

КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ КОРОТКИХ СТЕКЛЯННЫХ ВОЛОКОН¹

С.Б. Сапожников², Р.Р. Абдрахимов³, А.А. Шакиров⁴

Приведены результаты экспериментальных исследований прочности хаотически армированного стеклопластика, получены данные по чувствительности материала к концентратору напряжений в виде отверстия. Определено значение эффективного предела прочности для данного материала с помощью нелокального экспресс-критерия и эффективный размер конечного элемента для оценки прочности элементов конструкций с концентраторами напряжений.

Ключевые слова: хаотически армированный стеклопластик, концентратор напряжения, метод конечных элементов, Экспресс-критерий.

Введение

Использование высокопрочных стеклопластиков во многих отраслях промышленности связано с определенными сложностями, вытекающими из анизотропии и особенностей способа крепления элементов конструкции – клеевых, болтовых и заклепочных соединений [1].

В случае использования болтовых или заклепочных соединений в материале просверливают отверстие, вызывающее местное повышение напряжений, что, как правило, способствует преждевременному разрушению конструкции. В этом аспекте исследование и прогнозирование прочности стеклопластика при наличии концентратора представляет интерес [2–4].

При изучении поведения элементов конструкций, изготовленных из композитов, наиболее распространенным подходом является сведение рассматриваемых материалов к однородным, в общем случае анизотропным, с некоторыми эффективными характеристиками [5]. Этот подход позволяет достаточно точно описывать статическое поведение композитных конструкций, все размеры которых существенно превышают характерный размер структурной неоднородности исследуемого композита. Однако он не дает возможности рассматривать задачи исследования концентраций напряжений, возникающих вблизи трещин, вырезов, различных технологических отверстий. Рассматривая композит как однородное тело невозможно предсказать изменению упругих и прочностных характеристик материала вблизи концентраторов напряжений.

Для оценки прочности композитных материалов с концентратором напряжений возможно использование экспресс-критерия [6], в котором учтена нелинейность диаграмм деформирования композита с использованием энергетических соображений Г. Нейбера.

В данной работе экспериментальным путем определено влияние концентраторов напряжений на прочностные свойства и проведен расчет методом конечных элементов с использованием экспресс-критерия на примере хаотически армированного стеклопластика (ХАСП).

Экспериментальное определение упругих и прочностных свойств образцов из ХАСП

Образцы изготовлены методом контактного формования, со схемой армирования:

- Стекломат 300 – 1 слой;
- Стекломат 600 – 2 слоя;
- Смола полиэфирная – PolyLite 440-M850 [8];
- Катализатор – Бутанокс М50.

¹ Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда энергосберегающих низкопольных трамвайных вагонов модульной конструкции» по договору № 02.G36.31.0002 от 12.02.2013 г.

² Сапожников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, кафедра Прикладной механики, динамики и прочности машин, Южно-Уральский государственный университет.
E-mail: ssb@susu.ac.ru

³ Абдрахимов Руслан Рамильевич – аспирант, кафедра Прикладной механики, динамики и прочности машин, Южно-Уральский государственный университет.

⁴ Шакиров Александр Александрович – аспирант, кафедра Прикладной механики, динамики и прочности машин, Южно-Уральского государственного университета.

Было изготовлено 3 образца в виде полосок с размерами $L \times b \times t = 200 \times 25 \times 2$ мм. Испытания образцов проводили в условиях монотонного растяжения со скоростью движения захвата 5 мм/мин и длиной рабочей части 100 мм. Разрушающей считали максимальное значение нагрузки при растяжении образца, зафиксированное испытательной машиной.

Усредненный предел прочности по трем испытаниям оказался равным 220 МПа, модуль упругости – 8,7 ГПа. В экспериментах диапазон разброса значений пределов прочности составил $\pm 7\%$, а разброс значений модуля упругости $\pm 4\%$.

