисунка 5 следует воспроизводимость релаксационных кривых при повторном испытании после «отдыха» образца в течение 24 часов.

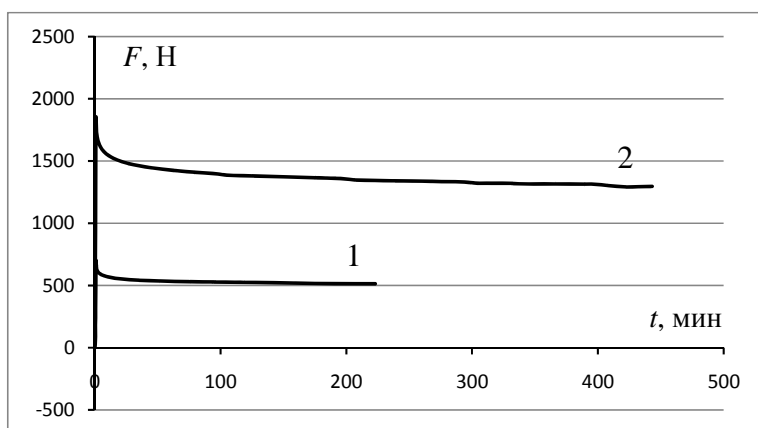


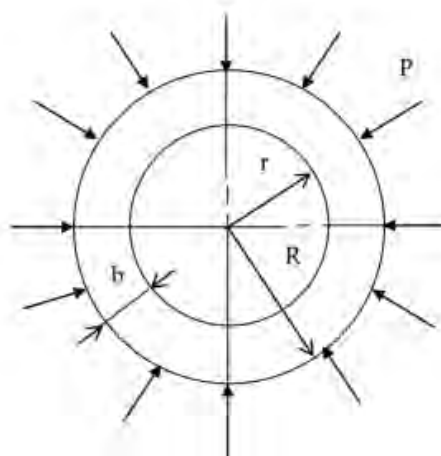
Рисунок 6 – Зависимость сжимающего усилия от времени при уровне сжатия 0,5 мм (кривая 1) и 1 мм (кривая 2) образца матричного материала фторопласт-4

При вышеуказанных уровнях сжатия были также проведены испытания на релаксацию матричного материала фторопласт-4 (рисунок 6) с использованием цилиндрического образца, размеры которого соответствовали требованиям ГОСТ 4651-82 [8]. Видно, что реологические свойства композита в основном определяются вязкоупругостью полимерной матрицы.

**Анализ НДС шпульт для намотки пленки.** В технических приложениях выбор материалов изделий осуществляется, исходя из требований сертификатов качества и технических условий. В частности, упомянутые выше трубчатые элементы в виде шпульт в процессе намотки полимерной пленки, бумаги, нитей и т.д. подвергаются боковому обжатию, которое при недостаточной жесткости приводит возникновению натяга и препятствует снятию с оправки. Так как испытание на боковое смятие (рисунок 7а) не позволяет воспроизвести условия намотки, радиальное перемещение внутренней поверхности шпульт определялось по расчетной схеме, приведенной на рисунке 6б с учетом диаграмм  $\sigma - \epsilon$ , полученных при осевом сжатии фрагментов шпульт (рисунок 2а). Видно, что минимальные радиальные перемещения соответствуют варианту материала № 2.



а



б

Рисунок 7. – Испытание на боковое сжатие (а) и расчетная схема для определения параметров обжатия (б)

Таблица. Исходные данные и результаты моделирования обжатия полимерных шпульт

№ варианта	1	2	3	4	5
$E$ , МПа	142	970	78	223	45
$\nu$	0,3	0,35	0,45	0,45	0,45
$b$ , мм	15	7	10	8	10
$u_k$ , мм	0,45	0,2	2,2	0,65	1,8
$\sigma_{экв}$ , МПа	1,72	3,85	4,05	3,22	2,32

