

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Кирюшина, Ю.Ю. Ковалева, П.А. Степанов, П.В. Коваленко

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»

249031, Россия, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 15

Р

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используются и являются перспективными для применения в различных отраслях промышленности, в том числе и в атомной энергетике. Несмотря на различные методы и методики исследований механических характеристик ПКМ использование результатов механических испытаний лабораторных образцов для проектирования и моделирования крупногабаритных конструкций не всегда является полностью корректным и обоснованным. Одной из проблем является учет влияния параметра масштаба на прочностные и упругие характеристики ПКМ непосредственно в изделии.

Работа посвящена исследованию влияния масштабного фактора на механические характеристики стеклопластиков на основе фенолформальдегидного и кремнийорганического связующих и тканевого кварцевого наполнителя.

Для оценки масштабного фактора проведены испытания на трехточечный изгиб образцов четырех различных типоразмеров в соответствии с ГОСТ 25604-82 и ГОСТ 4648-2014 на испытательной машине LFM-100. Толщины модельных образцов выбраны исходя из толщин стенок натуральных изделий, находящихся в опытно-конструкторских разработках и серийном производстве, и особенностей испытательного оборудования, и варьировались в пределах 1,6 – 7,5 мм.

В результате испытаний выявлено снижение прочности при увеличении толщины образца от 3 мм и более как при комнатной, так и при повышенных температурах (200 – 500°C), которое может быть описано степенной зависимостью, вытекающей из статистической модели Вейбулла. Значения модуля Вейбулла, характеризующего степень масштабной зависимости прочности исследуемых материалов, составили 4,6 – 6,7. В диапазоне толщин образцов 3 мм и ниже средний предел прочности при изгибе или значимо не меняется, или проявляет тенденцию к незначительному возрастанию при увеличении толщины. Данный факт позволяет заключить, что для оценки допустимых напряжений в «тонкостенном» изделии необходимо использовать результаты испытаний образцов толщиной, соответствующей толщине стенки изделия, поскольку стандартные образцы могут давать завышенные значения допустимых напряжений и, соответственно, приводить к некорректным расчетам коэффициента запаса прочности.

Полученные результаты необходимо учитывать при установлении допустимых уровней работы натуральных изделий и конструкций из полимерных композитов на основании данных по прочности лабораторных образцов, а также в оценке их надежности как одной из характеристик безотказной работы изделия.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, стеклопластики, масштабный фактор, прочность, статистическая модель Вейбулла, размерный эффект.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы широко используются и являются перспективными для применения в различных отраслях промышленности, в том числе и атомной энергетике. ПКМ могут успешно применяться и замещать традиционно используемые металлы и диэлектрики в качестве защитных композиций, теплоизоляционных, радиопрозрачных и конструкционных силовых элементов.

Использование результатов механических испытаний лабораторных образцов для проектирования и моделирования крупногабаритных конструкций далеко не всегда является полностью корректным и обоснованным, несмотря на то, что разработаны и широко применяются различные методы и методики исследований механических характеристик ПКМ. Например, проблемой является учет влияния параметра масштаба на прочностные и упругие характеристики ПКМ непосредственно в изделии (конструкции) [1 – 3].

Под масштабным эффектом прочности подразумевается нарушение классических законов подобия, наблюдаемое при механических испытаниях геометрически подобных образцов. Это нарушение кажущееся – оно свидетельствует о том, что на прочность образца влияют параметры, имеющие размерность длины, но не входящие в классические уравнения теории упругости и пластичности. Это может быть характерный размер волокна, зерна, микроскопической трещины и т.д. Чем грубее структура композита, чем соизмеримее структурные масштабы длины с масштабами образца, тем при прочих равных условиях сильнее проявляется масштабный эффект.

Масштабный эффект прочности композитов является естественным следствием неоднородности структуры. Неоднородность структуры вместе с тем носит стохастический характер. На современном уровне технологий в процессе производства КМ неизбежно возникают дефекты: микротрещины, расслоения, местные нарушения адгезии, поверхностные вздутия, коробления, избыточная пористость и т.д. Наличие дефектов приводит к статистической изменчивости физико-механических свойств и масштабному эффекту.

Таким образом, оценка влияния размера на прочность имеет существенное значение при проектировании композитных конструкций, и выработка соответствующего подхода к этому – это необходимый этап при разработке технологии композиционных материалов.