Экспериментальное исследование прочностных свойств образцов из ХАСП с концентраторами напряжений в виде отверстий

Определение прочности ХАСП с концентратором напряжений было выполнено на образцах в виде полосы прямоугольного сечения, шириной 25 и 40 мм.

Напряжение разрушения σ_c было рассчитано по формуле

$$\sigma_c = \frac{P_{\max}}{b \cdot t},$$

где b и t – ширина и толщина образца в неослабленном сечении.

Было изготовлено по три образца с диаметрами отверстий 2, 5 и 8 мм. В табл. 1 приведены значения разрушающего напряжения для каждого образца. На рис. 1 показан характер разрушения образцов с размерами концентраторов $d = 8, 5, 2, 1$ мм.

Таблица 1

№ образца	Значения разрушающего напряжения			Без концентратора σ_c , МПа
	$d = 2$ мм σ_c , МПа	$d = 5$ мм σ_c , МПа	$d = 8$ мм σ_c , МПа	
1	207	162	110	220
2	189	169	80	
3	215	157	129	
Среднее	203,7	162,7	106,3	

Важно отметить, что образцы с диаметром отверстия 1 мм разрушались не по ослабленному сечению, следовательно, исследуемый материал не чувствителен к данному размеру концентратора.

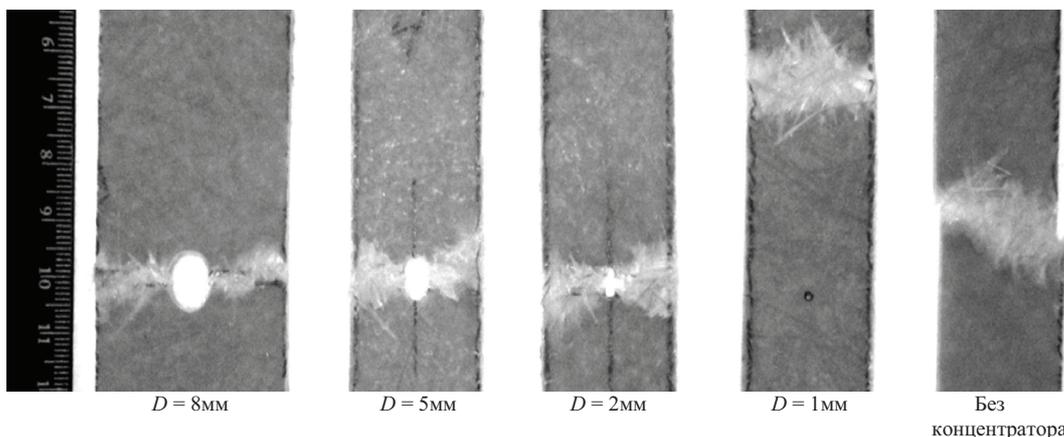


Рис. 1. Характер разрушения образцов

Оценка прочности пластин с концентратором напряжений методом конечных элементов

Оценка прочности пластин с отверстиями при растяжении проводилась по экспресс – критерию, предложенному в работах [6, 7]:

$$\max \bar{\sigma} \leq F_{xt}^*$$

Здесь в левой части стоит максимальное из всех осредненных на заданной базе напряжений в направлении нагружения, в предположении упругого поведения материала. В правой части находится эффективный предел прочности, учитывающий нелинейность диаграммы деформирования композита в верхней своей части с использованием энергетических соображений типа гиперболы Нейбера (о поиске напряжений и деформаций на нелинейном участке диаграммы « σ – ε » по из-

Механика

вестному упругому решению с использованием гиперболы $\sigma\varepsilon = \text{const}$, см. рис. 3). На гиперболе все точки имеют одинаковую удельную энергию деформирования $\sigma\varepsilon$.

Анализ рис. 2 показывает, что конечной точке нелинейной диаграммы A соответствует на условной линейной диаграмме « $\sigma_x-\varepsilon_x$ » точка B , которая характеризуется напряжениями

$$F_{xt}^* = \sqrt{E_x E_{xt} \varepsilon_{xt}}.$$

Эффективный предел прочности для данного материала оказался равным $F_{xt}^* = 336$ МПа.

