

## Экспериментальные исследования влияния трансверсальных крепежных элементов на свойства углепластиков

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Проанализированы конструктивно-технологические решения соединений с трансверсальными закладными элементами. Из-за сложной формы крепежного трансверсального элемента определение свойств и несущей способности конструкции затруднено. Поэтому наиболее достоверным способом определения влияния крепежных элементов на свойства композиционного материала является эксперимент. Проведенный эксперимент подтверждает теорию о том, что трансверсальный крепежный элемент представляет собой дополнительный концентратор напряжений при одноосном растяжении.

**Ключевые слова:** трансверсальный закладной элемент, углепластик однонаправленный, конструктивно-технологическое решение, разрушающая нагрузка, объемное содержание, концентратор напряжений.

Композиционные материалы (КМ) давно зарекомендовали себя как конструкционный материал для самых ответственных отраслей промышленности, таких, как авиация, космонавтика, машиностроение и др.

Помимо преимуществ КМ обладают рядом недостатков: низкая прочность на смятие, плохая вибростойкость, дороговизна, а также сложность утилизации [1].

Для повышения прочности на смятие в композит внедряют закладные трансверсальные элементы (рис. 1, а). При межслойном сдвиге прочность КМ возрастает благодаря тонким игольчатым шайбам, которые размещены между слоями КМ и позволяют образовывать дополнительные связи в поперечном направлении (рис. 1, б). Листовые соединительные элементы с поперечными связями, расположенные на границе раздела несущих слоев и заполнителя (сотоблока, с запененным пространством, пенопласта и др.), предотвращают преждевременный отрыв несущих слоев. С одной стороны элементы поперечной связи проникают сквозь армирующий материал несущих слоев, а трансверсальные элементы, расположенные на другой стороне листового соединительного элемента, внедряются в заполнитель (рис. 1, в). Особенности, описанные в конструктивно-технологических решениях (КТР), вызывают различные изменения структуры композита, что приводит к неопределенным свойствам материала в целом [2].

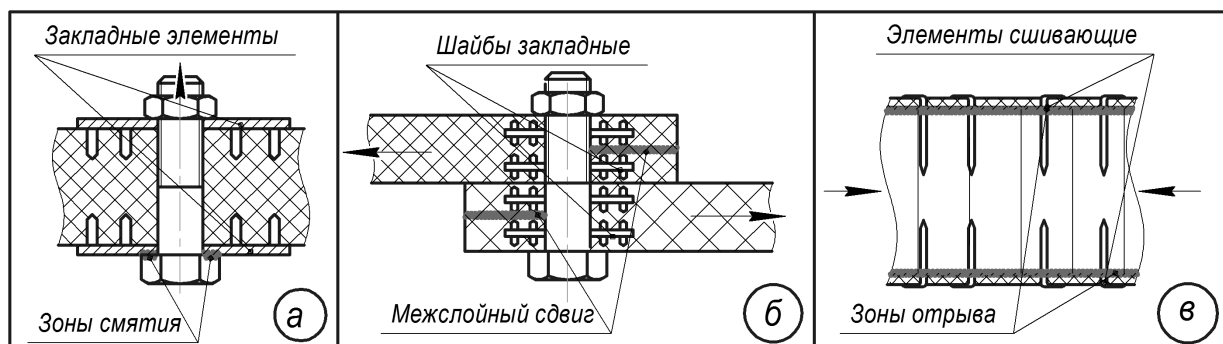


Рис. 1. Распространенные КТР, применяемые в конструкциях из КМ

Многолетние исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) дали ряд аналитических методик прогнозирования свойств таких структур КМ с трансверсальными крепежными элементами, но при условии достаточно простой формы крепежного соединительного микроэлемента (стержня, пирамидки и др.) [3]. В последнее время в целях повышения несущей способности и эффективности применения КМ в высоконагруженных элементах конструкций летательных аппаратов (ЛА) формы крепежных элементов усложняются и не всегда могут быть представлены простыми конструктивными формами (рис. 2).

Модифицированные формы крепежных элементов с переменной жесткостью имеют ряд сложностей при аналитическом решении, поэтому наиболее достоверным способом определения свойств КМ является эксперимент. Во время разработки новых КТР, работающих на отрыв, был изобретен новый трансверсальный элемент (рис. 2, в): выштампованный зуб, скрученный на 90° вокруг своей оси (заявка на полезную модель № u201314738 от 16.12.2013). Эффективность работоспособности данного элемента при воздействии трансверсального нагружения подтверждена, но влияние на свойства КМ не было исследовано.

