

УДК 621.7/9:629.7
620.22-419.8:678:539.4

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОЙ КЛЕЕВОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2012 В.Д. Вермель, А.М. Доценко, С.А. Титов

ФГУП «ЦАГИ», Московская область, г. Жуковский

Поступила в редакцию 05.10.2012

Исследовано влияние применения в зонах концентрации напряжений разработанной наномодифицированной клеевой композиции на повышение прочности и долговечности элементов конструкций из полимерных композиционных материалов - клеевых соединений стеклопластика с титановым сплавом, фрагмента стенки нервюры из углепластика с вырезом, образцов из углепластика с отверстием. Показана возможность ее использования для повышения прочности и долговечности болтовых соединений. Приведены данные о стабильности характеристик разработанной наномодифицированной клеевой композиции.

Ключевые слова: Полимерные композиционные материалы, углепластик, стеклопластик, дефекты, зоны концентрации напряжений, наномодифицированная клеевая композиция, отверстия, вырезы, болтовые соединения, коэффициенты концентрации напряжений, прочность, долговечность.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все более широкое применение в изделиях авиационной техники. Это обусловлено тем, что использование легких и прочных ПКМ должно привести к уменьшению веса конструкций и, как следствие, к получению ряда других преимуществ по сравнению с конструкциями из традиционных более тяжелых металлических материалов. Однако достижение этих преимуществ ПКМ 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 (рис. 1). Эти дефекты при сочетании с концентраторами напряжений в виде отверстий и вырезов приводят к уменьшению прочности и усталостной долговечности деталей из ПКМ.

Для заживления дефектов и упрочнения зон концентрации напряжений специалистами ФГУП «ЦАГИ» совместно с ООО НПФ «Техполиком» и Тамбовским государственным тех-

ническим университетом разработана наномодифицированная клеевая композиция [1], в которой в основу клея конструкционного назначения введены наночастицы углеродного наноматериала «Таунит». Характеристики этого наноматериала приведены в табл. 1.

Для проведения испытаний наноклеевой композиции были изготовлены образцы клеевых соединений элементов из алюминиевого сплава и образцы клеевых соединений элементов из стеклопластика и титанового сплава. Схема и фотоизображения образцов показаны соответственно на рис. 2 и рис. 3

Результаты испытаний образцов клеевых соединений элементов из алюминиевого сплава, приведенные в работе [1], показали существенное (до 26%) увеличение минимального значения предела прочности наномодифицированного клеевого соединения по сравнению с пределом прочности исходного клеевого соединения. Прочность клеевого соединения практически постоянна при концентрации наночастиц в клее 1 и 2 %. При концентрации наночастиц, равной 1%, коэффициент вариации предела прочности при сдвиге клеевого соединения имеет наименьшее значение (5,3%). Повышение прочности клеевого соединения за счет наночастиц происходит без уменьшения предельных деформаций клеевого слоя, т. е. охрупчивания клеевого слоя в проведенных экспериментах не наблюдается.

Результаты испытаний на прочность при сдвиге образцов клеевых соединений элементов из стеклопластика и титанового сплава ВТ6 при использовании наноклеевой композиции с кон-

*Вермель Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, начальник научно технического центра.
E-mail: vermel@tsagi.ru*

Доценко Александр Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

E-mail: alexander.dotenko@tsagi.ru

Титов Сергей Анатольевич, начальник сектора.

