

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ЦИЛИНДРОВ НА ДЕЙСТВИЕ ВНУТРЕННЕГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

С.М. Верещака, Д.А. Жигилий

Сумский государственный университет, г. Сумы

Предложена методика экспериментальной проверки достоверности теоретических результатов и оценки погрешностей, которые вносят различного рода допущения в расчеты на прочность тонкостенных элементов с межслойными дефектами. Для моделирования участков ослабленного контакта на межфазных границах рассматриваются две модели решения контактной задачи сопряжения жестких анизотропных слоев. Представлены экспериментально полученные величины модуля упругости и предела прочности стеклопластика при растяжении и сжатии, предел прочности стеклопластика при изгибе с последующим определением недостающих физико-механических параметров. Дано описание экспериментальной установки для проведения испытаний тонкостенных цилиндров из стеклопластика под действием внутреннего давления.

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими результатами позволило сделать выводы, что в результате сравнительно низкой жесткости стеклопластиков на изгиб и слабой сопротивляемости поперечному сдвигу применение традиционной непрерывно структурной модели при расчетах тонкостенных армированных элементов конструкций даже в начальной стадии нагружения приводит к значительным погрешностям.

Разрушение стеклопластиковых оболочек из-за слабого сопротивления поперечному отрыву и межслойному сдвигу происходит, как правило, задолго до достижения напряжениями предельных значений. При действии нагрузки, ввиду особенностей технологического характера и физико-механических свойств армированных пластиков, на границах контакта сопряженных слоев происходит образование тонких неоднородных межфазных прослоек, различного рода несовершенств, например, участков отслоения или непрочлея. В этом случае предположение о непрерывности перемещений и напряжений при переходе через границу контакта может оказаться существенно нарушенным.

В данной работе предложена методика экспериментальной проверки достоверности теоретических результатов и оценки погрешностей, которые вносят различного рода допущения в расчеты на прочность и устойчивость тонкостенных элементов с межслойными дефектами. Для моделирования участков ослабленного контакта на межфазных границах рассматриваются две модели решения контактной задачи сопряжения жестких анизотропных слоев [1]. Подробный анализ последних результатов и направлений развития дискретно-структурной теории слоистых пластин и оболочек можно найти в обзоре [2].

Согласно первой модели контакт жестких слоев осуществляется при помощи клеевой прослойки ненулевой толщины. Допускается, что на некотором локальном участке оболочки клеевая прослойка отсутствует, поэтому в этой области учитывается односторонний контакт между жесткими слоями.

Для второй модели характерно выполнение статических условий контакта по поверхности сопряжения отдельных слоев. Считается, что напряжения поперечного сдвига и обжатия на границе контакта равны между собой. При этом допускается упругое проскальзывание по поверхности контакта смежных слоев.

Исследовалось напряженное состояние цилиндрических образцов из стеклопластика длиной 0,1– 0,2 м, диаметром 0,09 м и толщиной 0,002 м. Цилиндры были выполнены из 4 – х слоев стеклоткани TG 430 – С (100) (табл. 1) методом укладки. Для проведения эксперимента было изготовлено по четыре образца каждой серии. За экспериментальный результат принималась усредненная величина четырех измеренных значений.

В качестве связующего использовалась полиэфирная ортофталевая смола с пониженной эмиссией стирола Cistic 2 – 446 PA .

Физико-механические характеристики исследуемых образцов из стеклопластика приведены в табл. 2 и 3.

Для определения предельных напряжений образцы каждой серии доводили до разрушения при испытании на растяжение (ГОСТ 25.601 – 80), сжатие (ГОСТ 25.602 – 80) и изгиб (ГОСТ 25.604 – 82). Считая, что найденные значения предельных напряжений представляют собой нормально распределенную генеральную совокупность параметров, в таблице 3 приведены доверительные интервалы среднего значения предельных напряжений $\pm a_{\sigma_{cp}}$, при доверительной вероятности $1 - \alpha = 0,95$.