**Влияние сжимаемости материала на жесткость трубчатых валов.** Армирование полимерной матрицы высокомодульным наполнителем предоставляет широкие возможности управления деформационно-прочностными свойствами конструктивных элементов. В частности, использование объемной конечноэлементной модели позволило исследовать влияние коэффициента

Пуассона материала в теоретически допустимом интервале значений на НДС при кручении трубчатых валов, имеющих радиус  $r = 5$  мм и длину  $H = 100$  мм при модуле Юнга  $E = 1$  ГПа и крутящем моменте  $M_k = 500$  Н\*см. В частности, соответствующие зависимости расчетного осевого перемещения трубчатого вала при варьировании толщины стенки  $h$  и диаметра поперечного отверстия показаны на рисунке 8. Можно видеть, что в отличие от сплошного вала, крутильная жесткость трубчатых валов существенно зависит от коэффициента Пуассона.

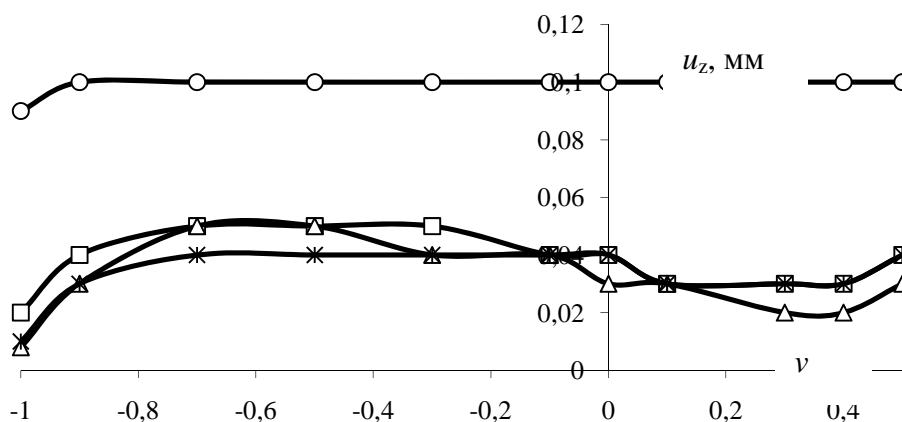


Рисунок 8 – Зависимость перемещения  $u_z$  от коэффициента Пуассона  $\nu$ : сплошной вал (треугольники); сплошной вал с отверстием (звездочки); трубчатый вал с толщиной стенки  $h = 3$  мм (квадраты),  $h = 1$  мм (кружки).

## РЕЗЮМЕ

Разработанный расчетно-экспериментальный подход позволяет получить важную информацию о напряженно-деформированном состоянии трубчатых элементов конструкций из полимерных материалов при различных условиях нагружения, основываясь на методически простых стандартных испытаниях и конечно-элементном моделировании. Это позволяет сформулировать рекомендации по выбору материалов и конструкции конкретных изделий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колтунов М.А. К вопросу выбора ядер при решении задач с учетом ползучести и релаксации // Механика полимеров. – 1968. – № 4.
2. Кравчук А.С., Майборода В.П., Уржумцев Ю.С. Механика полимерных и композиционных материалов. – М.: Наука. – 1985. – 303 с.
3. Бойл Дж., Спенс Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести. – М.: Мир. – 1986. – 360 с.
4. ГОСТ 4651-82. Пластмассы. Метод испытания на сжатие.
5. Способ получения напряженно-деформированного состояния образца материала для определения его механических характеристик при сжатии: пат. 6417 Респ. Беларусь, МПК7 G 01N 3/08 / С.В. Шилько, Н.Н. Бодрунов / 2004.
6. Шилько С.В., Рябченко Т.В., Кропотин О.В. Анализ формирования на оправке герметизатора из нелинейно-упругого полимерного материала // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2013. – № 3. – С. 43–49.

## SUMMARY

Possibilities of the finite-element strength analysis of tubular structure elements made of polymeric materials under various loading conditions are analyzed using experimental data obtained by methodically simple standard tests.

Поступила в редакцию 04.11.2013