E-mail: S_titov@inbox.ru

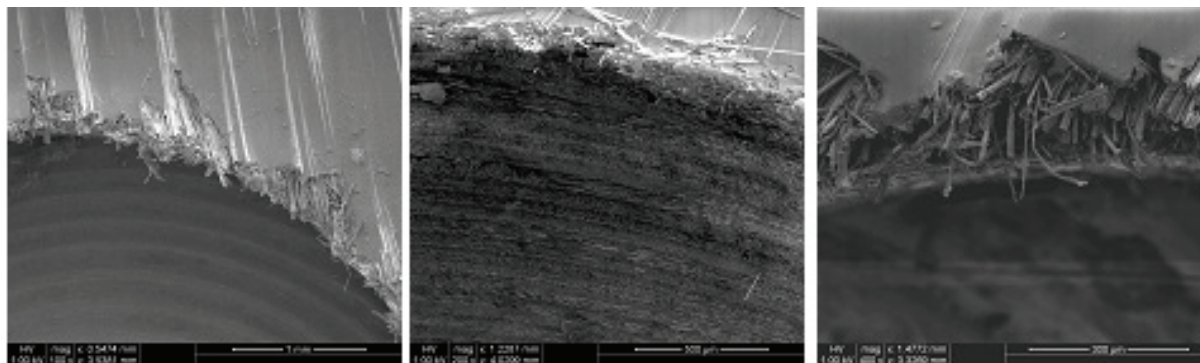


Рис. 1. Дефекты на кромках деталей из ПКМ, возникающие при механической обработке -фрезеровании и сверлении

Таблица 1. Характеристики наноматериала «Таунит»

Характеристика	Значение
Наружный диаметр наночастиц, нм	15-40
Внутренний диаметр, нм	5-8
Длина, мкм	2 и более
Общий объем примесей, % в т.ч. аморфный углерод	до 1,5, 0,3-0,5
Насыпная плотность, г/см ³	0,4-0,6
Удельная геометрическая поверхность, м ² /г	120 и более
Термостабильность, °С	до 700
Средний объем пор, см ³ /г	0,22
Средний размер пор, А	70

ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

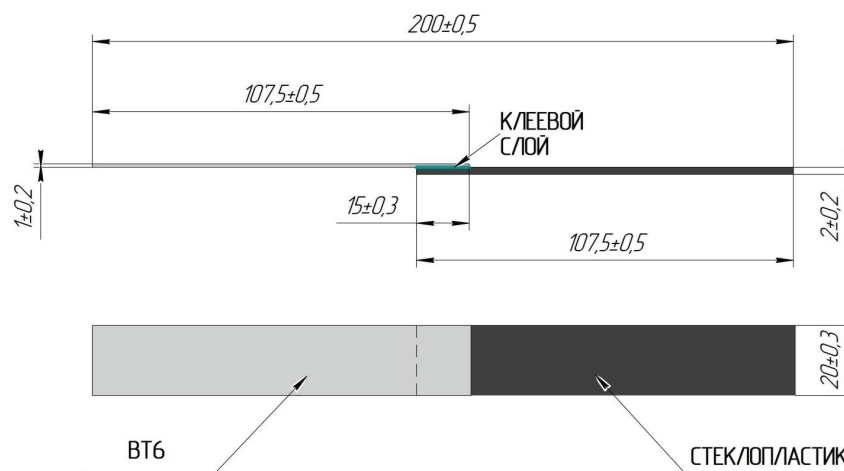


Рис. 2. Схема образца для испытания клеевого соединения элементов из стеклопластика и титанового сплава

центрацией углеродного наноматериала «Таунит» 0 и 2 %. показаны в табл. 2. По полученным данным видно, что за счет наноклеевой композиции минимальное значение предела прочности клеевого соединения при сдвиге увеличивается на 25%, а среднее значение – на 17 %.

С использованием наноклеевой композиции были проведены испытания на потерю устойчивости при сдвиге образца, моделирующего фрагмент стенки нервюры крыла, изготовленного из углепластика толщиной 2,2 мм, имеющего вырез в виде отверстия диаметром 80 мм (рис. 4).



Рис. 3. Фотоизображение образцов для испытаний клеевого соединения элементов из стеклопластика и титанового сплава

Таблица 2. Результаты испытаний на прочность при сдвиге образцов клеевого соединения с концентрацией углеродного наноматериала «Таунит» 0 и 2 %
(материал образца стеклопластик-титановый сплав ВТ6, скорость растяжения образцов при испытаниях 10 мм/мин)

Концентрация наночастиц, %	Предел прочности		Предел прочности	
	Среднее значение, Н/мм ²	Увеличение за счет наночастиц, %	Минимальное значение Н/мм ²	Увеличение за счет наночастиц, %
0	20,23	-	18,34	-
2	23,68	17	22,95	25

