

А.Б.КИРКАЧ, науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ПРОБЛЕМА ПРОЧНОСТИ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАСТИКОВ

Стаття знайомить з проблематикою міцності болтових з'єднань в перспективних конструкційних матеріалах – шаруватих композиційних пластиках або ламінатах. На основі даних опублікованих праць аналізуються експериментально-встановлені ефекти та обговорюються основні фактори, що впливають на міцність таких з'єднань та становлять інтерес для теоретичного дослідження. Наводиться спеціальна термінологія, що склалася в англійській літературі в цій галузі.

Present paper gives an insight into the problematic of strength analysis of mechanically fastened joints in modern structural materials – FRP laminates. A review of published work is carried out to outline the experimentally-observed effects and main factors influencing the complex strength behaviour of such joints which are an important subject for theoretical investigation. Special terminology established in this field is introduced in the context of discussion.

Статья знакомит с проблематикой прочности болтовых соединений в перспективных конструкционных материалах – слоистых композиционных пластиках или ламинатах. На основе данных опубликованных трудов анализируются экспериментально установленные эффекты и обсуждаются основные факторы, которые влияют на прочность таких соединений и представляют интерес для теоретического исследования. Приводится специальная терминология, которая сложилась в англоязычной литературе в этой отрасли.

Технология композиционных материалов (композитов) – одна из стремительно развивающихся областей современной техники. Создание новых материалов с улучшенными свойствами сегодня получает дополнительное значение в виду постоянно растущих требований к экономичности и экологичности продукции и производства. Классификация современных композитов очень широка как по составляющим, так и по назначению. Изложение в данной статье ведется применительно к отдельному классу композиционных материалов на основе полимерных матриц (в частности, эпоксидных), упрочненных длинными высокопрочными высокомодульными неограниченными волокнами (в частности, углеродными или стеклянными). Благодаря отличным прочностным и жесткостным свойствам при малом весе, эти материалы сегодня интенсивно внедряются в ответственных несущих элементах космических и авиационных конструкций, в судостроении и на транспорте, постепенно вытесняя традиционные металлические сплавы.

Существуют два основных вида соединений композитных элементов конструкций между собой и с другими материалами: адгезионные или клеявые (англ. ¹ adhesive bonding) и болтовые (англ. mechanical fastening) соедине-

¹ Некоторые термины, сложившиеся в англоязычной литературе по данной теме, пока не имеют устойчивого русского аналога, что в таких случаях за-

ния, причем в последнем случае одним термином обозначены как, собственно, болтовые, так и заклепочные соединения. Преимущества болтовых соединений в их технологичности и дешевизне, слабой чувствительности к температурным и атмосферным воздействиям, возможности неразрушающей разборки и т.д. Одним из основных недостатков этих соединений в хрупких анизотропных композитах является существенная сложность их прочностного поведения, что влечет за собой трудности проектирования соединений с требуемой степенью надежности, необходимость использования больших коэффициентов запаса прочности и, как следствие, снижает выгоды от использования композитов в конструкции.

1 Материал. Высоконагруженные конструкционные композиты (англ. high-performance structural composites), как правило, имеют сложную структуру, состоящую из большого числа тонких однонаправлено-упрочненных слоев, соответственным образом ориентированных (повернутых) по отношению друг к другу и к основным направлениям внешней нагрузки (см. рис. 1), за счет чего достигается требуемая степень анизотропии жесткостных и прочностных свойств материала. Слоистые композиты называют ламинатами (англ. laminate, UD(**u**nidirectional)-laminate).

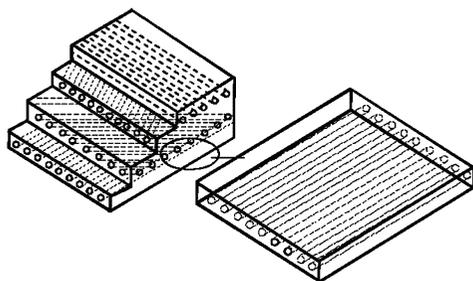


Рисунок 1 – Строение ламината с однонаправлено-упрочненными слоями

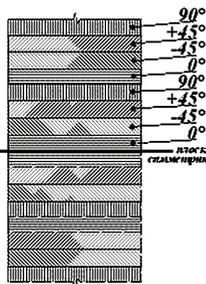


Рисунок 2 – Схематичное представление $((90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ)_2)_s$ -ламината

На практике обычно используют ортотропные ламинаты, структура (последовательность укладки и ориентация слоев) которых симметрична относительно серединной плоскости композитной панели. Строение ламината указывают с помощью структурной формулы следующего общего вида:

$$((\alpha_m/\alpha_{m-1}/\dots/\alpha_2/\alpha_1)_n)_s, \quad (1)$$

ставляет трактовать их в авторском переводе. Поэтому, для определённости, здесь и далее в тексте статьи при первом упоминании специальных терминов и аббревиатур в скобках приводятся их общепринятые англоязычные эквиваленты.

