

Исследование влияния формы крепежного элемента на прочность соединения «металл- композит»

77-30569/308514

02, февраль 2012

Сорокина И. И., Астахов М. В.

УДК 620.22; 620.171; 620.178.4./6

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

sorokina-i@yandex.ru;

mvastahov@gmail.com

Разработка, производство, внедрение и продвижение на рынок материалов и конструкций нового поколения является приоритетной государственной задачей для обеспечения динамичного развития страны в целом. Мировой опыт свидетельствует, что технический прогресс в большинстве отраслей гражданского и военного машиностроения - в авиационной, космической, автомобильной, судостроительной промышленности, в транспортном и сельскохозяйственном машиностроении, в ряде других отраслей - в значительной степени определяется все более масштабной заменой традиционных металлических конструкций на конструкции из композиционных материалов [1].

В настоящее время одним из самых сложных и малоизученных остается вопрос соединения деталей, изготовленных из полимерных композитных материалов (ПКМ) с металлическими частями конструкций. В связи с чем, поиск конструкторско-технологических решений по этой проблеме является актуальной задачей.

Целью данного исследования являлась разработка указанных соединений, не требующих нарушения целостности волокон основы ПКМ, и, как следствие, не меняющих механические характеристики композита. Одним из возможных вариантов решения поставленной задачи является применение комбинированного соединения: в зоне соединения металлических частей конструкции с элементами из ПКМ устанавливаются крепёжные элементы особой формы, которые внедряются в пакет препрега ПКМ и подвергаются совместной полимеризации. В результате волокна основы в зоне соединения сохраняют свою целостность, а крепёжные элементы оказываются заформованными в тело КМ.

В рамках проведенного исследования изучалось влияние геометрии внедряемого крепежного элемента на способность соединения выдерживать осевые нагрузки, а также была получена математическая модель для определения прогнозируемой максимальной нагрузки, которую способно выдержать разрабатываемое соединение.

Для нахождения прочностных характеристик разрабатываемого соединения, проводились испытания на одноосное растяжение с фиксированием нагрузки, при которой происходит вырыв крепежного элемента (КЭ) из тела ПКМ. Для проведения первой серии испытаний [2], были изготовлены образцы, представляющие собой пластины ПКМ на основе стеклоткани марки Т-10 ГОСТ 19170-73 и эпоксидной смолы ЭД-6 ГОСТ 10587-84, соединённые с металлическими стержнями посредством заформованных в композит крепёжных элементов (см. рис. 1). Испытания проводились на установке Р-10.

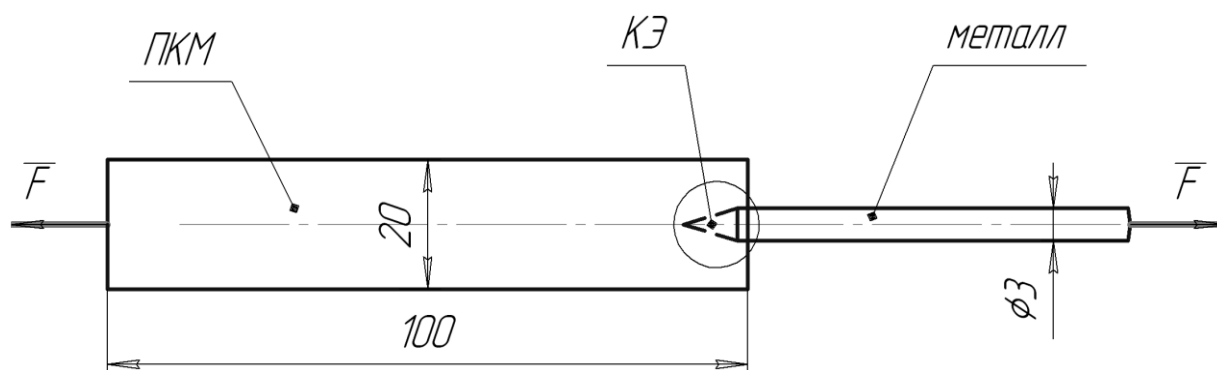


Рис. 1. Схема испытания комбинированного соединения «металл – ПКМ»

Наконечники крепежных элементов, внедряемые в композит, были представлены в трёх исполнениях (см. рис. 2), выбор которых обусловлен технологическими соображениями; при контакте с аппретированным пакетом препрега заостренный конец крепёжного элемента внедряется между волокнами стеклоткани, не повреждая их.