Наиболее эффективным способом учета масштабного фактора прочности для однородных, изотропных материалов является использование статистической модели Вейбулла [4 – 6], основанной на предположении о том, что объем изделия – это совокупность отдельных мелких объемов, и в случае отказа одного из них произойдет катастрофический отказ всего изделия.

Вероятность разрушения изделия объемом V при неоднородном напряженном состоянии с учетом величины объема и степени неравномерности распределения напряжений в объеме можно оценить с помощью функции распределения

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[- \frac{1}{V_0} \int_V \left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0} \right)^m dV \right], \quad (1)$$

где m , σ_0 , σ_{\min} – параметры распределения Вейбулла; V_0 – объем стандартного образца. Параметр m , известный как модуль Вейбулла, является мерой рассеяния значений прочности материала и характеризует степень масштабной зависимости прочности.

Несмотря на то, что модель Вейбулла успешно применяется для хрупких изотропных материалов в установлении взаимосвязи разрушающего напряжения различных объемов материала, ее применение не настолько очевидно для анизотропных материалов, таких как стеклопластики, даже в простом случае при одноосном растяжении в направ-

лении армирования [7 – 15].

Цель работы – исследование влияния масштабного фактора на прочность стеклопластиковых материалов и пригодности для этой цели статистической модели Вейбулла.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами исследования являются ПКМ на основе фенолоформальдегидных смол (ФНкв.) и с последующей пропиткой раствором метилфенилспироксидоксана – МФСС-8 (ФНкв.+МФСС-8) [16]. Изделия, исследуемые в работе, изготовлены на основе кварцевой ткани сатинового плетения методом пропитки под давлением [17].

Для оценки масштабного эффекта прочности были изготовлены образцы-балочки из материалов ФНкв. и ФНкв.+МФСС-8 четырех типоразмеров: 1,6×10×32 мм; 3,0×10×60 мм; 4,0×10×80 мм; 7,5×10×150 мм. Толщины модельных образцов выбраны исходя из толщин стенок натуральных изделий, находящихся в опытно-конструкторских разработках и серийном производстве, и особенностей испытательного оборудования. Образцы были изготовлены из одной партии ткани и пропитаны одной партией связующего с целью минимизации влияния побочных технологических факторов на свойства материалов.

Для проведения испытаний использовалась методика, разработанная в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» на основе ГОСТ 25604-82 и ГОСТ 4648-2014. Данная методика устанавливает метод испытания на изгиб композиционных материалов, армированных стекло- или органическими волокнами, в интервале температур от минус 60°C и до плюс 1500°C. Сущность метода заключается в том, что испытуемый образец прямоугольного поперечного сечения, свободно лежащий на опорах, подвергают изгибу с постоянной скоростью в середине между опорами до его разрушения или до достижения образцом заданного значения относительной деформации или прогиба. При этом под пределом прочности при изгибе понимается максимальное значение изгибающего напряжения при разрушении. Испытания на определение предела прочности при статическом изгибе были проведены по основе тканевого наполнителя и при температурах $T = 20, 200, 400$ и 500°C . Выборки составляли по пять образцов материалов ФНкв. и ФНкв.+МФСС-8 каждого размера для каждой температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний по определению предела прочности при изгибе материалов ФНкв. и ФНкв.+МФСС-8 приведены в табл. 1, 2 соответственно. Графики зависимости максимального изгибающего напряжения разрушения от толщины образца при различных температурах испытания представлены на рис. 1, 2. В исследовании были учтены только результаты испытаний образцов, разрушенных в зоне растяжения; образцы с другим характером разрушения (расслоение, контактное смятие и т.д.) исключены из рассмотрения.

Таблица 1

Предел прочности при изгибе (МПа) образцов материала ФНкв. различных размеров при разных температурах испытания

Толщина образца, мм	Температура испытания T , °C			
	20	200	400	500
1,6	430 ± 10	421 ± 17	285 ± 18	192 ± 28
3,0	486 ± 51	421 ± 61	236 ± 21	180 ± 4
4,0	405 ± 21	325 ± 28	213 ± 8	147 ± 10
7,5	360 ± 21	275 ± 25	171 ± 11	128 ± 9

Таблица 2

Предел прочности при изгибе (МПа) образцов материала ФНкв.+МФСС-8 различных размеров при разных температурах испытания