Таблица 1 – Структура тонкостенных цилиндров из стеклопластика

№ серии	Количество образцов	Количество слоев	Марка ткани	Толщина ткани, мм	Плотность ткани, нитей/см		Длина образца, мм	Толщина образца, мм
					по основе	по утку		
1	4	4	TG 430 – С	0,4	19	11	100	2,0 ± 0,2
2	4	4	TG 430 – С	0,4	19	11	200	2,0 ± 0,2

Таблица 2 – Экспериментально-теоретические значения упругих характеристик

№ серии	Результаты эксперимента		Экспериментально – теоретические значения			
	$E_{11}, МПа$	$S, \%$	$E_{ii}, МПа$	$G_{ij}, МПа$	ν_{ij}	ν_{ji}
1	11500	0,85	$E_{11} = 11400$	$G_{12} = 2120$	$\nu_{12} = 0,12$	$\nu_{21} = 0,12$
$E_{22} = 11400$			$G_{13} = 2100$	$\nu_{13} = 0,4$	$\nu_{31} = 0,166$	
$E_{33} = 5160$			$G_{23} = 2100$	$\nu_{23} = 0,4$	$\nu_{32} = 0,166$	
2	12200	0,72	$E_{11} = 12100$	$G_{12} = 2176$	$\nu_{12} = 0,13$	$\nu_{21} = 0,15$
$E_{22} = 12100$			$G_{13} = 2060$	$\nu_{13} = 0,41$	$\nu_{31} = 0,21$	
$E_{33} = 6331$			$G_{23} = 2060$	$\nu_{23} = 0,41$	$\nu_{32} = 0,21$	

Таблица 3 – Экспериментальные значения предельных напряжений

№ серии	$\sigma_{11}^+ = \sigma_{22}^+$, МПа	$\pm a_{\sigma_{cp}}$, МПа	$\sigma_{11}^- = \sigma_{22}^-$, МПа	$\pm a_{\sigma_{cp}}$, МПа	$\sigma_{11}^u = \sigma_{22}^u$, МПа	$\pm a_{\sigma_{cp}}$, МПа
1	180	6	180	7	150	5
2	180	8	180	6	150	4

Как отмечается в работах [3], разброс экспериментальных значений предельных разрушающих напряжений поперечного сдвига и обжатия достаточно большой, что в первую очередь связано с особенностью строения армированных пластиков, трудоемкостью и сложностью проведения эксперимента. Поэтому для проведения дальнейших исследований были приняты средние значения $\sigma_{33}^- = 90 \text{ МПа}$, $\sigma_{33}^+ = 16 \text{ МПа}$, $\sigma_{13}^- = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^- = \sigma_{23}^+ = 30 \text{ МПа}$, $\sigma_{12}^- = \sigma_{12}^+ = 50 \text{ МПа}$ на основе экспериментальных данных, которые были приведены в работе [4] для стеклопластиков похожей структуры.

Нагружение тонкостенного цилиндра внутренним гидростатическим давлением осуществлялось при помощи специально разработанной экспериментальной установки. Схема испытательной установки для испытания круглых цилиндров под действием равномерно распределённой внутренней нагрузки показана на рис. 1. Трехмерная схема и общий вид установки приведены на рис.2.

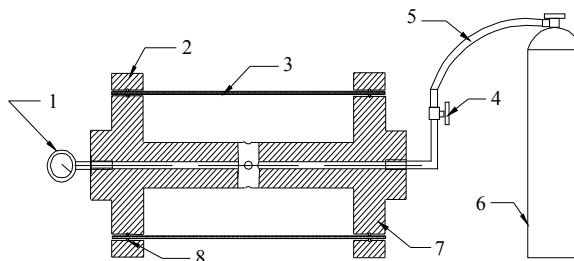


Рисунок 1 – Испытательная установка для исследования напряженно-деформированного состояния тонкостенных цилиндров при действии внутреннего давления: 1 – манометр; 2 – хомут; 3 – экспериментальный образец; 4 – переходной кран; 5 – шланг; 6 – баллон; 7 – два диска со штангой; 8 – эластичное кольцо

Конструкция экспериментальной установки позволяет производить замеры нормальных перемещений цилиндров с помощью индикаторов часового типа с точностью измерений до $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. Граничные условия закрепления торцов цилиндра могут варьироваться от условий свободного опирания до жесткого закрепления.

Установка состоит из штанги с привинченными двумя дисками. На каждом диске закреплены уплотнительные кольца, через которые осуществляется контакт дисков и внутренней поверхности тонкостенного цилиндра. По наружной поверхности цилиндр вдоль линии прилегания уплотнительных колец стягивается хомутами, состоящими из двух половинок, которые соединяются вместе длинными шпильками.