Поскольку расчет $\max \bar{\sigma}$ для данного материала достаточно сложно провести аналитически, для этих целей следует использовать метод конечных элементов (МКЭ). Концепция микрооднородных напряженно-деформированных состояний (НДС) позволяет ввести естественным образом понятие коэффициента концентрации осредненных напряжений α_S , равного отношению $\max \bar{\sigma}$ к приложенным на удалении номинальным напряжениям σ

$$\alpha_S = \max \bar{\sigma} / \sigma.$$

Для растягиваемой вдоль оси X пластины (рис. 4) шириной $b = 25$ мм и $b = 40$ мм с отверстиями ($d = 2, 5$ мм для пластины с $b = 25$; $d = 8$ мм для пластины с $b = 40$ мм) получены расчетом с помощью МКЭ (пакет ANSYS/Workbench) значения коэффициентов концентрации осредненных напряжений α_S (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициентов концентрации			
Размер КЭ A , мм	$d = 2$ мм	$d = 5$ мм	$d = 8$ мм
	α_S	α_S	α_S
0,2	2,36	2,80	2,93
0,5	2,03	2,53	2,73
1,0	1,74	2,17	2,51
2,0	1,62	2,0	2,23
5,0	1,38	1,66	1,80

На рис. 3 изображены результаты расчета напряжений в пакете ANSYS Workbench с диаметром отверстия $D = 2$ мм и размером конечного элемента $A = 1$ мм. В расчете использовалась модель идеально упругого материала с модулем упругости 8,7 ГПа. Тип элементов – 3D Solid 95.

Напряжения разрушения пластин можно определить по формуле

$$\sigma_{cr} = F_{xt}^* / \alpha_S.$$

В табл. 3 приведены значения напряжений разрушения σ_{cr} в зависимости от размера КЭ для пластин с размером концентратора напряжений $d = 2, 5, 8$ мм.

Таблица 3

Значения напряжений разрушения пластин			
Размер КЭ A , мм	$d = 2$ мм	$d = 5$ мм	$d = 8$ мм
	σ_{cr} , МПа	σ_{cr} , МПа	σ_{cr} , МПа
0,2	114,7	120,0	142,4
0,5	123,1	132,8	165,5
1,0	133,9	154,8	193,1
2,0	150,7	168,0	207,4
5,0	186,8	202,4	243,5

На рис. 4 приведены зависимости напряжений разрушения пластин σ_{cr} от размера конечного элемента A (сплошная красная линия). Также на графиках нанесены значения средних разрушающих напряжений (усреднялись разрушающие напряжения для трех одинаковых образцов)

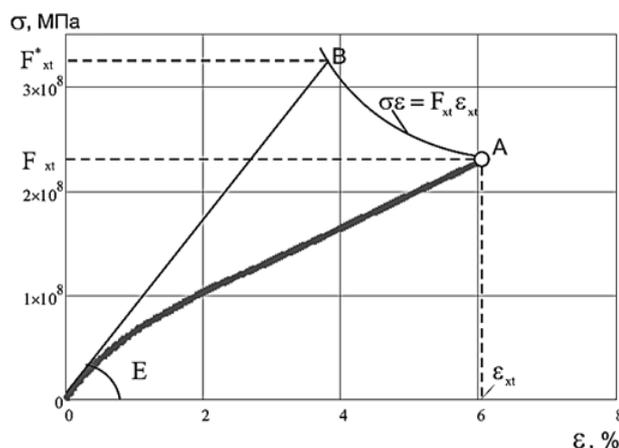


Рис. 2 Расчет «эффективного» предела прочности по диаграмме растяжения с помощью подхода Г. Нейбера

полученных экспериментальным путем σ_{cr} (сплошная синяя линия), а также максимальные и минимальные разрушающие напряжения, полученные в эксперименте (черная штриховая линия).