Толщина образца, мм	Температура испытания T , °C			
	20	200	400	500
1,6	436 ± 33	373 ± 39	251 ± 6	193 ± 4
3,0	453 ± 62	394 ± 47	259 ± 10	201 ± 4
4,0	348 ± 33	325 ± 23	237 ± 14	162 ± 11
7,5	325 ± 7	284 ± 13	192 ± 8	137 ± 10

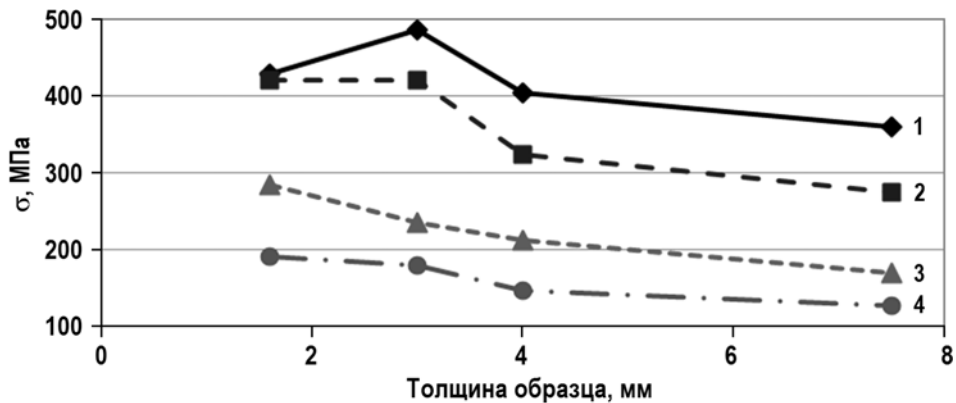


Рис. 1. Зависимость максимального изгибающего напряжения разрушения образцов материала ФНкв. от толщины образца при различных температурах испытания: 1 – 20°C; 2 – 200°C; 3 – 400°C; 4 – 500°C

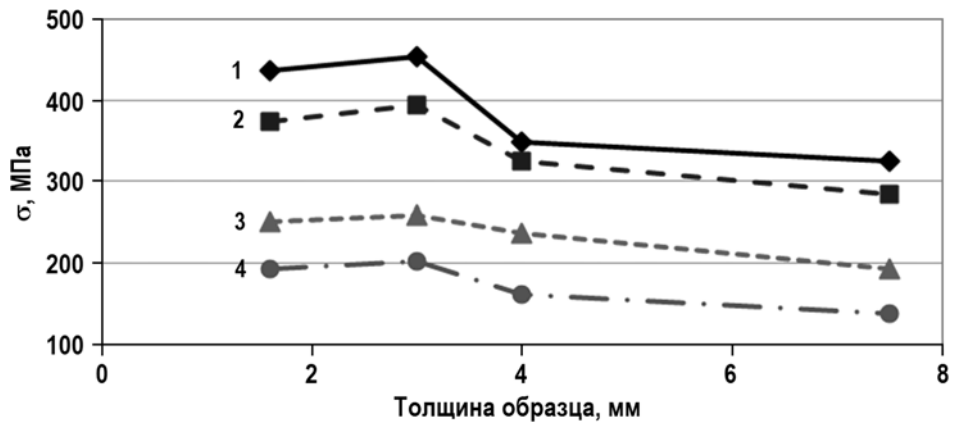


Рис. 2. Зависимость максимального изгибающего напряжения разрушения образцов материала ФНкв.+МФСС-8 от толщины образца при различных температурах испытания: 1 – 20°C; 2 – 200°C; 3 – 400°C; 4 – 500°C

Анализ представленных данных показывает, что в диапазоне толщин 3,0 – 7,5 мм у обоих материалов отмечается тенденция к уменьшению среднего предела прочности при изгибе образцов для всех температур испытания. В среднем прочность образцов с $h = 7,5$ мм снижается на 30% по сравнению с прочностью образцов с $h = 3,0$ мм.