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{m-1}, \alpha_m$ – углы ориентации (направления упрочнения) слоев ламината с 1 до m в порядке снизу вверх в градусах, n – число повторений последовательности слоев ($\alpha_m/\alpha_{m-1}/\dots/\alpha_2/\alpha_1$) в ламинате, а индекс s означает, что данная последовательность соответствует 1/2 структуры симметричного ламината. На рис. 2 в качестве примера показано строение $((90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ)_2)_s$ -ламината, состоящего из 16 слоев. Для сбалансированных симметричных ламинатов на основе 0° -, 90° - и $\pm 45^\circ$ -направлений в литературе иногда можно встретить сокращенное обозначение вида:

$$(a_0/a_{\pm 45}/a_{90}), \quad (2)$$

где $a_0, a_{\pm 45}, a_{90}$ – процентные доли слоев соотв. (базовых) направлений в ламинате. Например, всем квазиизотропным ламинатам, один из которых показан на рис. 2, в такой нотации соответствует обозначение (25/50/25).

Высокопрочные ламинаты производят на основе препрегов (англ. prepregs) – тонких слоев полуотвержденной матрицы с погруженными в нее волокнами, с высокой точностью ориентированными в одном направлении. Их вручную выкладывают, строго соблюдая ориентацию (этот этап называется ламинированием), подрезают по форме детали, а затем помещают в автоклав, где при высокой температуре и давлении происходит окончательная полимеризация матрицы и отверждение композита. В последнее время интенсивно развиваются новые технологии производства конструкционных композитов, такие как RTM и RI (англ. resin transfer moulding, resin infusion), позволяющие существенно ускорить и автоматизировать процесс производства, тем самым снизив стоимость материала. Однако они пока не позволяют достичь значений прочности и жесткости, сравнимых с получаемыми по препрег-технологии [1]. Поэтому ламинаты на основе эпоксидных матриц, упрочненные непрерывными углеродными или стеклянными волокнами – CFRP и GFRP (англ. carbon/glass fibre reinforced plastic), – широко представлены в сегменте высококачественных композиционных материалов для ответственных элементов конструкций, в частности, авиационной техники.

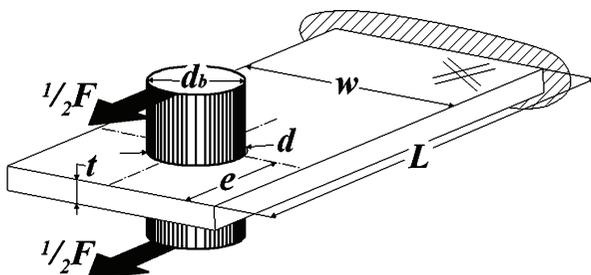


Рисунок 3 – Ламинатный образец с отверстием, нагруженным через стержень

2 Нагружение и типы разрушения. Реальные болтовые соединения обычно содержат от нескольких до десятков болтов, размещенных в один

или несколько рядов. В предположении достаточной удаленности болтов друг от друга максимальная нагрузка такого соединения с удовлетворительной точностью определяется величиной прочности единичного (изолированного) отверстия, испытывающего контактное нагружение через болт. Поэтому испытание на растяжение образцов с одним отверстием является базовым для оценки прочности ламината в соединении [2], при этом болт часто имитируется стержнем из легированной стали или титана (англ. pinned joint, pin-loaded hole). Модель опытного нагружения ламината, соответствующая двухсрезному болтовому соединению, показана на рис. 3.

Основные размеры, определяющие геометрию композитного образца – ширину w (аналог межосевого расстояния в рядном соединении), краевое расстояние e и толщину ламината t , – обычно задают в отношении к диаметру отверстия как безразмерные параметры: w/d , e/d , t/d ; зазор в соединении определяется параметром d_b/d .