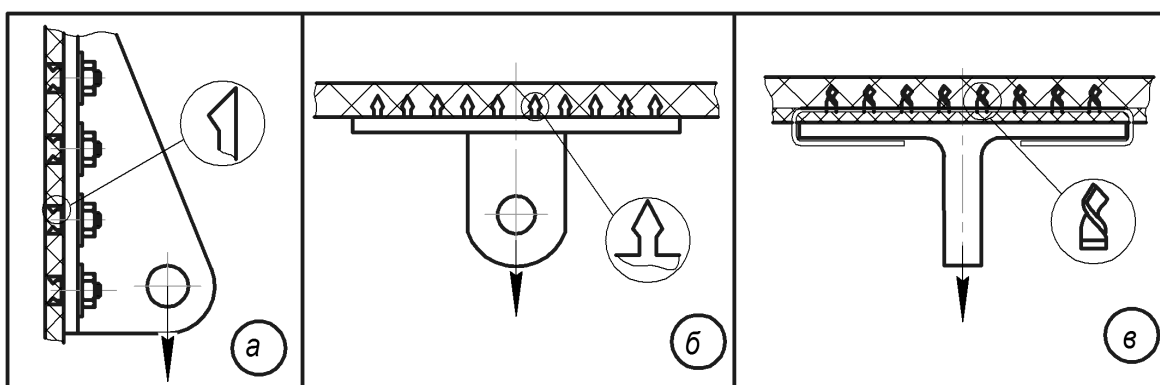


Рис. 2. Перспективные формы крепежных элементов и КТР на их основе

Спиралевидная поверхность элемента имеет большую площадь заклинивания, что повышает несущую способность крепежного элемента данного типа, но в проекциях на трех основных осях не имеет прямолинейных участков. Следовательно, оценка свойств КМ по модели слоистого КМ В. В. Васильева затруднена (рис. 3, а), а технология накладывает дополнительные трудности (рис. 3, б).