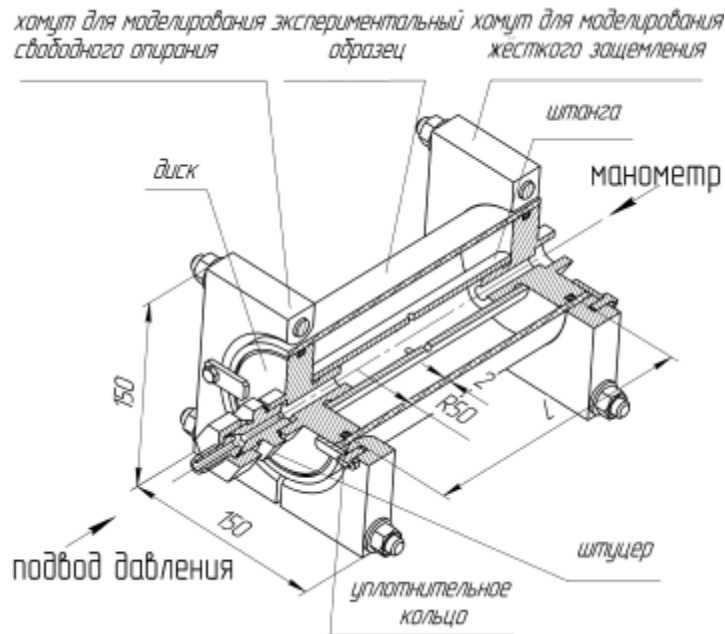


Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной установки для испытания цилиндров

Подготовка образца к испытаниям начинается с навинчивания избранной длины штанги на один из дисков. Сменные штанги позволяют испытывать образцы различной длины. Испытуемый цилиндр надевается на штангу с диском в сборе, а затем оставшийся диск накручивается на штангу, принимая рабочее положение относительно цилиндра.

Диски взаимозаменяемы, в них сделана внутренняя резьба, позволяющая присоединить манометр на один из них. Ко второму диску через переходной штуцер присоединяется ниппель, фиксируемый накладной гайкой. К ниппелю присоединяется шланг подвода внутреннего давления. Нагружение оболочек внутренним давлением производилось воздухом при помощи специальной установки и контролировалось образцовым манометром класса 0,5.

Граничные условия, близкие к шарнирному опиранию и жёсткому защемлению, моделируются наложением соответствующих хомутов и герметичных прокладок. Предлагаемая конструкция допускает замеры радиальных прогибов цилиндра и относительных деформаций методом тензометрирования.

Для измерения деформаций использовались тензорезисторы КФ4П1-3-200 с базой 3 мм. Розетки состояли из двух тензодатчиков. Среднее значение коэффициента тензочувствительности равно $K = 2,0 \cdot 10^{-6}$. Наклейка тензорезисторов осуществлялась согласно инструкции по наклейке АЖВ2.782.001 ТО. Для измерения выходных сигналов тензорезисторов и представления отчетов в цифровом виде использовалась измерительная система СИИТ-3. Руководство по эксплуатации 4Т2.739.004 РЭ. Схема наклейки тензорезисторов на цилиндрические образцы показана на рис. 3. Тензорезисторы, методика их наклейки и измерение деформаций приняты такие же, как и для испытываемых пластин.