Прочность отверстия (соединения) $\sigma_{B\text{ult}}$ (англ. bearing strength) определяется как отношение предельной нагрузки F_{ult} , передаваемой через отверстие, к площади его диаметрального сечения; аналогично вводится понятие нагрузки отверстия σ_B (англ. bearing load) при некотором текущем значении внешней силы F :

$$\sigma_{B\text{ult}} = \frac{F_{\text{ult}}}{dt}; \quad (3)$$

$$\sigma_B = \frac{F}{dt}. \quad (4)$$

В отличие от металлов, болтовые соединения в ламинатах демонстрируют большое разнообразие типов (макро-)разрушения (англ. failure modes). Основные типы разрушения, относящиеся к ламинату, схематично представлены на рис. 4.

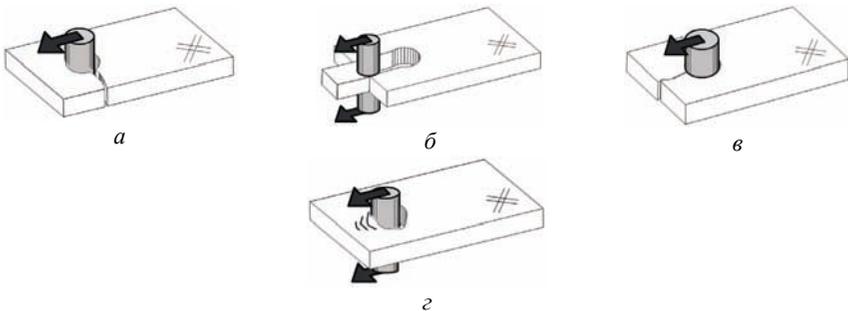


Рисунок 4 – Типы разрушения ламинатов с нагруженным отверстием:

- a – разрывный (англ. net-tension);
- b – сдвиговой (англ. shear-out);
- $в$ – раскалыванием (англ. cleavage);
- $г$ – контактный (англ. bearing)

Разрушение разрывом, сдвигом и раскалыванием относят к так назы-

ваемым катастрофическим типам разрушения (англ. catastrophic failure modes). Их возникновение крайне нежелательно, поскольку происходит внезапно, без предварительных проявлений в виде заметных деформаций или повреждений материала и влечет за собой полную потерю несущей способности соединения [3]. Считается, что правильно выполненное соединение в эксперименте разрушается по некатастрофическому (англ. non-catastrophic failure) контактному типу, для которого свойственны заметные проявления в виде остаточных деформаций отверстия, а также оптически и акустически детектируемых повреждений материала, позволяющие осуществлять контроль таких соединений на практике.

3 Параметры, влияющие на прочность. Опытные исследования, особенно активно проводившиеся на начальном этапе исследований в области прочности болтовых соединений на основе ламинатов, позволили идентифицировать основные факторы и особенности прочностного поведения соединений. Их разнообразные результаты во многом определили направление и стали эмпирической базой для дальнейших как экспериментальных, так и теоретических работ. Основные результаты ряда исследований [4-24] в краткой форме обсуждаются ниже.

В работе [4] делается вывод, что недостаточная величина краевого расстояния и ширины ламината приводит к возникновению нежелательных типов разрушения – соотв. сдвигового и разрывного. Разрушение раскалыванием является следствием малого краевого расстояния и недостаточной доли поперечного упрочнения в ламинате. В [5] на примере GFRP и CFRP было показано, что по мере того, как ширина ламинатной пластинки увеличивается, наблюдается переход от разрывного типа разрушения к контактному. Для квазиизотропного и ($\pm 45^\circ$)-CFRP-ламината в [6] рекомендуются минимальные значения w/d соответственно 5 и 8. В работе [7] для ($0^\circ/\pm 45^\circ$)-углепластиков предлагается $w/d > 4$, хотя в то же время отмечается, что рекомендованное значение зависит от соотношения 0° - и $\pm 45^\circ$ -слоев в ламинате. Аналогично, по мере возрастания краевого расстояния происходит смена сдвигового типа разрушения на контактный с соответствующим увеличением прочности соединения. В работе [6] для ($\pm 45^\circ$)-углепластиков рекомендуется $e/d > 5$, а в случае квазиизотропной структуры – $e/d > 3$. Такое же значение было получено в [7] для ($0^\circ/\pm 45^\circ$)- и ($90^\circ/\pm 45^\circ$)-CFRP-ламинатов, причем авторы отмечают его тенденцию к убыванию с ростом диаметра отверстия, а также в работе [8] для GFRP аналогичного строения. Качественно точно так же ведут себя в соединениях ламинаты, упрочненные кевларом (KFRP) [9]. При этом все авторы заключают, что минимальные значения параметров w/d и e/d , необходимые для реализации контактного режима работы соединения, сильно зависят от структуры ламината. Как правило, выбор значений этих параметров ≥ 5 оказывается достаточным для большинства ламинатов при нагружении стержнем, в то время как для заклепочных соединений и болто-