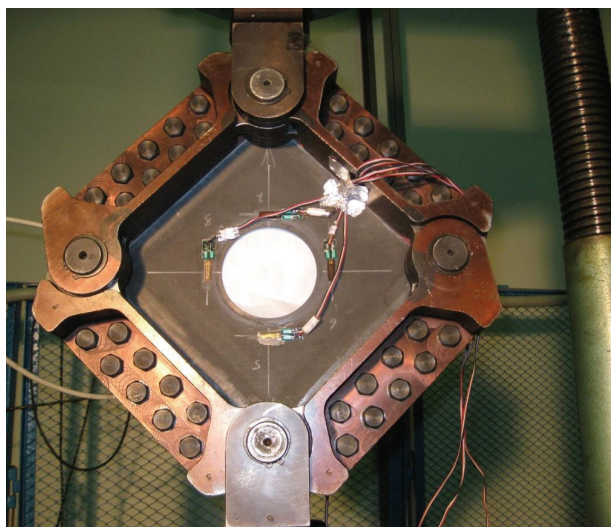


Рис. 4. Фотоизображение образца из углепластика, моделирующего фрагмент стенки нервюры крыла, в приспособлении для испытаний, установленном в захватах испытательной машины

На рис. 5 и 6. показаны соответственно микродефекты на кромке отверстия после изготовления образца и вид кромки отверстия, упрочненной наноклеевой композицией, а на рис. 7 и рис. 8 – соответственно исходный образец и образец с упрочненным наноклеевой композицией отверстием после испытаний на потерю устойчивости при сдвиге.

При испытаниях определялся момент начала потери устойчивости по показаниям тензодатчиков, наклеенных на противоположные поверхности образца. В эксперименте были применены так же лазерные датчики перемещения. В процессе нагружения производилась непрерывная запись показаний тензодатчиков и лазерных датчиков, осуществлялся визуальный контроль за поведением деформируемого образца и проводилась видеосъемка процесса его деформирования и разрушения.

Нагружение образца вызывало потерю устойчивости с образованием волны выпучивания, растрескивание и отслаивание поверхностных слоев в зоне развивающейся волны. Последующее деформирование приводило к интенсивному отслаиванию поверхностных слоев углепластика, сопровождающемся разрушением образ-

ца на контуре отверстия в зоне концентрации растягивающих напряжений. В образце с залеченными наномодифицированной клеевой композицией микродефектами на кромках и поверхности отверстия и упрочненным ею отверстием зона начала расслаивания смещается от края отверстия, что приводит к повышению несущей способности образца.

Результаты испытаний исходных и упрочненной наноклеевой композицией образцов в виде значения нагрузок, соответствующих началу потери их устойчивости, приведены в табл. 3.

По данным табл. 3 видно, что за счет применения наноклеевой композиции нагрузка начала потери устойчивости образца повышается на 32 %. Это достигнуто в результате залечивания повреждений, возникающих в результате механической обработки углепластика на поверхности и кромках отверстия, уменьшения концентрации напряжений у отверстия, формирования «стоппера» для задержки растрескивания (расслоения) поверхностных слоев при выпучивании, сопровождающемся потерей устойчивости.

Наиболее существенным результатом проведенных испытаний стало изменение места начала возникновения трещин в образце в процессе его нагружения. В исходных образцах трещины и расслоение поверхностных слоев основного материала возникали на кромке отверстия. С нанесенной на поверхность и кромки отверстия наноклеевой композицией начало возникновения трещин произошло в углепластике на удалении от кромки отверстия. В условиях циклического нагружения аналогичного фрагмента стенки нервюры с величиной нагрузок меньших, чем нагрузки начала потери устойчивости, можно предполагать значительного увеличения усталостной долговечности крыла самолета.