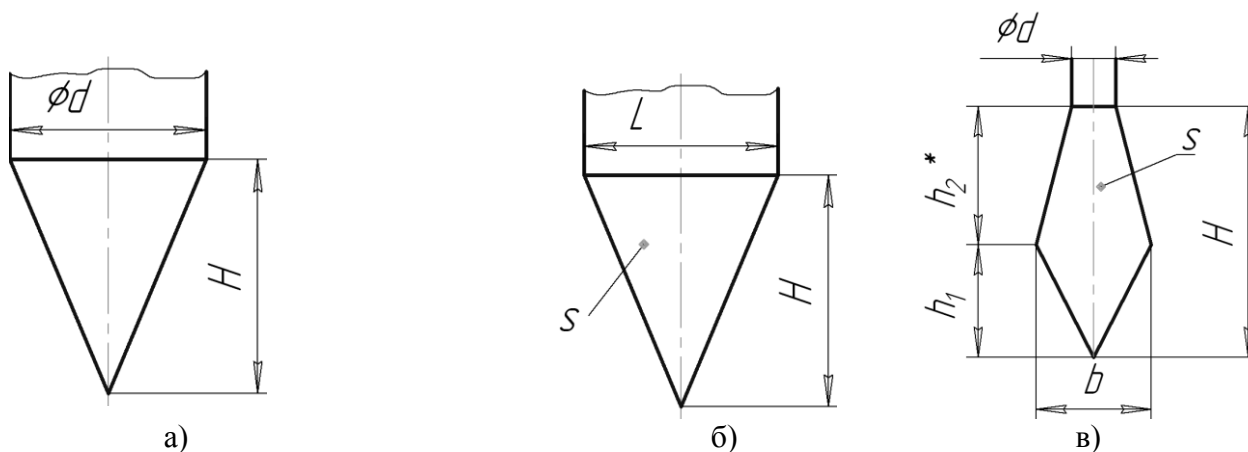


Рис. 2. Наконечники внедряемых крепежных элементов:

а) игольчатый элемент; б) треугольная пластина; в) лопатообразная пластина

В ходе эксперимента определялись сравнительные характеристики данных соединений для выявления оптимальной формы наконечника крепёжного элемента. Основным параметром, лимитирующим возможность использования таких соединений, является толщина стенки детали из композита в зоне соединения, т.е. глубина возможного внедрения крепёжного элемента в тело ПКМ. В связи с этим, для сравнительной оценки рассматриваемых крепёжных элементов был введён эмпирический коэффициент j_σ , представляющий собой отношение усилия вырыва к глубине заделки крепёжного элемента.

Таблица 1

Результаты испытаний соединений «металл – ПКМ» на вырыв крепёжного элемента

Вид наконечника КЭ	№ образца	Глубина заделки $H, [мм]$	Площадь поверхности КЭ $A, [мм^2]$	Усилие вырыва $F, [Н]$	$j_\sigma = \frac{F}{A}$
Игольчатый элемент	2	9,4	93,0	373	3,5
	5	8,8	87,6	98	
	12	12,0	116,6	510	
	13	16,2	155,3	628	
Треугольная пластина	21	9,0	75,4	206	5,4
	22	8,0	56,2	235	
	23	9,0	67,0	736	
	24	5,0	48,1	863	
Лопатообразная пластина	1	9,9	85,8	1030	11,6
	3	12,3	120,5	1177	
	4	11,1	101,7	687	
	11	13,7	152,8	932	

Данные анализа (см. таблицу 1) показывают, что коэффициент j_σ имеет наибольшее значение для крепёжного элемента лопатообразной формы. Это свидетельствует о том, что при равной глубине заделки такая форма крепёжного элемента даёт наиболее прочное соединение.

Для определения влияния геометрии и глубины внедрения стального элемента в ПКМ на максимальную нагрузку, которую выдерживает изучаемое соединение, был реализован и обработан полнофакторный эксперимент ПФЭ 2^2 , образцы для которого были изготовлены по той же технологии. При этом наконечники, внедряемые в композит,

изготавливались лопатообразной формы и отличались шириной лопатки b и глубиной внедрения крепежного элемента в ПКМ $l_{загл}$. Испытания проводились на базе ОАО «Калужский турбинный завод», РФ, испытательная машина серии LFM 20 – 100 кН – LFM – 100. Для обеспечения крепления образцов в клиновых захватах машины стержни крепежных элементов приваривались к металлической пластине (см. рис. 3).