При увеличении толщин образцов с 1,6 до 3,0 мм средняя прочность или значимо не меняется, или проявляет тенденцию к незначительному возрастанию (максимальное

возрастание отмечается на 13% при $T = 20^\circ\text{C}$ у материала ФНкв.). Отсутствие значимого изменения прочности или ее уменьшение у исследуемых материалов при $h = 3\text{ мм}$ и ниже хорошо согласуется с аналогичными результатами, полученными другими исследователями на полиэфирных стеклопластиках, армированных тканями различного плетения, и изложенными в [2]. Отсутствие или обратный масштабный эффект прочности у «тонких» пластиков был отмечен при толщине стенки 2 мм и меньше, в связи с чем настоящее исследование планируется продолжить в диапазоне толщин 2,0 – 3,0 мм и на выборках образцов, обладающих достаточной репрезентативностью. Однако уже на данном этапе полученный результат для «тонкого» пластика позволяет заключить, что для описания прочности материала в «тонкостенном» изделии и оценки его вероятности безотказной работы необходимо использовать функцию нормального закона распределения, а для оценки допустимых напряжений – результаты испытаний образцов толщиной, соответствующей толщине стенки изделия.

Для оценки пригодности модели Вейбулла при описании масштабной зависимости прочности первоначально была решена задача корректности использования функции распределения Вейбулла (1) для описания результатов испытаний стандартных образцов материала.

На рисунке 3 приведены гистограмма предела прочности при изгибе образцов материала ФНкв.+ МФСС-8 размером $4 \times 10 \times 80\text{ мм}$ при $T = 20^\circ\text{C}$ и ее аппроксимация функцией нормального распределения и двухпараметрической функцией распределения Вейбулла ($\sigma_{\min} = 0$). Объем выборки был увеличен до $N = 50$ шт. с целью минимизации ошибок оценки параметров Вейбулла [5, 18].

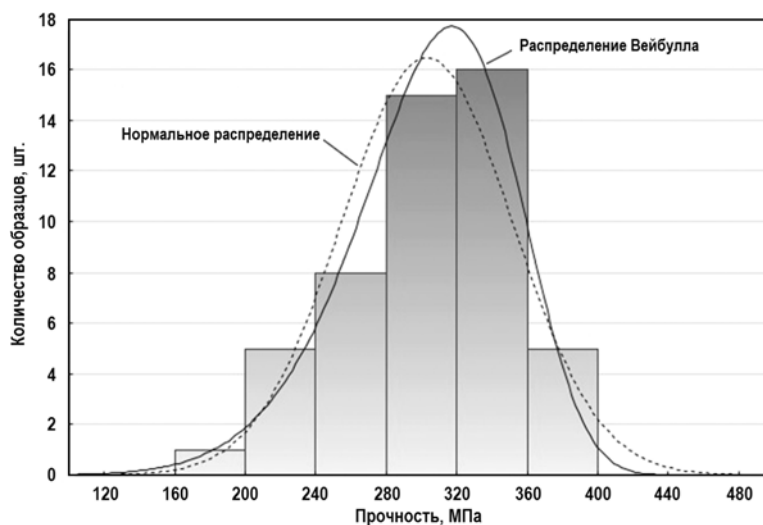


Рис. 3. Распределение значений предела прочности при изгибе стандартных образцов материала ФНкв.+ МФСС-8 при $T = 20^\circ\text{C}$

Проведенный анализ не отвергает применение распределений Гаусса и Вейбулла для описания результатов прочностных испытаний образцов материала. Однако поскольку эмпирическое распределение проявляет некоторую асимметрию, распределение Вейбулла в большей степени подходит для аппроксимации экспериментальных данных. Уровень значимости по критерию согласия Манна [19] составил $p > 0,90$. Оценки параметров Вейбулла, полученные методом максимального правдоподобия [18, 20], равны $m = 7,7$; $\sigma_0 = 317\text{ МПа}$. Значение модуля Вейбулла близко к значениям данного параметра для ряда отечественных стеклопластиков [7, 8].

Важным моментом использования модели Вейбулла является учет масштабного эффекта прочности в инженерных расчетах. Задаваясь вероятностью разрушения образ-

цов $P = 50\%$, из выражения (1) получаем следующую масштабную зависимость:

$$\sigma^{cp_0}/\sigma^{cp_1} = (V_{eff1}/V_{eff0})^{1/m}, \quad (2)$$

где σ^{cp_0} , σ^{cp_1} – средние пределы прочности; V_{eff1} , V_{eff0} – эффективные (напряженные) объемы [21]. Это соотношение можно использовать для оценки пределов прочности объемов материала при различных схемах нагружения, а также для прогнозирования среднего предела прочности материала в изделии по разрушающему напряжению лабораторных образцов.