На начальном этапе исследований для ориентировочной оценки повышения усталостной долговечности был использован опытный вариант наноклеевой композиции, который применен для залечивания дефектов и упрочнения отверстий диаметром 6 мм в образцах шириной 36 мм из углепластика толщиной 2 мм. Усталостные испытания образцов были проведены по близкому к пульсирующему циклу на-

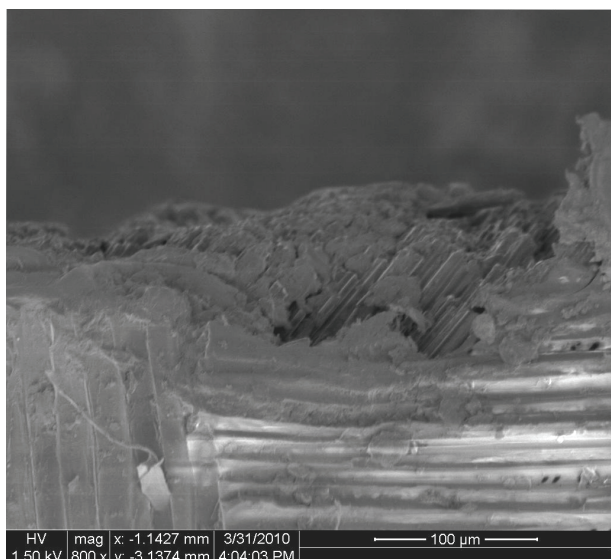


Рис. 5. Микродефекты на кромке отверстия после изготовления образца, моделирующего фрагмент стенки нервюры

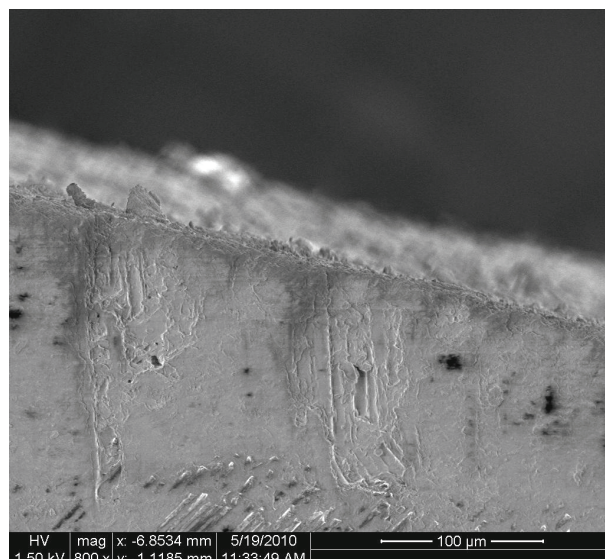


Рис. 6. Вид кромки отверстия в образце, упрочненной наноклеевой композицией



Рис. 7. Исходный образец после испытаний на потерю устойчивости при сдвиге

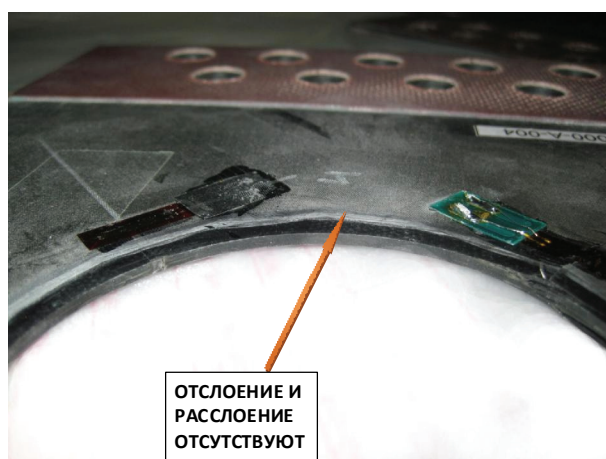


Рис. 8. Образец с упрочненным наноклеевой композицией отверстием после испытаний на потерю устойчивости при сдвиге

Таблица 3. Результаты испытаний на потерю устойчивости при сдвиге образцов из углепластика, моделирующих фрагмент стенки нервюры крыла

Вид образца	№ образца	Нагрузка начала потери устойчивости образца Р, тонны	Среднее значение нагрузки начала потери устойчивости Р, тонны	Отношение Р(нк)/ Р
Исходный	002	1,5	1,9	-
	003	2,3		
С упрочнением наноклеевой композицией (нк)	004	2,5	2,5	1,32

гружения при максимальном напряжении нетто, равном 203,5 Н/мм², и частоте нагружения 5 Гц. Результаты испытаний исходных и нанопропрочненных образцов приведены в табл. 4. Они показывают, что за счет наноклеевой компози-

ции усталостная долговечность образцов увеличивается более чем в 2 раза.