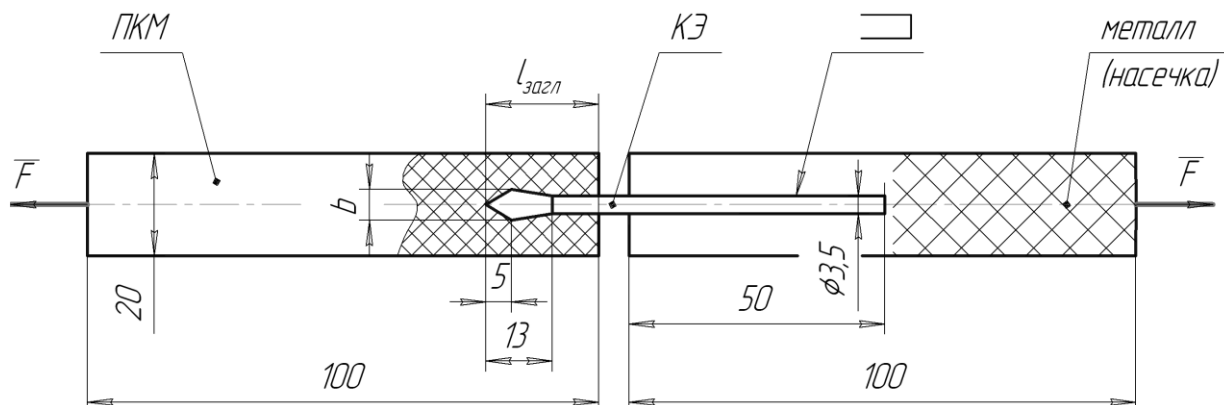


Рис. 3. Схема испытания соединения «металл – ПКМ» с КЭ лопатообразной формы

Испытания производились при фиксированной скорости перемещения захватов испытательной машины с регистрацией разрушающей нагрузки и построением диаграммы деформирования. На основании полученных экспериментальных данных определялось усилие разрушения.