Вместо эффективных объемов в выражении (2) могут быть использованы эффективные площади поверхностей, что зависит от того, какие виды дефектов – объемные или поверхностные – контролируют прочность.

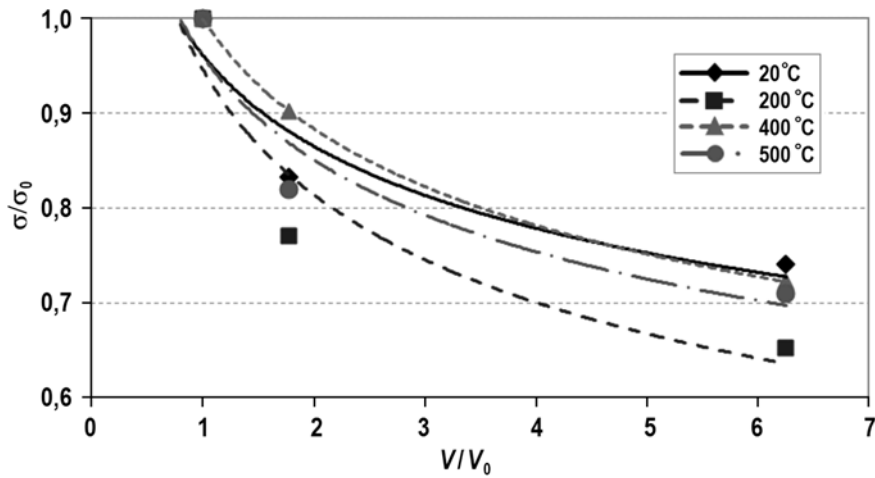


Рис. 4. Относительное снижение среднего предела прочности материала ФНкв. в зависимости от относительного увеличения объема

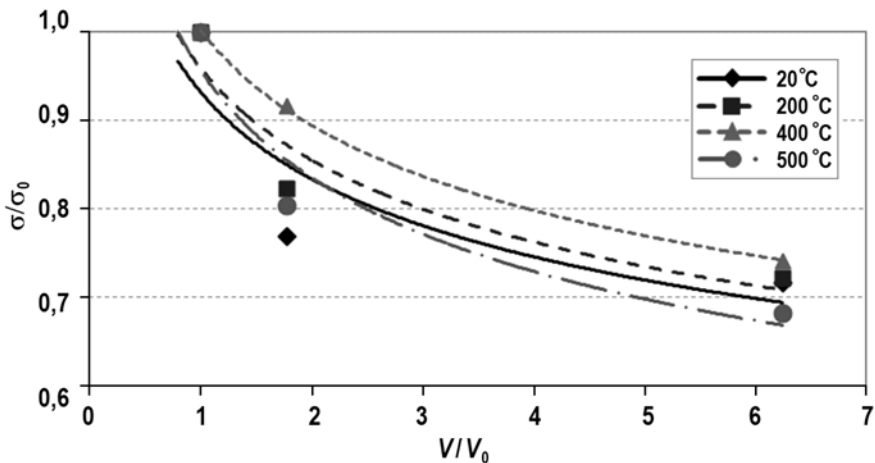


Рис. 5. Относительное снижение среднего предела прочности материала ФНкв.+МФСС-8 в зависимости от относительного увеличения объема

На рисунках 4, 5 приведены относительные снижения среднего предела прочности материалов ФНкв. и ФНкв.+МФСС-8 в зависимости от относительного увеличения объема образцов совместно с построенными по ним масштабными зависимостями (2). Масштабные зависимости построены на основании значений σ трех групп образцов с $h = 3,0; 4,0$ и $7,5$ мм, для которых было выявлено снижение прочности при увеличении h .

Как следует из представленных данных, для различных температур испытания наблюдается различная ошибка аппроксимации экспериментальных данных степенной кривой. Наибольшее расхождение для материала ФНкв. отмечается при $T = 200^\circ\text{C}$ – 12,6%; для ФНкв.+ МФСС-8 – при $T = 20^\circ\text{C}$ – 15,7%. Для остальных температур испытания различия в прогнозируемых и экспериментальных оценках предела прочности обоих ПКМ составили не более 10%. Данная ошибка прогноза возможно связана с недостаточным количеством испытанных образцов и, следовательно, высокими значениями ошибки оценок среднего, в связи с чем исследования рекомендовано продолжить. Однако уже первоначально полученные результаты не противоречат тому факту, что масштабный эффект прочности исследуемых ПКМ, наблюдаемый экспериментально, может быть описан зависимостью (2), вытекающей из модели Вейбулла.