По графикам несложно определить эффективный размер конечного элемента, а также интервал, в пределах которого можно изменять размер КЭ, не снижая при этом точность расчетов более чем на 10 %. Обработка всех экспериментов показывает, что среднее значение размера КЭ для осреднения напряжений при оценке прочности конструкций из ХАСП должно быть $1,5^{+0,5}$ мм.

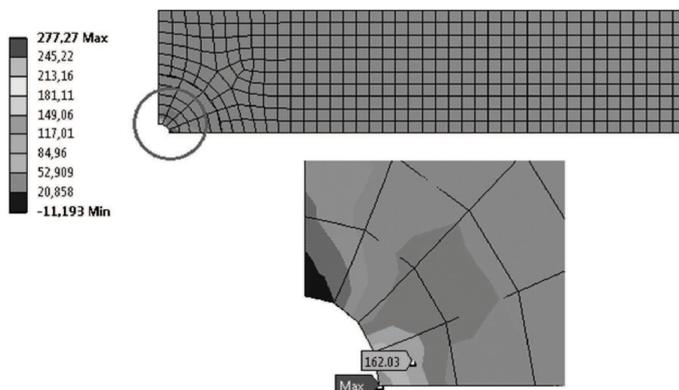


Рис. 3. Расчет пластины с диаметром отверстия 2 мм с размером КЭ $A = 1$ мм

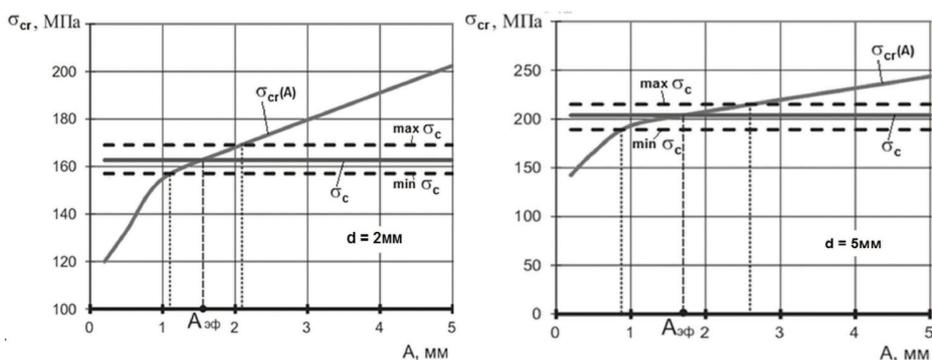


Рис. 4. Зависимости разрушающего напряжения от размера КЭ

Выводы

В работе были проведены механические испытания на растяжение образцов из полиэфирного стеклопластика, армированного короткими волокнами, определены его упругие и прочностные характеристики. Проведены механические испытания изготовленных образцов с различным диаметром отверстий (концентратором напряжений). Определено значение эффективного предела прочности для данного материала с помощью нелокального экспресс-критерия. С помощью пакета прикладных программ анализа НДС методом конечных элементов – *ANSYS Workbench* – определен эффективный размер конечного элемента для оценки прочности конструкций из данного материала. Показано, что среднее значение размера конечного элемента для осреднения напряжений при оценке прочности конструкций должно быть $1,5^{+0,5}$ мм.

Литература

1. Киркач, А.Б. Проблема прочности болтовых соединений на основе слоистых композиционных пластиков / А.Б. Киркач // Вестник ХПИ. Серия «Динамика и прочность машин». – 2011. – № 63. – С. 45–54.
2. Серенсен, С.В. Определение расчетных характеристик прочности стеклопластиков в зонах концентрации напряжений / С.В. Серенсен, В.С. Стреляев, Б.И. Болотников // Проблемы прочности. – 1972. – № 10. – С. 3–9.
3. Зайцев, Г.П. Расчет на прочность конструктивных элементов из стеклопластиков / Г.П. Зайцев, В.С. Стреляев. – М., Машиностроение, 1970. – 144 с.
4. Карпов, Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов / Я.С. Карпов. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2006. – 359 с.