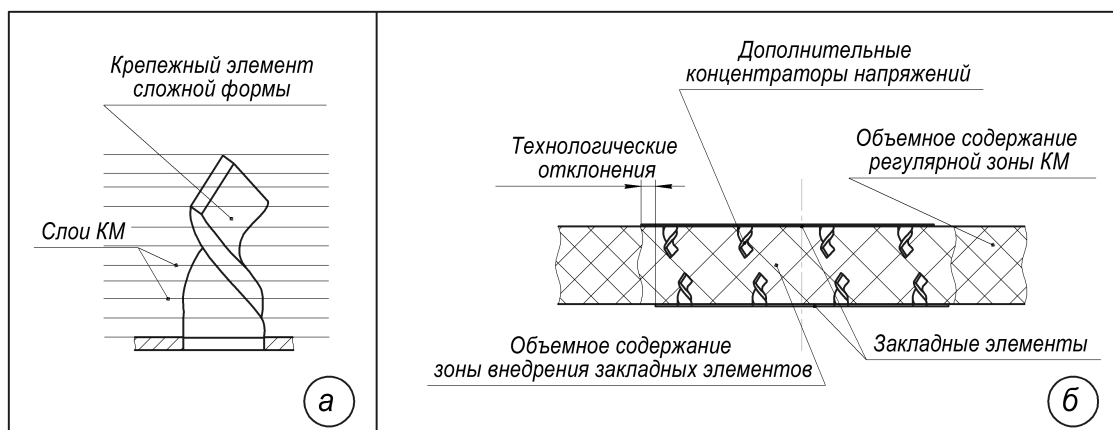


Рис. 3. Анализ скрученного трансверсального крепежного элемента

Именно технологический аспект вызывает ряд погрешностей (смещение закладных элементов с установленных мест, неравномерность объемного содержания волокон в КМ из-за разности давления формования, частичное разрезание волокон острым наконечником), которые затрудняют аналитическое решение. В силу перспективности скрученного крепежного элемента в соединениях, работающих на отрыв, необходимо провести экспериментальное исследование влияния данного закладного элемента на свойства КМ. Одними из самых важных физико-механических характеристик КМ являются прочность на растяжение и модуль упругости. Именно поэтому было решено провести исследование, связанное с определением разрушающей силы при одноосном растяжении, так как при таком приложении нагрузки закладной элемент может быть дополнительным концентратором напряжений. Кроме того, для сопоставления величины концентрации напряжений от закладных элементов было проанализировано влияние дополнительного концентратора напряжений в виде отверстия (рис. 4, а). Экспериментальные образцы для определения предела прочности выполнены согласно ASTM [4, 5] из однонаправленной углеленты UD CST 125/300 со структурой  $[0_{50}/90_{10}/\pm 45_{40}]$  на эпоксидной смоле горячего отверждения ARALDITE 917. Толщина образцов составила  $3,8 \pm 0,2$  мм в целях двухсторонней установки закладных трансверсальных элементов. Аналогичные образцы были подготовлены для исследования прочности с дополнительным концентратором напряжений в виде отверстия. Закладные элементы устанавливались с двух сторон образцов и имели два варианта исполнения (рис. 4, б, в) при трех вариантах толщины закладного элемента: 0,3, 0,5, 0,8 мм. Экспериментальные образцы с закладным элементом №1 имели 15 скрученных зубьев, равномерно распределенных по всей площадке закладного элемента (рис. 4, б). Площадь зуба в представительном элементе КМ составляла 2, 3,5, 5,5%, соответственно, для каждой толщины закладного элемента. Экспериментальные образцы с закладным элементом №2 имели 20 скрученных зубьев, также равномерно распределенных по кольцу, но значительно плотнее (рис. 4, в). В этом случае площадь зуба в представительном элементе КМ в силу конструкторских особенностей увеличивается практически вдвое и составляет 3,5, 5,7, 9%, соответственно, для каждой толщины закладного элемента. Предполагается, что более частое размещение трансверсальных крепежных элементов приведет к разупрочнению основного материала.

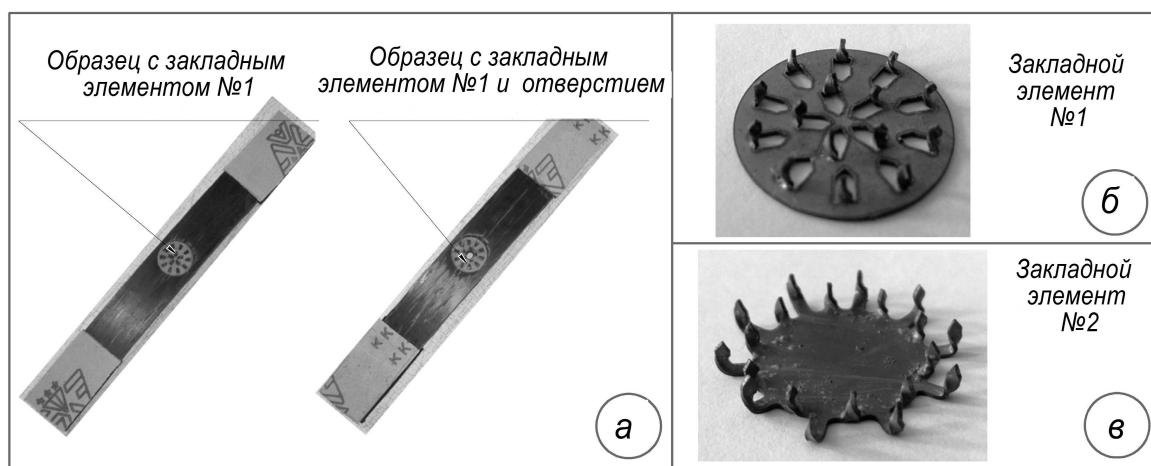








Рис. 4. Образцы для проведения исследования влияния закладных элементов на свойства углепластиков

Испытания подготовленных образцов проводили на разрывной машине «ZD-10/90». Для оценки влияния закладных элементов на свойства углепластиков были изготовлены и испытаны партии образцов без закладных элементов. Следовательно, опираясь на результаты исследования (табл. 1), можно проследить зависимость падения разрушающей нагрузки и среднего напряжения относительно партий без закладных элементов. По коэффициенту вариации, который составил от 2,5 до 12%, можно судить о хорошей сходимости эксперимента [6].

