

УДК 629.7.023: 620.179:678.58

## О ПОВЫШЕНИИ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА МЕТАЛЛО-КОМПОЗИТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ НАНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ КЛЕЕВ

© 2014 В.Д. Вермель, С.А. Титов

ГНЦ ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский

Поступила в редакцию 08.09.2014

Исследована эффективность применения разработанной наномодифицированной клеевой композиции для повышения прочности и долговечности элементов конструкций из полимерных композиционных материалов на примере штифтовых соединений деталей из углепластика, имитирующие болтовые соединения. Показана возможность повышения прочности и долговечности болтовых соединений.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, углепластик, стеклопластик, концентрация напряжений, наномодифицированная клеевая композиция, отверстие, болтовое соединение, клее-болтовое соединение, штифтовое соединение, прочность, долговечность

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все более широкое применение в изделиях авиационной техники. Однако реализация известных преимуществ ПКМ перед металлическими материалами в реальных конструкциях наряду с другими факторами ограничивается при необходимости проведения размерной механической обработки, изготовлении проемов и отверстий для размещения закладных металлических элементов и крепежа в узлах соединений

деталей. При механической обработке на кромках и обработанной поверхности образуются дефекты типа микротрещин, ворсистости, сколов связующего, расслоений. Эти дефекты при сочетании с концентраторами напряжений в виде отверстий и вырезов приводят к уменьшению прочности и усталостной долговечности деталей из ПКМ. В качестве примера на рис. 1 показаны образующиеся в процессе сверления дефекты на поверхности и кромках отверстий.

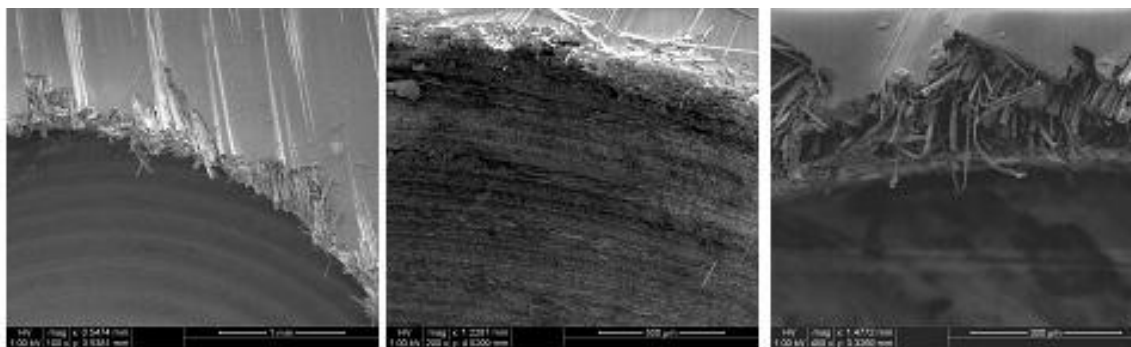


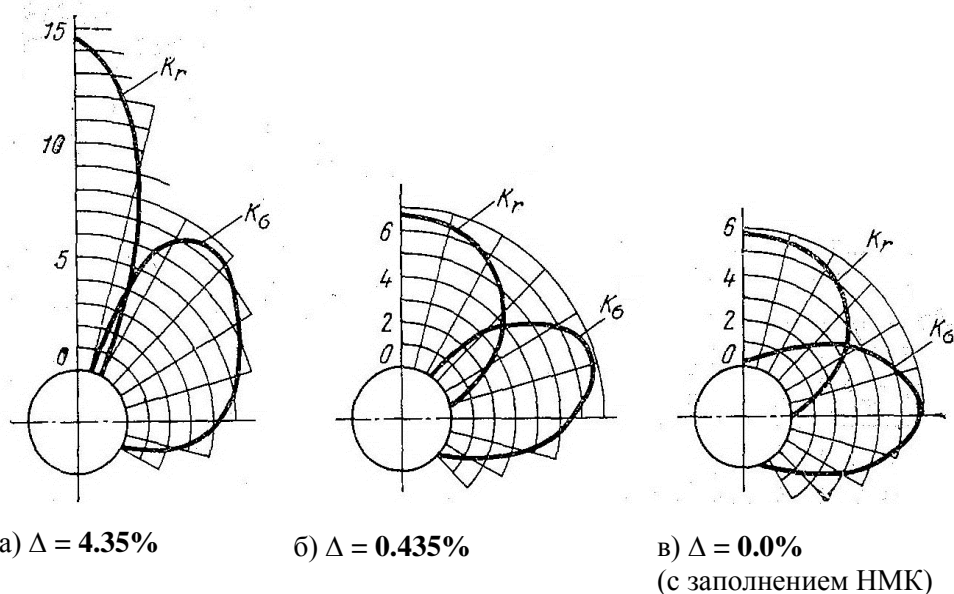
Рис. 1. Дефекты на кромках деталей из ПКМ, возникающие при механической обработке – фрезеровании и сверлении