5. Бохоева, Л.А. Особенности расчета на прочность элементов конструкции из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами: Монография / Л.А. Бохоева. – Улан-Удэ: ВСГТУ, 2007. – 192 с.

6. Сапожников, С.Б. Дефекты и прочность армированных пластиков: Монография / С.Б. Сапожников; под ред. О.Ф. Чернявского. – Челябинск: ЧГПТУ, 1994. – 162 с.

7. Сапожников, С.Б. Оценка прочности композитных материалов при наличии концентраторов напряжений: Учебное пособие / С.Б. Сапожников, О.С. Буслаева – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1999. – 53 с.

8. Альтаир Руспол – Стандартная ортофталевая полиэфирная смола Reichhold Polylyte 440-M850. – http://www.ruspol.spb.ru/reich_ds_pdf/440-m850.pdf

Поступила в редакцию 18 июля 2013 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2014, vol. 6, no. 1, pp. 50–54**

STRUCTURAL STRENGTH OF POLYMER COMPOSITES BASED ON SHORT GLASS FIBER

S.B. Sapozhnikov¹, R.R. Abdrakhimov², A.A. Shakirov³

The results of experimental research of randomly reinforced fiberglass are given, data on sensitivity of the material strength to the stress point in the form of a hole are obtained. The effective tensile strength for the material with non-local express criterion is defined. The finite element method is used to estimate the effective size of finite element.

Keywords: randomly reinforced fiberglass, stress point, finite element method, Express-criteria.

References

1. Kirkach A.B. *Vestnik KhPI. Seriya «Dinamika i prochnost' mashin»*. 2011. no. 63. pp. 45–54. (in Russ.).

2. Serensen S.V., Strelyaev V.S., Bolotnikov B.I. *Problemy prochnosti*. 1972. no. 10. pp. 3–9. (in Russ.).

3. Zaytsev G.P., Strelyaev B.C. *Raschet na prochnost' konstruktivnykh elementov iz stekloplastikov* (Calculation of the strength of fiberglass structural components). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 144 p. (in Russ.).

4. Karpov Ya.S. *Soedineniya detaley i agregatov iz kompozitsionnykh materialov* (Assembly of components and aggregates of composite materials). Khar'kov: Natsional'nyy aerokosmicheskiy universitet «Khar'kovskiy aviatsionnyy institut» Publ., 2006. 359 p. (in Russ.).

5. Bokhоеva L.A. *Osobennosti rascheta na prochnost' elementov konstruktssii iz izotropnykh i kompozitsionnykh materialov s dopustimymi defektami* (Features of calculation of the strength for structural components made of isotropic and composite materials with minor defects). Ulan-Ude: VSGTU, 2007. 192 p. (in Russ.).

6. Sapozhnikov S.B. *Defekty i prochnost' armirovannykh plastikov* (Defects and strength of reinforced plastics). Chelyabinsk: ChGPTU Publ, 1994. 162 p. (in Russ.).

7. Sapozhnikov S.B., Buslaeva O.S. *Otsenka prochnosti kompozitnykh materialov pri nalichii kontsentratorov napryazheniy* (Estimation of the strength of composite materials with stress points). Chelyabinsk: YuUrGU Publ., 1999. 53 p. (in Russ.).

8. *Altair Ruspol – Standartnaya ortoftalievaya poliefirnaya smola Reichhold Polylyte 440-M850* (Altair Ruspol – Standard ortho-phthalic polyester resin Reichhold Polylyte 440-M850). http://www.ruspol.spb.ru/reich_ds_pdf/440-m850.pdf

Received 18 July 2013

¹ Sapozhnikov Sergei Borisovich is Dr. Sc. (Engineering), Professor, Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines Department, South Ural State University. E-mail: ssb@susu.ac.ru

² Abdrakhimov Ruslan Ramilievich is Post-graduate Student, Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines Department, South Ural State University.

³ Shakirov Aleksandr Aleksandrovich is Post-graduate Student, Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines Department, South Ural State University.