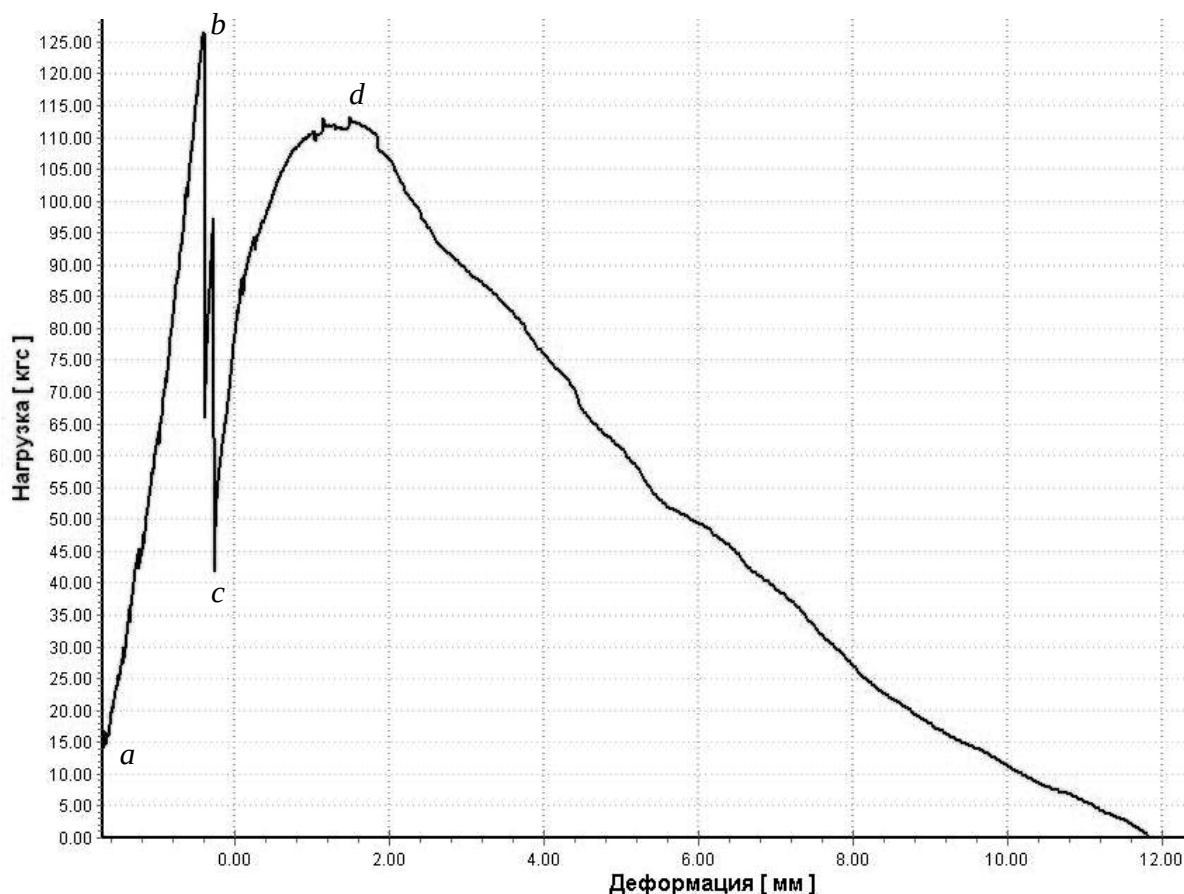


Рис. 4. Типовая диаграмма нагружения комбинированного соединения «металл – ПКМ»

Анализ полученных диаграмм нагружения (рис. 4) показывает, что разрушение образца происходит не сразу, а ступенчато. Сначала увеличение нагрузки не разрушает образец (участок *ab* диаграммы), при достижении пиковой нагрузки (точка *b*) КЭ сдвигается с места, начинается разрушение соединения (участок *bc* диаграммы), однако за счет толщины КЭ происходит деформирование ПКМ, образуется укрепленный слой и соединение продолжает держать нагрузку (участок *cd* диаграммы), при дальнейшем нагружении образца происходит окончательное разрушение соединения. Таким образом, очевидно, что можно увеличить усилие вырыва КЭ, усовершенствовав его геометрию. Одним из возможных вариантов является изготовление внедряемого КЭ с утолщенными плечиками (рис. 5).

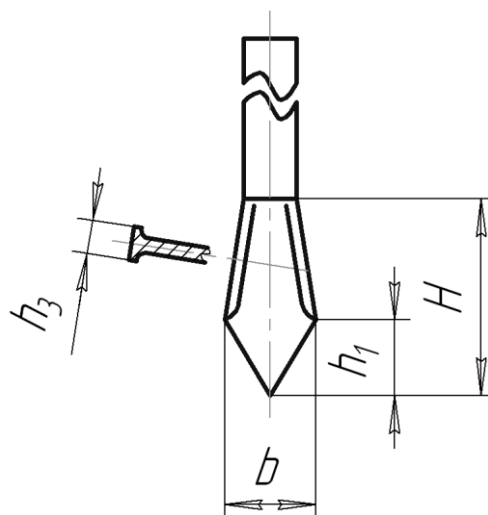


Рис. 5. Вариант конструкции КЭ

В условиях проводимого исследования максимальная нагрузка, которую выдерживало изучаемое соединение, полностью отвечала всем требованиям, накладываемым на зависимую переменную. В дальнейшем будем называть ее – отклик. В условиях эксперимента исследовались два независимых фактора, непосредственно влияющих на отклик: x_1 – ширина лопатки внедряемого элемента $b, [мм]$; x_2 – глубина внедрения стального элемента в композитный материал $l_{загл}, [мм]$. Проводилось кодирование выбранных факторов (см. таблицу 2).

Для более объективной оценки влияния факторов и их взаимодействия на отклик регрессионный анализ результатов многофакторного эксперимента дополнен дисперсионным анализом, выполняемым по стандартной методике [3].

Таблица 2

Кодирование факторов

факторы	Уровни факторов			Интервал варьирования
	+1	0	-1	
x_1	8	6,5	5	1,5
x_2	25	21,5	18	3,5

Модель является адекватной, если сумма эффектов факторов и их взаимодействий описывает 85 % дисперсии отклика. При выполнении дисперсионного анализа необходимости проверять адекватность полученной модели нет, так как суммарный процент дисперсий отклика 89,907 %, что больше 85 %. Следовательно, учтены все факторы и их взаимодействия существенно влияющие на отклик.