Значения модуля Вейбулла, оцененные по степеням аппроксимирующих масштабных кривых, составляют $m = 4,6 - 6,7$ для материала ФНкв. и $m = 5,1 - 6,2$ для материала ФНкв.+МФСС-8. Данные значения близки к значениям параметра m , получаемым по результатам испытаний на прочность стандартных образцов материалов в серийном производстве, что в очередной раз подтверждает корректность использования модели Вейбулла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты начального этапа работ по оценке масштабного эффекта прочности ПКМ на основе фенолформальдегидного и кремнийорганического связующих. По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. В диапазоне толщин образцов 3 мм и ниже средний предел прочности при изгибе или значимо не меняется, или проявляет тенденцию к незначительному возрастанию, что говорит о необходимости использования функции нормального закона распределения для описания прочности материала в «тонкостенном» изделии и оценки его вероятности безотказной работы, а для оценки допустимых напряжений – результатов испытаний образцов толщиной, соответствующей толщине стенки изделия.

2. Существует значительное влияние размера образца на максимальное изгибающее напряжение при разрушении при толщине образца 3 мм и более. В среднем снижение предела прочности отмечается на уровне 30%.

3. Обработка результатов механических испытаний образцов-балок разного поперечного сечения показала, что зависимость прочности от масштаба может быть описана степенным уравнением (2), вытекающим из статистической модели Вейбулла, эффективно применяемой в оценке масштабного эффекта прочности изотропных материалов. Значения модуля Вейбулла, характеризующего степень масштабной зависимости прочности, составляют $m = 4,6 - 6,7$ для материала ФНкв. и $m = 5,1 - 6,2$ для материала ФНкв.+МФСС-8 и близки к значениям данного параметра для ряда отечественных стеклопластиков.

4. Статистическая модель Вейбулла может использоваться для оценок влияния размерного фактора на прочность образцов и конструкций из ПКМ. Однако исследования в данном направлении необходимо продолжить в части увеличения количества образцов с целью минимизации статистических ошибок; испытания образцов других конфигураций и при других схемах нагружения.

Полученные в работе результаты необходимо учитывать при установлении допустимых уровней работы натуральных изделий и конструкций из полимерных композитов на основании данных по прочности лабораторных образцов, а также в оценке их надежности (вероятности безотказной работы).

Литература

1. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

2. *Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М.* Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. – Рига: Зинатне, 1966. – 260 с.
3. *Болотин В.В., Новичков Ю.Н.* Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
4. *Болотин В.В.* Статистические методы в строительной механике. – М.: Стройиздат, 1965. – 279 с.
5. *Баринов С.М., Шевченко В.Я.* Прочность технической керамики. – М.: Наука, 1996. – 159 с.
6. *Левшанов В.С. и др.* Влияние масштабного фактора на прочность стеклокерамического антенного обтекателя. // Механика композиционных материалов и конструкций, 2006. – Т. 12. – № 3. – С. 312-316.
7. *Серенсен С.В., Стреляев В.С.* Об эффекте абсолютных размеров при испытании на разрыв конструкционных стеклопластиков // Заводская лаборатория. – 1962. – Т. XXVIII. – № 4. – С. 483-485.
8. *Серенсен С.В., Зайцев Г.П.* Разрушение стеклопластиков при кратковременном нагружении. // Механика полимеров. – 1965. – № 2. – С. 93-103.
9. *Ермоленко А.Ф.* Масштабный эффект прочности при растяжении однонаправленных армирующих элементов. // Механика композитных материалов. – 1986. – № 1. – С. 38-43.
10. *Аргон А.* Статистические аспекты разрушения. Композиционные материалы: В 8 т. Т. 5 / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М.: Мир, 1978. – С. 166-205.
11. *Bullock R.E.* Strength ratios of composite materials in flexure and tension // Journal of Composite Materials. – 1974. – No. 8. – PP. 200-206.
12. *Hitchon J.W., Phillips D.C.* The effect of specimen size on the strength of CFRP. // Composites. – 1978. – No. 9. – PP. 119-124.
13. *Фудзии Т., Дзако М.* Механика разрушения композиционных материалов. – М: Мир, 1982. – 232 с.
14. *Cui W., Wisnom M., Jones M.* Effect of specimen size on interlaminar shear strength of unidirectional carbon fibre-epoxy. // Composites Engineering. – 1994. – Vol. 4. – No. 3. – PP. 299-307.
15. *Bazant Z.P., Daniel I.M., Li Zhengzhi* Size effect and fracture characteristics of composite laminates // ASME J. Eng. Mat. Tech. – 1996. – No. 118 (3). – PP. 317-324.
16. *Русин М.Ю. и др.* Композиционные материалы для радиопрозрачных обтекателей летательных аппаратов. // Новые огнеупоры, 2014. – № 10. – С. 8-13.
17. *Гуртовник И.Г. и др.* Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. / Под ред. В.И. Соколова. – М.: Мир, 2003. – 368 с.
18. *Кирюшина В.В. и др.* Оценка параметров распределения Вейбулла при анализе прочности керамических материалов для обтекателей. // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2006. – Т. 12. – № 1. – С. 76-82.
19. *Капур К., Ламберсон Л.* Надежность и проектирование систем. / Пер. с англ. Е.Г. Коваленко. – М.: Мир, 1980. – 607 с.
20. *Ивченко Г.И., Медведев Ю.И.* Математическая статистика: учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1992. – 304 с.
21. *Jajatilaka A., Trustrum K.* Statistical approach to brittle fracture. // J. Materials Sciences. – 1977. – Vol. 12. – No. 8. – PP. 1426-1432.