Разработанная наномодифицированная клеевая композиция может быть использована в болтовых соединениях деталей из ПКМ и деталей из

Таблица 4. Результаты усталостных испытаний образцов шириной 36 мм из углепластика с отверстием диаметром 6 мм

Вид образца	Значение долговечности, килоциклы	Повышение долговечности за счет наноклеевой композиции
Исходный	882> 335	-
С упрочнением наноклеевой композицией	863> 794>	Более чем в 2 раза

ПКМ с металлическими деталями не только для залечивания дефектов и упрочнения отверстий, но и для заполнения ею существующих зазоров между болтами и отверстиями. Известно [2], что с уменьшением зазора между болтом и отверстием в болтовом соединении уменьшаются коэффициенты концентрации контактных и растягивающих напряжений на контуре отверстия. Поэтому при заполнении разработанной наномодифицированной клеевой композицией зазоров в болтовом соединении, содержащем детали из ПКМ, будет увеличиваться прочность и усталостная долговечность соединения при всех основных, характерных для ПКМ (например, для углепластика и стеклопластика), видах разрушения – при сдвиге, при смятии, при растяжении и при различном их сочетании.

Испытания на прочность при сдвиге образцов наноклеевого соединения элементов из стеклопластика и из титанового сплава и образцов наноклеевого соединения элементов из алюминиевого сплава, в каждом из которых последовательно во времени были применены две наномодифицированные клеевые композиции, изготовленные по одной и той же технологии с временным интервалом длительностью более чем один год, показали достаточно высокую стабильность их характеристик – образцы, в которых применена недавно изготовленная

наномодифицированная клеевая композиция, имеют значения прочности несколько большие (на 2-5 %), чем образцы, испытанные более года назад с применением изготовленной ранее наномодифицированной клеевой композиции. Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют использовать разработанную наномодифицированную клеевую композицию для повышения прочности и усталостной долговечности элементов натурных конструкций из ПКМ с концентраторами напряжений в виде отверстий и вырезов, а также для повышения прочности и усталостной долговечности болтовых, клеевых и клееболтовых соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вермель В.Д., Доценко А.М., Смирнов Р.А., Титов С.А., Яблонский И.С., Аниховская Л.И., Кладова Л.С., Ткачев А.Г., Слепов С.К., Мележик А.В. Об исследовании оптимального содержания наночастиц в клеевых соединениях // Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы. Сборник трудов Всероссийской конференции, приуроченной к 20-летию ИПРИМ РАН. Москва, 30 ноября - 2 декабря 2009 г. М.: Альянстрасатом. 2010. С. 72-77.
2. Сухарев И.П. Прочность шарнирных узлов машин. Машиностроение, М., 1977, 168 с.

APPLICATION NANOMODIFIED ADHESIVE COMPOSITION FOR INCREASE STRENGTH AND DURABILITY CONSTRUCTIONAL ELEMENTS OUT OF COMPOSITE MATERIALS

© 2012 V.D. Vermel, A.M. Dotsenko, S.A. Titov

Central Aerohydrodynamic Institute "TsAGI", Moscow Region, Zhukovsky

The effect application in stress concentration zones elaborated nanomodified adhesive composition on rising strength and durability structural elements out of polymeric composition materials – glue joints of glass-fibre-with-reinforced plastic with titanium alloy, web of fragment ribs out of carbon-fibre-reinforced plastic with cutout, specimens out of carbon-fibre-reinforced plastic with hole is investigated. Possibility her use on rising strength and durability bolted connections is indicated. Data about stability of characteristic elaborated nanomodified adhesive composition are addused.

Key words: Polymeric composition materials, carbon-fibre-reinforced plastic, glass-fibre-reinforced plastic, defects, holes, cutouts, bolted connections, nanomodified adhesive composition, stress concentration factors, strength, durability.

Vladimir Vermel, Doctor of Technics, Professor, Head of Scientific and Technical Centre. E-mail: vermel@tsagi.ru
Alexander Dotsenko, Candidate of Technics, Senior Staff Scientist. E-mail: alexander.dotsenko@tsagi.ru
Sergey Titov, Chief of Sector. E-mail: S_titov@inbox.ru