вых соединений без затяжки достаточным будет значение 3. Влияние толщины ламината является особенно существенным в соединениях без затяжки и нагруженным через стержень, при этом наибольшая прочность соединения достигается при значениях t/d не ниже 1 [10, 11] и резко убывает при дальнейшем уменьшении этого параметра [12]. Прочность болтовых соединений с затяжкой слабо чувствительна к изменению толщины композита.

В большинстве исследований наблюдается существенное влияние строения ламината как на величину прочности соединения, так и на тип разрушения. В [13] указывается, что оптимальная контактная прочность отверстия в CFRP достигается у симметричных ламинатов, в которых доля 0° -слоев (армированных в направлении внешней нагрузки) составляет от 55 до 80%, а остальная часть состоит из $\pm 45^\circ$ -слоев. О преимуществах ($0^\circ/\pm 45^\circ$)-укладки по сравнению с ($90^\circ/\pm 45^\circ$)-строением говорится и в работе [7] на примере заклепочных соединений в CFRP. Экспериментально доказано, что добавление $\pm 45^\circ$ -слоев снижает коэффициенты концентрации напряжений у нагруженного отверстия в композите [6, 13, 14]. В [6] также отмечается, что прочность соединения оказывается тем выше, чем однороднее структура ламината, что по всей видимости связано с величиной межслойных напряжений в композите. Определяющее влияние межслойных напряжений на прочность предполагается и в [15] на основе зависимости прочности соединения от структуры GFRP-композита, чем объясняется упрочняющий эффект от расположения 90° -слоев на внешних поверхностях ламината. В работах [4, 16] делается вывод, что сдвиговый тип разрушения присущ структурам с большой долей 0° -слоев и недостаточным упрочнением в 90° -направлении. Основан данный вывод на экспериментальном факте: образцы с $e/d = 2$ и $e/d = 22$, состоящие из 50% 0° -слоев и 50% $\pm 45^\circ$ -слоев, показали сопоставимые прочности и одинаковый тип разрушения. Автор заключает, что прочность соединения будет максимальной для квазиизотропного ламината, а для прочих укладок доля слоев каждого из базовых направлений 0° , 90° и $\pm 45^\circ$ должна находиться в пределах от 1/8 до 3/8.

Самая низкая несущая способность была получена в соединениях на основе шурупов и саморезов [17], что объясняется большим количеством повреждений, вносимых в материал при монтаже, а также низкой прочностью резьбы, выполненной в хрупком композите. Заклепочные соединения показывают существенно большую прочность и поэтому могут быть использованы в нагруженных ламинатах при толщине панели до 3 мм [7], при этом использование шайб способно дополнительно увеличить прочность [18]. Самая высокая прочность достигается в болтовых соединениях. Практически все авторы обращают внимание, с одной стороны, на целесообразность минимизации зазора между болтом и отверстием, а с другой стороны – на сильное влияние затяжки болта на прочность соединения [6, 14, 19]. В работе [6] наблюдался монотонный рост прочности соединения на основе ($0^\circ/\pm 45^\circ$)-CFRP-ламината на 60–170% при увеличении давления от затяжки вплоть до значе-

ния 22 МПа, после чего эффект уже не был так выражен. Похожее поведение было замечено также и в GFRP [5]. В общем случае, болтовое соединение с затяжкой показывает наибольшую прочность, без затяжки – наименьшую, а прочность заклепочного соединения оказывается где-то между этими значениями [20]. В работах [4, 16] авторы также отмечают особую роль затяжки в соединениях, разрушающихся по контактному типу, для которого характерно возникновение значительных напряжений по толщине ламината и его расслаивание (деламинация).

Экспериментальное значение прочности соединения будет различным в зависимости от способа определения предельной нагрузки F_{ult} в формуле (3). В качестве предельной может рассматриваться не только максимальная нагрузка в соединении [14], но и, например, нагрузка, соответствующая первому пику на диаграмме сила-удлинение [15] или вызывающая заданную остаточную деформацию отверстия.