Поступила в редакцию 04.10.2018 г.

Авторы

Кирюшина Валентина Владимировна, научный сотрудник

E-mail: vkiryushina@gmail.com

Ковалева Юлия Юрьевна, математик 3 категории

E-mail: fenich@inbox.ru

Степанов Петр Александрович, начальник лаборатории

E-mail: pstep@mail.ru

Коваленко Павел Васильевич, математик 2 категории

E-mail: p.v.kovalenko@mail.ru;

UDC 53.04

A STUDY INTO THE SCALING FACTOR EFFECTS ON THE STRENGTH PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Kiryushina V.V., Kovaleva Yu.Yu., Stepanov P.A., Kovalenko P.V.

JSC «ORPE «Tekhnologiya» n.a. A.G. Romashin

15 Kiyevskoye shosse, Obninsk, Kaluga Reg., 249031 Russia

ABSTRACT

Polymer composite materials (PCM) are used extensively and are viewed as candidates for application in various industries, including nuclear power. Despite a variety of methods and procedures to investigate the mechanical characteristics of PCMs, the use of the laboratory sample mechanical test results to design and model large-size structures is not always fully correct and justified. In particular, one of the problems is concerned with taking into account the scale parameter effects on the PCM strength and elastic characteristics immediately in the product.

The purpose of the study is to investigate the scaling factor effects on the mechanical characteristics of fiber glass using phenolformaldehyde and silicon-organic binders and a fabric quartz filler.

Samples of four different standard sizes under GOST 25604-82 and GOST 4648-2014 were tested for three-point bending using an LFM-100 test machine to estimate the scaling factor. The thicknesses of the model samples were chosen with regard for the wall thicknesses of full-scale items under development or in batch production, and the test machine features, and varied in the limits of 1.6 to 7.5 mm.

The tests showed a strength decrease with the sample thickness increase to 3 mm and more both at room and elevated (200 to 500°C) temperatures which can be described by an exponential function based on the Weibull statistical model. The values of the Weibull modulus that characterizes the extent of the scale effects on the strength of the tested materials were 4.6 to 6.7. The average bending strength in the sample thickness range of 3 mm and less does not vary notably or tends to increase slightly as the thickness is increased. This fact makes it possible to conclude that estimation of allowable stresses in a thin-wall item requires the use of test results for samples with a thickness that is equal to the item wall thickness since standard samples may yield overestimated allowable stress values and lead, accordingly, to incorrect calculations of the strength factor.

The results obtained shall be taken into account when defining the permissible levels of operation for full-scale items and structures of polymer composites based on the laboratory sample strength data as well as when estimating their robustness as a characteristic of the item's safe operation.

Key words: polymer composite materials, fiber glass, scaling factor, strength, Weibull statistical model, dimensional effect.