Таблица 1

Результат исследования влияния трансверсальных закладных элементов на разрушающую нагрузку образцов из углепластика

Условное обозначение	Описание партии образцов		Средняя разрушающая нагрузка, кН	Средне квадратическое отклонение, кН	Коэффициент вариации, %	Среднее напряжение, МПа	
	Партия без закладного элемента		114	5,29	4,64	1000	
	Партия без закладного элемента с отверстием		87,3	2,36	2,7	765,8	
	Партия с закладным элементом № 1	толщина	0,3 мм	97,43	2,17	2,23	854,7
			0,5 мм	96,5	3,63	3,76	846,5
			0,8 мм	68,9	7,07	7,15	604,4
	Партия с закладным элементом № 1 с отверстием	толщина	0,3 мм	75,1	2,46	3,28	658,8
			0,5 мм	70,7	4,54	6,42	620,2
			0,8 мм	59,5	6,99	11,75	521,9
	Партия с закладным элементом № 2	толщина	0,3 мм	87,5	4,87	5,57	767,5
			0,5 мм	72,9	2,25	3,09	639,5
			0,8 мм	59,8	5,48	9,17	524,6
	Партия с закладным элементом № 2 с отверстием	толщина	0,3 мм	73,7	3,79	5,142	649,5
			0,5 мм	65,6	2,3	3,5	575,4
			0,8 мм	51,8	5,16	9,96	454,4

Таким образом, исходя из результатов эксперимента можно утверждать, что трансверсальные крепежные элементы действительно являются концентраторами напряжений. Причем эффект усиления концентрации напряжений происходит с увеличением толщины закладного элемента, а также с увеличением площади зуба в представительном элементе КМ. Поэтому закладной элемент №2 менее эффективен, так как площадь зуба в представительном элементе КМ достигает 9% и вызывает существенное снижение прочности, практически вдвое. Относительное падение значений пределов прочности для партий образцов без дополнительного отверстия лежит в пределах от 14,5 до 47,5 % (рис. 5, а), а относительное падение значений пределов прочности для партий, ослабленных дополнительным отверстием, – соответственно от 14 до 40,7% (рис. 5, б).

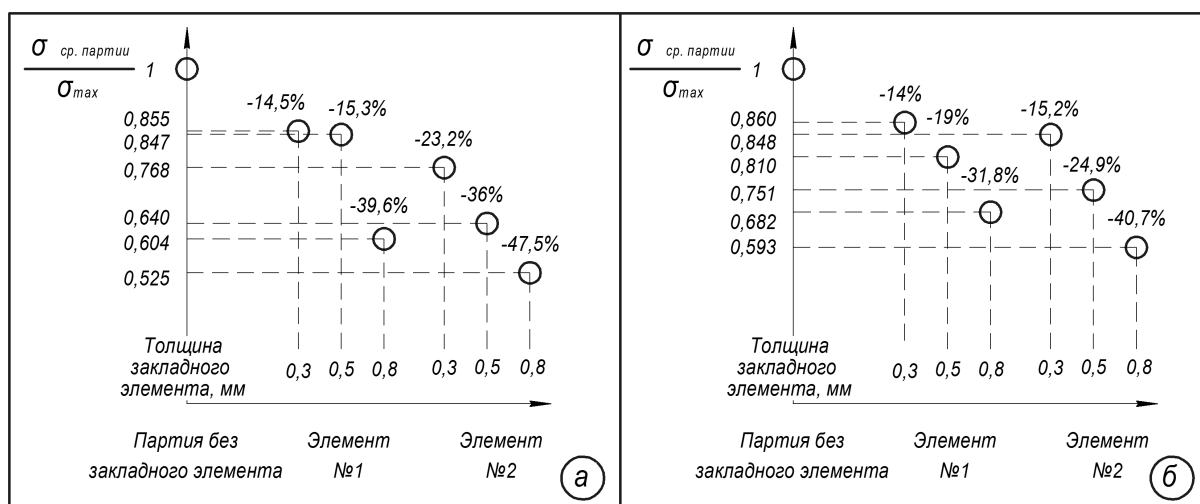


Рис. 5. Падение относительной прочности партий образцов:  
а – партии образцов без отверстия; б – партии образцов, ослабленных отверстием

При проектировании конструкций из КМ, в которые будут внедрены какие-либо трансверсальные закладные элементы, необходимо учитывать данное разупрочнение. Следует отметить, что характер разрушения образцов также указывает на возникновение в структуре дополнительных концентраторов напряжений. Так, на рис. 6 показаны характерные разрушения образцов с закладными элементами двух типов.