Наряду с появлением дефектов в отверстиях из ПКМ характерно также возникновение зазоров между болтом и поверхностью отверстия. В многорядных болтовых соединениях неравномерные зазоры между болтами и отверстиями приведут к неоднородной загрузке болтов, следствием чего

может стать нерасчетное, преждевременное разрушение соединений. Известно [2, 3], что с уменьшением зазора между болтом и отверстием в болтовом соединении уменьшается концентрация контактных и растягивающих напряжений на контуре отверстия (рис. 2). Применение наномодифицированной клеевой композиции (НМК) для заполнения зазоров практически устраняет концентрацию напряжения (рис. 2в) и ведет к увеличению прочности и усталостной долговечности соединений.

Вермель Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, начальник НТЦ. E-mail: vermel@tsagi.ru

Титов Сергей Анатольевич, начальник сектора. E-mail: s\_titov@inbox.ru

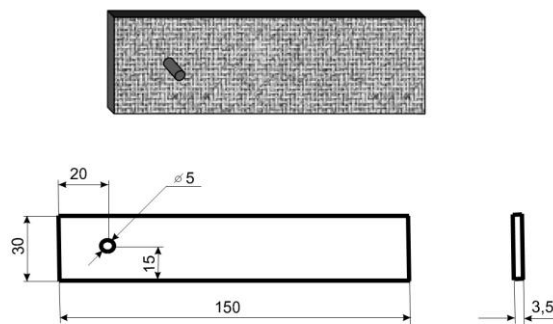


**Рис. 2.** Зависимость коэффициентов концентрации контактных ( $K_p$ ) и растягивающих ( $K_b$ ) напряжений на контуре отверстия от величины относительного зазора  $\Delta$  между отверстием и болтом в болтовом соединении

В ЦАГИ были проведены исследования соединений с заполнением НМК зазоров между болтом и отверстием на образцах, показанных на рис. 3, где болт имитируется бужом. Произведены испытания на прочность при растяжении, а также испытания на ресурс образцов из углепластика шириной 30 мм (рис. 3), с нагруженным штифтом отверстием диаметром 5.6 мм, при различных видах укладки волокон в углепластике с продольной укладкой и комбинированной при сочетании продольной укладки с укладками под углом  $45^0$  и  $90^0$ .

Результаты испытаний (табл. 1, 2) показали, что при применении наномодифицированной клеевой композиции прочность при разрушении образцов из углепластика увеличивается. Для образцов с продольной укладкой волокон  $0^0$  (100%) – на  $\sim 50,0\%$ , а для образцов с комбинированной укладкой волокон: продольной  $0^0$

(25 и  $60,0\%$ ), и укладкой под углом  $45^0$  (50 и  $32,5\%$ ) и под углом  $90^0$  (25 и  $7,5\%$ ) от 18,0 до  $20,5\%$ .



**Рис. 3.** Образец из углепластика со штифтом

**Таблица 1.** Значения разрушающих скалывающих напряжений, полученных при испытании на прочность образцов штифтовых соединений (ширина образца  $B=30$  мм, диаметр отверстия  $D=5,56$  мм) с продольной укладкой волокон в углепластике при установке штифта в отверстие без применения клея и с применением НМК