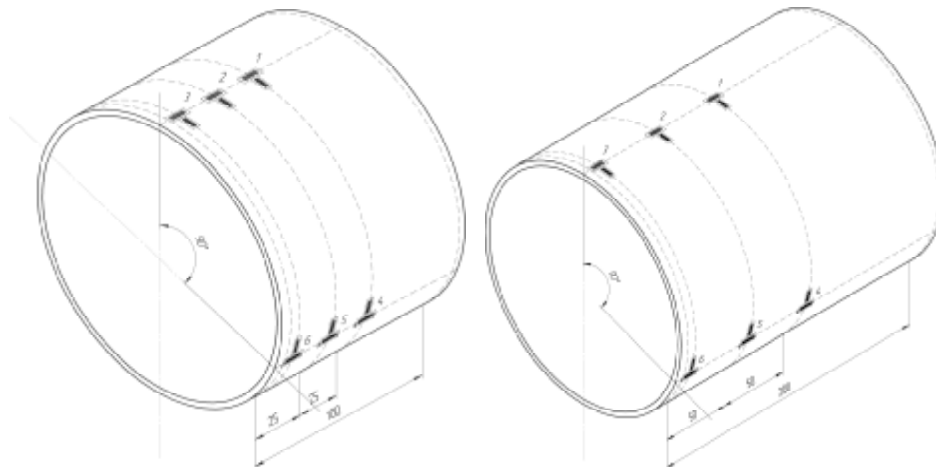


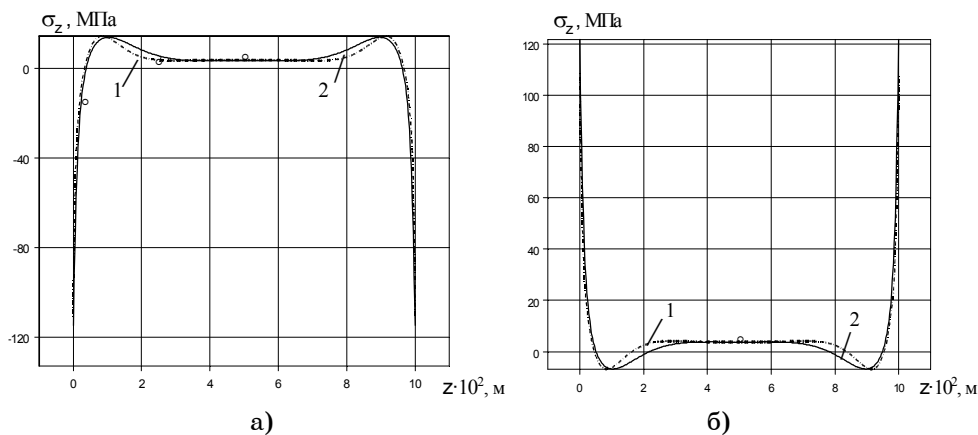
Рисунок 3 – Точки наклейки тензорезисторов на цилиндрические образцы

Теоретические и экспериментальные результаты получены для жестко закрепленных по торцам цилиндрических образцов. При действии внутреннего гидростатического давления интенсивностью q определялись величины нормальных напряжений σ_z , σ_θ в продольном и окружном направлении соответственно, а также напряжения поперечного сдвига – σ_{rz} .

На рис. 4 – 8 приводятся графики изменения напряжений и прогибов в продольном направлении образцов 1 – й серии (длина $L = 0,1 м$). Исследовались жестко защемленные по торцам цилиндры при действии внутреннего давления $q = 1,5 МПа$ и $q = 2,5 МПа$.

Результаты для образцов длиной $L = 0,2 м$ не показаны, так как по величине и качественной картине эпюры рассматриваемых параметров они практически идентичны.

Здесь также не приводятся данные испытаний образцов с кольцевыми участками непрочности. Частично сравнительный анализ теоретических результатов и экспериментальных результатов, полученных при испытании цилиндров длиной $L = 0,1 м$ и с кольцевыми участками непрочности по середине образца, дан в [5].



Рисуно 4 – Изменение напряжений σ_z вдоль лицевых поверхностей цилиндров при жестком закреплении торцов (1 – первая модель; 2 – третья модель; ° – данные эксперимента; $q = 1,5 МПа$)

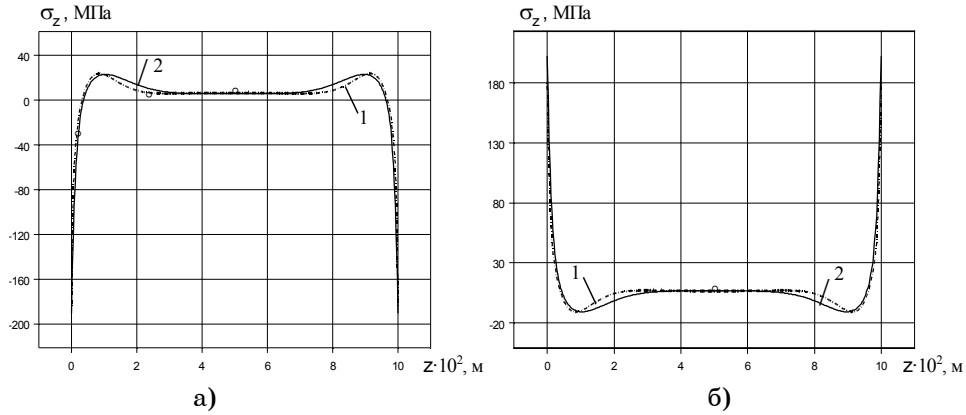


Рисунок 5 – Изменение напряжений σ_z вдоль лицевых поверхностей цилиндров при жестком закреплении торцов (1 – первая модель; 2 – третья модель; ° – данные эксперимента; $q = 2,5$ МПа)