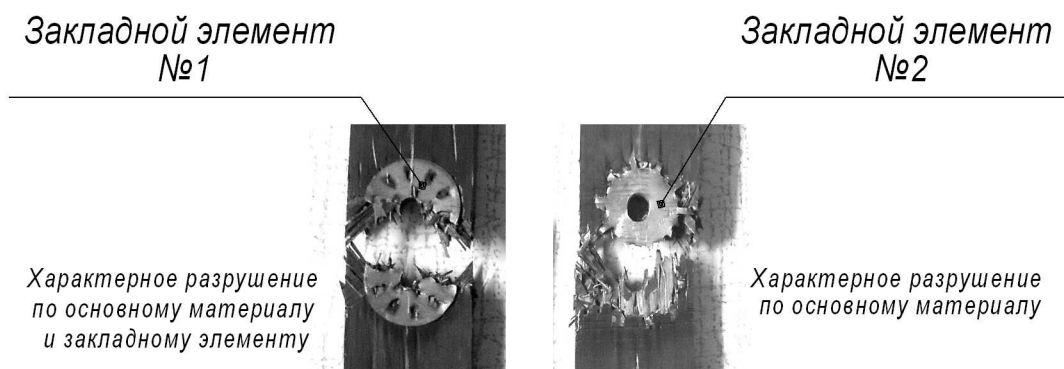


Рис. 6. Характер разрушения образцов с двумя типами закладных элементов

Разрушение основного материала совместно с закладным элементом №1 присуще образцам партий, где толщина закладного элемента составила 0,3 и 0,5 мм. В случае закладного элемента №1 толщиной 0,8 мм элементы вырывались из образцов подобно закладным элементам №2, где разрушение наблюдалось только на основном материале.

Во время испытаний образцов были построены диаграммы зависимости роста нагрузки и перемещений. На рис. 7 показана сводная диаграмма для всех типов закладных элементов с толщиной 0,5 мм, а также образцов без закладных элементов и с учетом дополнительного концентратора напряжения – отверстия.

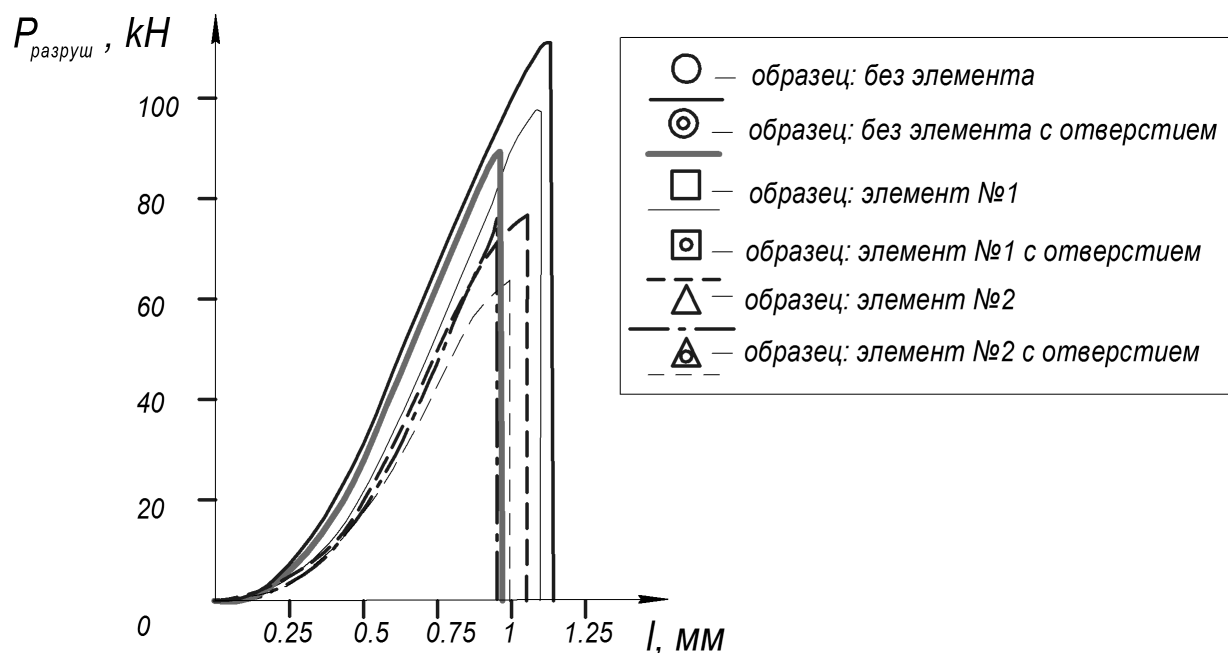


Рис. 7. Диаграмма «нагрузка-перемещение»

Наклон линейной части диаграмм свидетельствует об изменениях в модуле упругости и соответственно в жесткости материала. Средняя жесткость материала для некоторых партий сведена в табл. 2.