Обработка многофакторного эксперимента позволила получить следующее уравнение регрессионного анализа с кодированным масштабом уровней факторов:

$$y(F_{\max}) = 1633,121 + 300,904x_1 + 51,696x_2 - 35,121x_1x_2.$$

Анализ уравнения регрессии, показывает что:

- при увеличении ширины лопатки внедряемого элемента увеличивается нагрузка, которую выдерживает изучаемое соединение;
- при увеличении глубины внедрения стального элемента в композитный материал нагрузка, которую выдерживает изучаемое соединение, также увеличивается, но незначительно.

Для удобства анализа уравнение регрессии часто представляется в виде столбчатой диаграммы или производится так называемое ранжирование эффектов факторов (рис. 6).

Для использования в расчетах уравнения регрессии необходимо представить в натуральном масштабе факторы, используя для этого формулы связи кодированных уровней факторов с натуральными:

$$x_1 = \frac{b - x_1^0}{\Delta x_1}, \quad x_2 = \frac{l_{\text{загл}} - x_2^0}{\Delta x_2},$$

где: x_i^0 - значение i -ого фактора на нулевом уровне,

Δx_i - интервал варьирования соответствующего фактора.

С учетом вышеизложенного, расчетная модель принимает вид:

$$F_{\max} = -923,245 + 344,43b + 58,25l_{\text{загл}} - 6,69bl_{\text{загл}}.$$

Подставляя в полученное уравнение соответствующие значения параметров соединения – ширины лопатки внедряемого элемента $b, [\text{мм}]$ и глубины внедрения стального элемента в композитный материал $l_{\text{загл}}, [\text{мм}]$ – можно получить прогнозируемую максимальную нагрузку $F_{\max}, [\text{Н}]$, которую выдерживает изучаемое соединение.

Дисперсионный анализ (рис. 7) более чувствителен к влиянию того или иного фактора и позволяет определить вклад факторов и их взаимодействия в дисперсию отклика.

Дисперсионный анализ результатов ПФЭ 2^2 показывает, что:

- 89,907 % вариации дисперсии отклика (нагрузка, которую выдерживает изучаемое соединение) вызвано влиянием фактора x_1 (ширина лопатки внедряемого элемента);
- вклад фактора x_2 (глубина внедрения стального элемента в композитный материал) составляет 2,654 %;
- вклад взаимодействия этих факторов составляет 1,225 %;

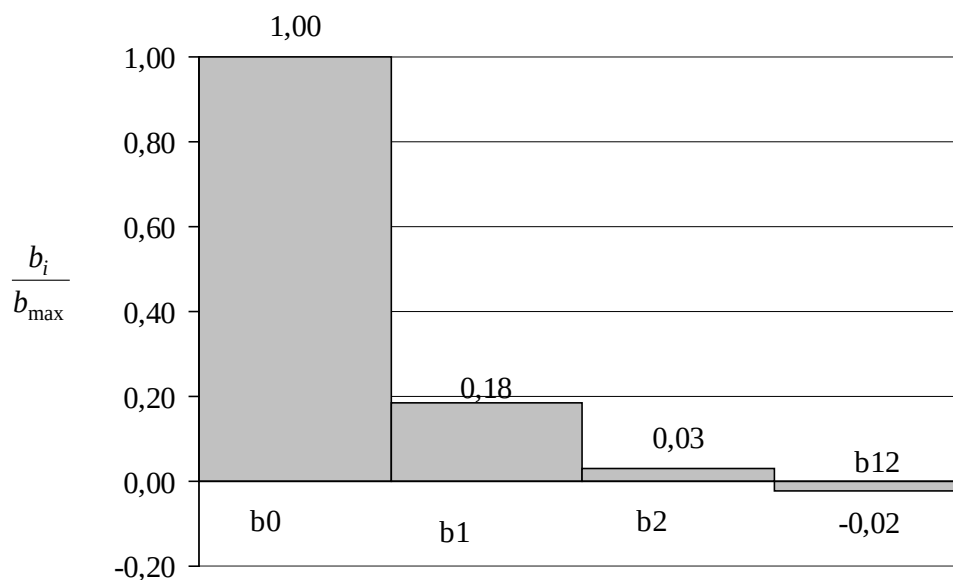


Рис. 6. Ранжирование эффектов факторов по t - критерию (критерию Стьюдента), регрессивный анализ