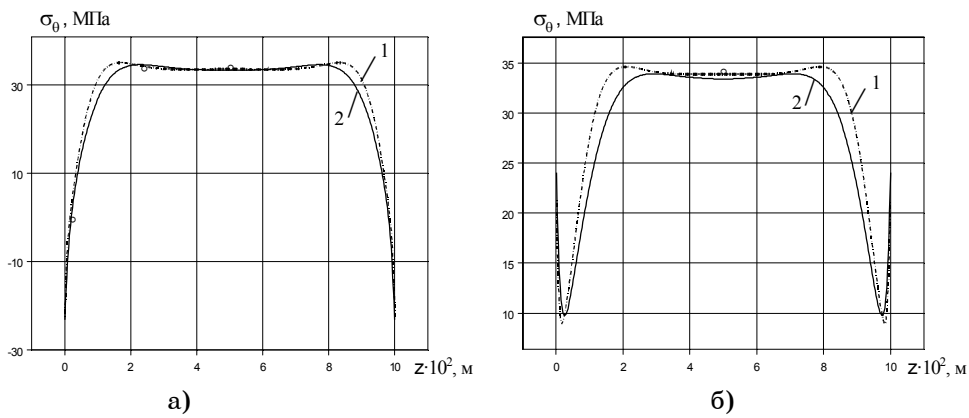


Рисунок 6 – Изменение напряжений σ_θ вдоль лицевых поверхностей цилиндров при жестком закреплении торцов (1 – первая модель; 2 – третья модель; ° – данные эксперимента; $q = 1,5$ МПа)

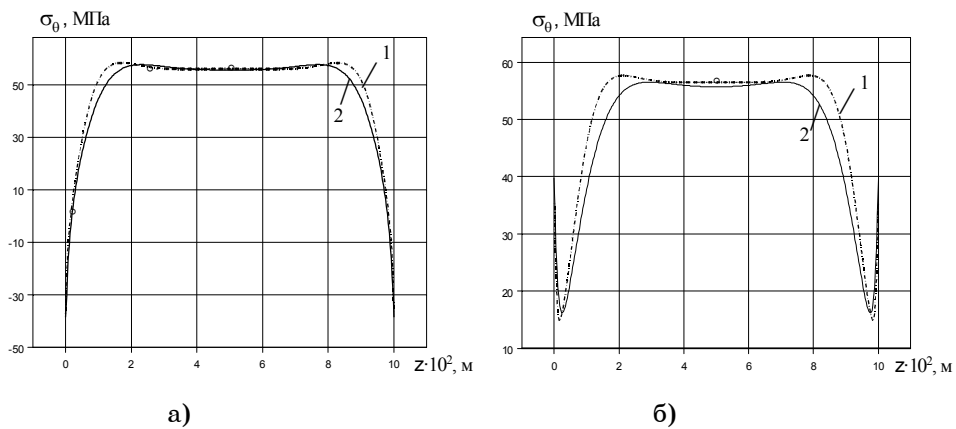


Рисунок 7 – Изменение напряжений σ_θ вдоль лицевых поверхностей цилиндров при жестком закреплении торцов (1 – первая модель; 2 – третья модель; ° – данные эксперимента; $q = 2,5$ МПа)

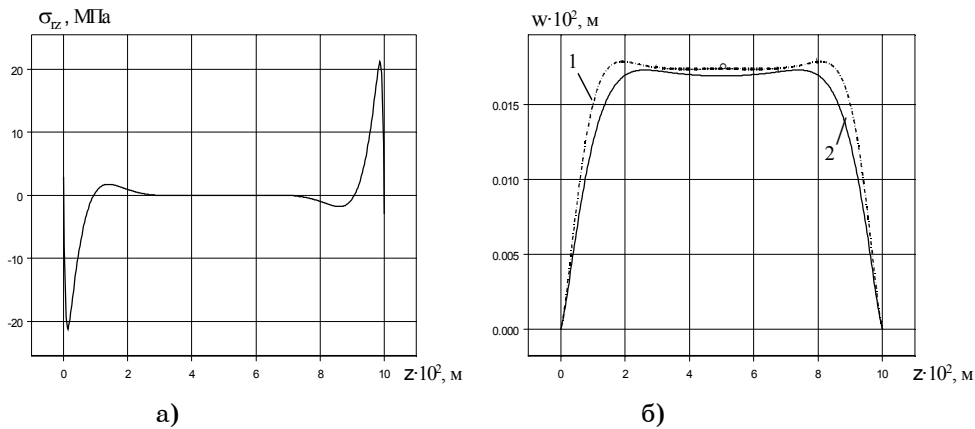


Рисунок 8 – Изменение напряжений σ_{rz} и прогиба w по срединной поверхности цилиндра при жестком закреплении торцов и $q=2,5$ МПа