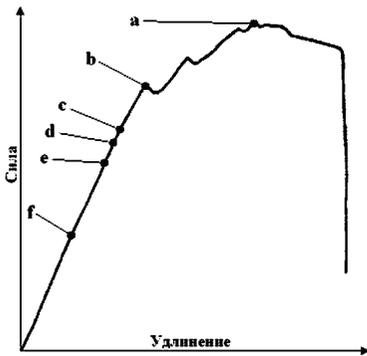


Рисунок 5 – Общий вид диаграммы растяжения болтовых соединений в GFRP [21]

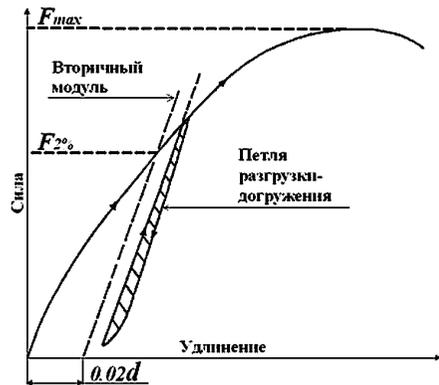


Рисунок 6 – Определение экспериментальных значений нагрузки соединения по стандарту [2]

На рис. 5 показан общий вид диаграммы сила-удлинение, полученный в работе [21] на основе испытаний болтовых соединений из стеклопластиков (GFRP) с эпоксидной и полиэфирной матрицей. Точками на диаграмме отмечены следующие характерные состояния соединения (материала):

- f – образование первых повреждений в образце. Поскольку первые повреждения возникают в ламинате уже при малых нагрузках, этот момент довольно сложно определить без специальной техники;
- e – появление слышимого треска в ламинате. Визуальное обследование выявило заметные повреждения у отверстия в образцах, нагруженных до этого значения внешней силы;
- d – уровень нагрузки, при котором повреждения в ламинате достигают внешнего края шайбы. Это состояние, как правило, не просто опре-

- делить без дополнительного оборудования;
- c* – первое заметное отклонение от линейно-упругого поведения на диаграмме;
- b* – первый пик на диаграмме, к этому моменту повреждения материала уже распространились за внешний край шайбы и хорошо видны на внешних поверхностях ламината;
- a* – максимальная нагрузка, выдерживаемая соединением. Как правило, в этом состоянии ламинат уже сильно поврежден.

Авторы подтверждают общепринятое мнение, что, поскольку в общем случае как вид диаграммы, так и степень разброса экспериментальных данных могут быть различными, определение предельной нагрузки по остаточной деформации отверстия является наиболее надежным и однозначным способом. Поскольку единого значения предельной деформации отверстия не существует, его необходимо определять для каждого (вида) материала и условий работы соединения. В [10, 11, 22] для стеклопластиков используется значение 4% диаметра отверстия, в работе [23] – 1 % для болтовых и 2 % для заклепочных соединений в CFRP, в работе [24] – 0,5 % для CFRP, в [21] – 0,4% для GFRP. Промышленный стандарт [2] предписывает опытное измерение прочности соединения как по максимальной нагрузке, так и при 2%-ной остаточной деформации отверстия, для чего в процессе нагружения предусмотрена частичная разгрузка образца как показано на рис. 6.



Рисунок 7 – Основные параметры прочности болтовых соединений в ламинатах

Выводы. Неоднородность и анизотропия материала, обуславливающие сложность его деформированного и прочностного поведения, а также целый ряд факторов, совместно влияющих на прочность и тип разрушения соединения, образуют достаточно сложную картину прочности болтовых соединений в ламинатах. На рис. 7 сделана попытка классификации основных парамет-

ров прочности на основе результатов экспериментальных работ.

Так как чисто экспериментальный подход к определению прочности болтовых соединений в слоистых композитах ввиду огромного количества вариантов материала, геометрии и нагружения крайне затруднителен, большое значение приобретает создание эффективных аналитических и численных моделей болтовых соединений, теоретически объясняющих и адекватно учитывающих особенности прочностного поведения ламинатов и пригодных для использования в инженерной практике.