Таблица 2

Изменение жесткости образцов из углепластика

Условное обозначение	Описание партии образцов	Средняя жесткость $(EF)_i$ , кН
○	Партия без закладного элемента	528.2
⊙	Партия без закладного элемента с отверстием	525.6
□	Партия с закладным элементом № 1 (толщина 0,5 мм)	440.6
⊠	Партия с закладным элементом № 1 с отверстием (толщина 0,5 мм)	437.3
△	Партия с закладным элементом № 2 (толщина 0,5 мм)	432.9
⊡	Партия с закладным элементом № 2 и отверстием (толщина 0,5 мм)	351.2

Как было замечено ранее, из-за технологических отклонений структура КМ получается неоднородной с различным объемным содержанием в регулярной и нерегулярной зонах. Этим скорее всего и вызвано изменение в модулях упругости. Диаграммы «нагрузка-перемещение» для партий образцов с закладными элементами расположены ниже диаграммы для партий образцов без закладных элементов, а это свидетельствует об уменьшении жесткости и модуля упругости, так как модуль упругости пропорционален тангенсу угла наклона. Это также соответствует данным табл. 2, из которой видно, что жесткость снижается так же, как и предел прочности, по схожей закономерности.

Таким образом, проведенные испытания могут лечь в основу вывода поправочных коэффициентов для свойств на растяжение углепластиков с закладными элементами. Но следует отметить, что равномерное распределение крепежных элементов по закладной пластине при условии толщины до 0,5 мм может успешно применяться для повышения межслойной прочности или прочности на смятие с небольшим разупрочнением основного материала на растяжение и снижением жесткости. Снизить напряжения в нерегулярной зоне может также лучшая технологическая подготовка поверхности закладных элементов во избежание разрушения отдельных волокон в зоне гетерогенной структуры КМ.

### Список литературы

1. Череващенко, А. С. Конструктивно-технологические решения соединений металл-композит, работающих на отрыв [Текст] / А. С. Череващенко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2013. – № 1(73). – С. 14–20.
2. Карпов, Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов [Текст]: учебник / Я. С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2010. – 768 с.
3. Карпов, Я. С. Соединение деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст] / Я. С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2006. – 359 с.
4. ASTM D5766/D 5766M-02a. Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates [Text]. – app. Dec. 10 2002. – West Conshohocken: Committee on Standards, 2002. – 6 p.
5. ASTM D3039/D 3039M-00. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials [Text]. – Instead D3039-95a ; app. April 2000. – West Conshohocken: Committee on Standards, 2000. – 13 p.
6. Яворский, В. А. Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных [Текст]: метод. указ. к лабор. раб. / В. А. Яворский. – М.: Моск. физ.-техн. ин-т, 2011. – 45 с.

**Рецензент:** д-р. техн. наук, зав. каф. проф. Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 13.02.2014

## **Експериментальні дослідження впливу трансверсальних кріпильних елементів на властивості углепластиків**

Проаналізовано конструктивно-технологічні рішення з'єднань з трансверсальними закладними елементами. Через складну форму кріпильного трансверсального елемента визначення властивостей і несучої здатності конструкції ускладнено. Тому найбільш достовірним способом визначення впливу кріпильних елементів на властивості композиційного матеріалу є експеримент. Проведений експеримент підтверджує теорію про те, що трансверсальні кріпильні елементи являють собою додаткові концентратори напруг при одновісному розтязі.

**Ключові слова:** трансверсальний закладний елемент, углепластик односпрямований, конструктивно-технологічне рішення, руйнівне навантаження, об'ємний вміст, концентратор напружень.

## **Experimental studies of the effect of transverse fasteners properties CFRP**

Analyzed the structural and technological solutions of compounds with elements transversalmymi mortgage. Because of the complex shape of transversal fastening element properties and a carrying capacity of the structure difficult. Therefore, the most reliable way to determine the effect of fasteners on the properties of the composite material is an experiment. The experiment confirms the theory that the transverse fasteners is an additional stress concentrator under uniaxial tension.

**Keywords:** transversal fitting member, unidirectional carbon fiber, structural and technological solution, breaking load, a volume, stress concentrator.