При экспериментальном определении напряженного состояния стеклопластиков, как известно, имеет место разброс результатов. В основном, причины, вызывающие этот разброс данных эксперимента, не связан с методикой испытания, а вызван несовершенной технологией изготовления образцов и анизотропией стеклопластика. Тем не менее, предложенная здесь методика эксперимента, высокое качество изготовления образцов позволили получить достаточно точные результаты (относительная погрешность результатов теории и эксперимента не превышает 5%).

Отдельно следует отметить, что в случае безмоментного плоского напряженного состояния (при внутреннем давлении $q=2,5$ МПа (рис. 8 б)

величина прогиба w не превышает $0,18 \cdot 10^{-3}$ м) первая и третья расчетные модели многослойной трансверсально изотропной оболочки дают практически одинаковый результат, который достаточно точно совпадает с величиной окружных напряжений, полученных по формуле $\sigma_{\theta} = qr/h$. Основное отличие результатов по этим двум моделям наблюдается в области жестко зацементированных торцов оболочки.

Как показано на рис. 8 а, на расстоянии толщины оболочки от его торца имеют место значительные касательные напряжения σ_{rz} , что в сочетании с нормальными напряжениями σ_z приводит к разрушению образцов при усредненном значении интенсивности внутреннего давления $q^* = 2,65$ МПа.

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими результатами позволило сделать выводы, что в результате сравнительно низкой жесткости стеклопластиков на изгиб и слабой сопротивляемости поперечному сдвигу применение традиционной непрерывно структурной модели при расчетах тонкостенных армированных элементов конструкций даже в начальной стадии нагружения приводит к значительным погрешностям.

Установлено, что в случае плоского напряженного состояния многослойной трансверсально изотропной оболочки при действии внутреннего давления дискретно – структурная и непрерывно – структурная теории дают практически одинаковый результат. Основное отличие результатов по этим двум моделям наблюдается на участках, прилегающих к жестко зацементированным торцам оболочки. На расстоянии

порядка толщины оболочки от его торца имеют место значительные касательные напряжения σ_{rz} , что в сочетании с нормальными напряжениями σ_z приводит к разрушению образцов при усредненном значении интенсивности внутреннего давления $q^* = 2,65 \text{ МПа}$.

SUMMARY

EXPERIMENTAL RESEARCH OF MULTI-LAYERED CYLINDERS UNDER INTERNAL HYDROSTATIC PRESSURE

Vereshaka S.M., Zhygilyi D.A.

The experimental verification method of theoretical results and estimated errors which appear in different sort of assumption of thin-walled structure element with interlaminar defects stress calculation is offered. Two contact junctions of rigid anisotropic layers problem solution models are given to model impaired contact sections. The experimental modulus of elasticity and tension and bending ultimate strength of glass-fiber material are presented also other missing mechanical constants are calculated according them. The experimental assembly for studying glass-fiber thin-walled cylinders under internal pressure description is brought.

Experimental results comparing to the theoretical ones allowed to conclude, that due to comparative low resistance of glass-fiber material to bending and transversal shearing, the tradition continuous structural model calculating thin-walled reinforced construction elements gives considerable errors even at the initial solving stage.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верещака С.М. Влияние межфазных дефектов структуры материала на прочность несущих многослойных элементов конструкций сосудов высокого давления // Проблемы машиностроения, 2005. – Т.8, №4. – С. 45 – 54.
2. Пискунов В.Г., Рассказов А.О. Развитие теории слоистых пластин и оболочек // Прикладная механика. – 2002. – Т.38. – №2. – С. 22-56.
3. Кучер Н.К., Заразовский М.Н. Оценка прочности слоистых эпоксикарбоволоконитов, армированных однонаправленными волокнами // Пробл. прочности. – 2006. – № 6. – С. 95 – 112.
4. Композиционные материалы. Справочник / Под ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
5. Верещака С.М. Дискретно-структурна модель циліндра з міжфазними дефектами // Машинознавство. – 2006. – №7. – С. 33 – 37.

Верещака С.М., канд. техн. наук, доцент;

Жигилий Д.А., ассистент

Поступила в редакцию 26 марта 2008 г.