Партия. Ориентация укладки и относительный объем волокон (%)	Без применения клея				С применением НМК			
	№ образца	$P_{разр.}$ , кг	$\tau_{ск}$ , кг/мм <sup>2</sup>	среднее	№ образца	$P_{разр.}$ , кг	$\tau_{ск}$ , кг/мм <sup>2</sup>	среднее
				$\tau_{ск}$ , кг/мм <sup>2</sup>				$\tau_{ск}$ , кг/мм <sup>2</sup>
D75.15.1.1. $0^0 \times 45^0 \times 90^0$ 100 x 0 x 0	1.1С	417	6,69	7.15	1.1СНК	641	11,31	11,2 (увеличение на 56,6%)
	1.2С	451	7,61		1.2СНК	651	11,28	
					1.3СНК	636	10,98	

**Таблица 2.** Значения разрушающих напряжений смятия, полученных при испытании на прочность образцов штифтовых соединений (ширина образца В=30 мм, диаметр отверстия D=5,56 мм), изготовленных с применением сочетания продольной укладки волокон (25 и 61,5%), укладки их под углом 45° (50 и 30,8%) и укладки под углом 90° (25 и 7,7%) в углепластике при установке штифта в отверстие без применения клея и с применением НМК

Партия. Ориентация укладки и относительный объем волокон (%)	Без применения клея				С применением НМК			
	№ образца	R <sub>разр.</sub> , кг	σ <sub>см</sub> , кг/мм <sup>2</sup>	среднее σ <sub>см.</sub> , кг/мм <sup>2</sup>	№ образца	R <sub>разр.</sub> , кг	σ <sub>см</sub> , кг/мм <sup>2</sup>	среднее σ <sub>см.</sub> , кг/мм <sup>2</sup>
D75.15.3.1. 0°x 45°x 90° 25 x 50 x 25	3.1С	1148	62,49	61,1	2.1СНК	1264	72,76	72,53 (увеличение на 18,7%)
	3.2С	1097	59,72		2.2СНК	1268	72,3	
					2.3СНК	1290	72,63	
D75.15.5.1. 0°x 45°x 90° 61,5x30,8x7,7	5.1С	1034	48,14	49,01	5.1СНК	1160	59,72	59,04 (увеличение на 20,5%)
	5.2С	1052	49,88		5.2СНК	1108	56,37	

Исходную нагрузку при усталостных испытаниях образцов серии 5.1, упрочненных НМК, в ходе эксперимента уменьшили со значения 0,8R<sub>ст</sub> – 890кг до 830кг, в связи с недостаточной прочностью зажимов. Последующие испытания проводились для меньшей нагрузки, что приемлемо, т.к. кривая Веллера для углепластиков имеет малый наклон.

**Выводы:** установлено, что за счет применения нано-модифицированной клеевой композиции усталостная долговечность образцов соединений со сложной укладкой волокон увеличивается не менее, чем в 4 раза. Сравнение производилось по минимальному значению усталостной долговечности упрочненных соединений с максимальным значением усталостной долговечности исходных соединений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1 *Вермель, В.Д.* Об исследовании оптимального содержания наночастиц в клеевых соединениях / В.Д. Вермель, А.М. Доценко, Р.А. Смирнов и др. // Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы. Сборник трудов Всерос. конф., приуроченной к 20-летию ИПРИМ РАН, Москва, 30 ноября - 2 декабря 2009 г. – М.: Альянстрансатом, 2010. С. 72-77.
- 2 *Сухарев, И. П.* Прочность шарнирных узлов машин. – М.: Машиностроение, 1977. 168 с.
- 3 *Доценко, А.М.* Аналитическое описание распределения напряжений в образце типа проушины при нагружении ее отверстия через болт, установленный с упругим натягом // Авиационная промышленность. 1990. № 12. С. 10-13.

## ABOUT THE INCREASE OF STRENGTH AND DURABILITY OF METAL-COMPOSITE CONNECTIONS WITH USE OF NANOMODIFIED GLUES

© 2014 V.D. Vermel, S. A. Titov

SSC FSUE "TsAGI", Zhukovsky

Efficiency of application of the developed nanomodified glue composition for increase the strength and durability of design elements from polymeric composite materials on the example of bayonet connections of details from the carbon plastic, imitating bolt connections is investigated. Possibility of increase the strength and durability the bolt of connections is shown.

Key words: *polymeric composite material, carbon fiber reinforced polymer, tension concentration, the nanomodified glue composition, hole, bolt connection, glue-bolt connection, bayonet connection, strength, durability*