Список литературы: 1. *Räckers B.* Faserverbundwerkstoffe, Entwicklungstrends am Beispiel des Airbus / *B. Räckers* // Proceedings of the Conference «Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde», 1997. – P. 3-14. 2. Airbus Industrie Test Method 1.0009: Fiber Reinforced Plastics. Determination of bearing strength // Airbus Industrie, 1994. 3. *Schürmann H.* Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden / *H. Schürmann*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Ausgabe, 2007. 4. *Hart-Smith L.J.* Mechanically-fastened joints for advanced composites - phenomenological considerations and simple analysis / *L.J. Hart-Smith* // Douglas Paper 6748. – 1978. – P. 1-32. 5. *Kretsis G.* The strength of bolted joints in glass-fibre/epoxy laminates / *G. Kretsis, F.L. Matthews* // Composites. – 1985. – Vol. 16. – P. 92-105. 6. *Collings T.A.* The strength of bolted joints in multi-directional CFRP laminates / *T.A. Collings* // Composites. – 1977. – Vol. 8. – P. 43-54. 7. *Matthews F.L.* Bolting and riveting in fibre reinforced plastics / *F.L. Matthews, A. Nixon, G.R. Want* // Proceeding of the Fibre Reinforced Plastics Congress, 1976. 8. *Porter R.M.* Bolted joints in fibre reinforced plastics / *R.M. Porter*. – MSc Project report, Aeronautics Department, Imperial College, 1976. 9. *Hodgkinson J.M.* The strength of bolted joints in Kevlar RP / *J.M. Hodgkinson, D.L. de Beer, F.L. Matthews* // ESA Scientific Paper. – 1986. – No. 243. – P. 53-61. 10. *Dastin S.* Joining and machining techniques. Handbook of fibreglass and advanced plastics composites / *S. Dastin*. – Van Nostrand Reinhold, 1969. 11. *Oleesky S.S.* SPI Handbook of reinforced plastics / *S.S. Oleesky, J.G. Mohr*. – Reinhold, 1964. 12. *Saddler C.J.* The strength of bolted/riveted joints in CFRP laminates / *C.J. Saddler, A.J. Barnard* // Westland Helicopters Ltd. Structures Research Note. – 1977. – No. 16. 13. *Collings T.A.* The use of bolted connections as a means of joining carbon fibre reinforced plastics / *T.A. Collings* // Proceedings of the Conference on Designing with Fibre Reinforced Materials 1977, Paper C229/77. 14. *Collings T.A.* The strength of bolted joints in multi-directional CFRP laminates / *T.A. Collings*. – RAE Technical Report 75127, 1975. 15. *Quinn W.J.* The effect of stacking sequence on the pin-bearing strength in glass fibre reinforced plastic / *W.J. Quinn, F.L. Matthews* // J. Comp. Mat. – 1977. – Vol. 11(2). – P. 139-145. 16. *Hart-Smith L.J.* Design and analysis of bolted and riveted joints in fibrous composite structures / *L.J. Hart-Smith* // Douglas Paper 7739. – 1986. – P. 1-15. 17. *Kingston-Lee D.M.* A preliminary investigation of proprietary self-tapping screws as fasteners for carbon fibre laminates / *D.M. Kingston-Lee, K.F. Rogers*. – RAE Technical Memorandum Materials 200, 1974. 18. *Kingston-Lee D.M.* A preliminary evaluation of proprietary rivets as fasteners for carbon fibre laminates / *D.M. Kingston-Lee, K.F. Rogers*. – RAE Technical Memorandum Materials 243, 1976. 19. *Stockdale J.H.* The effect of clamping pressure on bolt bearing loads in glass fibre reinforced plastics / *J.H. Stockdale, F.L. Matthews* // Composites. – 1976. – Vol. 7(1). – p. 34-38. 20. *Matthews F.L.* Load-carrying joints in fibre reinforced plastics / *F.L. Matthews, P.F. Kilty, E.W. Godwin* // Plastics and Rubber Process and Applications. – 1982. – Vol. 2. – P. 19-25. 21. *Johnson M.* Determination of safety factors for use when designing bolted joints in GRP / *M. Johnson, F.L. Matthews* // Composites. – 1979. – Vol. 10(2). – p. 73-76. 22. *Strauss E.L.* Mechanical joints in reinforced plastics structures / *E.L. Strauss* // Machine Design. – 1960. – Vol. 32. 23. *Webb A.L.* Riveting and bolting in carbon fibre composite / *A.L. Webb* // Proceedings of the Symposium Jointing in Fibre Reinforced Plastics, IPC Press. – 1978. 24. *Althof W.* Investigations on bonded and demountable joints made from fibre reinforced plastics / *W. Althof, J. Mueller* // Sulzer Technical Review, Switzerland. – 1975.

Поступила в редколлегию 27.10.2011