REFERENCES

1. Vasilyev V.V. *Mechanics of designs from composite materials*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1988, 272 p. (in Russian).
2. Tarnopolsky Yu.M., Skudra A.M. *Constructional durability and deformation of glass-reinforced plastics*. Riga. Zinatne Publ., 1966. 260 p. (in Russian).
3. Bolotin V.V., Novichkov Yu.N. *Mechanics of laminated constructions*. Mashinostroenie Publ., 1980. – 375 p. (in Russian).
4. Bolotin V.V. *Statistical methods in structural mechanics*. Moscow. Stroyizdat Publ., 1965. – 279 p. (in Russian).

5. Barinov S.M., Shevchenko V.Ya. *Strength of technical ceramics*. Moscow. Nauka Publ., 1996, 159 p. (in Russian).
6. Levshanov V.S., Fetisov V.S., Kiryushina V.V., Verevka V.G., Rusin M.Yu. Size effect on strength of glass-ceramic antenna fairing. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsij*, 2006, v. 12, no. 3, pp. 312-316 (in Russian).
7. Serensen S.V., Strelyaev V.S. Size effect in tensile test of glass-reinforced plastics. *Zavodskaya laboratoriya*, 1962, v. XXVIII, no. 4, pp. 483-485 (in Russian).
8. Serensen S.V., Zaytsev G.P. Destruction of glass-reinforced plastics at short-term loading. *Mekhanika polimerov*, 1965, no. 2, pp. 93-103 (in Russian).
9. Ermolenko A.F. Scaling effect of tensile strength of the unidirectional reinforcing elements. *Mekhanika kompositnykh materialov*, 1986, no. 1, pp. 38-43 (in Russian).
10. Argon A. *Statistical aspects of destruction. Composite materials*: In 8 vols. Vol. 5. Moscow. Mir Publ., 1978, pp. 166-205 (in Russian).
11. Bullock R.E. Strength ratios of composite materials in flexure and tension *Journal of Composite Materials*, 1974, no. 8, pp. 200-206.
12. Hitchon J.W., Phillips D.C. The effect of specimen size on the strength of CFRP. *Composites*, 1978, no. 9, pp. 119-124.
13. Fudzii T., Dzako M. *Fracture mechanics of composite materials*. Moscow. Mir Publ., 1982, 232 p. (in Russian).
14. Cui W., Wisnom M., Jones M. Effect of specimen size on interlaminar shear strength of unidirectional carbon fiber-epoxy. *Composites Engineering*, 1994, v. 4, no. 3, pp. 299-307.
15. Bazant Z.P., Daniel I.M., Li Zhengzhi. Size effect and fracture characteristics of composite laminates. *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, 1996, no. 118 (3), pp. 317-324.
16. Rusin M.Yu., Vasilenko V.V., Stepanov P.A. Composite materials for a radiotransparent fairing of aircraft. *Novye ognepory*, 2014, no. 10, pp. 8-13 (in Russian).
17. Gurtovnik I.G., Sokolov V.I., Trofimov N.N., Shalgunov S.I. *Radiotransparent elements from glass-reinforced plastics*. Ed. by V.I. Sokolov. Moscow. Mir Publ., 2003, 368 p. (in Russian).
18. Kiryushina V.V., Levshanov V.S., Fetisov V.S., Rusin M.Yu. Assessment of Weibull parameters in strength analysis of ceramic materials for antenna fairing. *Mekhanika kompositnykh materialov i konstruktsij*, 2006, v. 12, no. 1, pp. 76-82 (in Russian).
19. Kapur K., Lamberson L. *Reliability in engineering design*. Moscow. Mir Publ., 1980, 607 p. (in Russian).
20. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Mathematical statistics: schoolbook for technical colleges*. Moscow. Vysshaya shkola Publ., 1992, 304 p. (in Russian).
21. Jajatilaka A., Trustrum K. Statistical approach to brittle fracture. *Journal Materials Sciences*, 1977, v. 12, no 8, pp. 1426-1432.

Authors

Kiryushina Valentina Vladimirovna, Researcher

E-mail: vkiryushina@gmail.com

Kovaleva Yuliya Yuryevna, Category 3 Mathematician

E-mail: fenich@inbox.ru

Stepanov Pyotr Aleksandrovich, Head of Laboratory,

E-mail: pstep@mail.ru

Kovalenko Pavel Vasilyevich, Category 2 Mathematician

E-mail: p.v.kovalenko@mail.ru