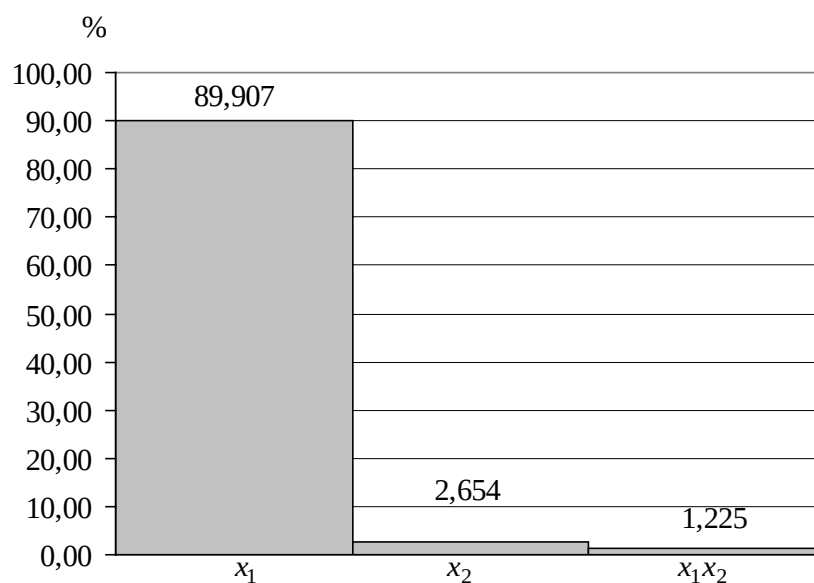


Рис. 7. Ранжирование эффектов факторов по F - критерию (критерию Фишера), дисперсионный анализ

Таким образом, наиболее ощутимое влияние на нагрузку, которую выдерживает изучаемое соединение, оказывает ширина лопатки внедряемого элемента, причем влияние этого фактора в 34 раза сильнее влияния глубины внедрения стального элемента в композитный материал.

Кроме того, дисперсионный анализ показывает, что уравнение регрессии объясняет 89,907 % дисперсии отклика. Это означает, что учтены все факторы и их взаимодействия, существенно влияющие на отклик.

Итак, результаты регрессионного и дисперсионного анализа качественно совпадают.

Проведенные исследования показали, что наиболее рациональным конструктивно-технологическим решением соединения деталей, изготовленных из полимерных композитных материалов (ПКМ) с металлическими частями конструкций из рассмотренных, являются соединения при помощи крепёжного элемента лопатообразной формы с утолщенными плечиками. Причем с увеличением ширины лопатки внедряемого элемента увеличивается нагрузка, которую выдерживает изучаемое соединение, а увеличение глубины внедрения такого крепежного элемента оказывает незначительное воздействие на увеличение этой силы и, в проектировочных расчетах может выбираться по технологическим соображениям.

Список литературы:

1. Технологическая платформа «Индустрия конструкций из композиционных материалов» // сайт ОАО «ММЭЗ—композиционные технологии» (г. Москва). http://mempct.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=60:-l-r&catid=4:2010-12-16-09-20-50&Itemid=7 (дата обращения: 20.10.2011).
2. Астахов М.В., Таганцев Т.В. Экспериментальное исследование прочности соединений «сталь-композит» // Труды МГТУ «Математическое моделирование сложных технических систем», 2006, №593. С. 125-130.
3. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях Киев: Наукова думка, 1990.184 с.

Research of the influence of fastener's form on the strength of "metal-composite" joint

77-30569/308514

02, February 2012

Sorokina I.I., Astahov M.V.

Bauman Moscow Technical University, Kaluga Branch

sorokina-i@yandex.ru;

mvastahov@gmail.com

Practicable methods of fastening of the composite details with metal parts of designs were researched. The results of tests were presented; empirical dependence for the forecast of working efficiency of such joints was proposed. Regression and dispersion analyses of obtained test data were carried out. Future development of such joints was outlined.

Publications with keywords: [composite](#), [carrying out of tests](#), [statistical processing of results](#)

Publications with words: [composite](#), [carrying out of tests](#), [statistical processing of results](#)

Reference

1. <http://mempct.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=60:-l-r&catid=4:2010-12-16-09-20-50&Itemid=7>.
2. Astakhov M.V., Tagantsev T.V., Experimental study of the strength of connections "steel-composite", Trudy MGTU "Mathematical modeling of complex technical systems" - Proceedings of the BMSTU "Mathematical modeling of complex technical systems" 593 (2006) 125-130.
3. Ryzhov E.V., Gorlenko O.A., Mathematical methods in technology research, Kiev, Naukova dumka, 1990, 184 p.