

Любченко М.А., Чжан А.Л. К вопросу оптимизации параметров метрической резьбы на углерод-углеродном композиционном материале // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 40–47. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.4.05

Lyubchenko M.A., Chzhan A.L. Revisiting optimization of metric thread parameters on carbon-carbon composite material. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 40–47. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.4.05

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 23, № 4, 2021**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.4.05

УДК 621.882.29

**М.А. Любченко, А.Л. Чжан**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МЕТРИЧЕСКОЙ РЕЗЬБЫ  
НА УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ**

Углерод-углеродные композиционные материалы – это материалы, которые сохраняют свою работоспособность при интенсивном нагреве в широком диапазоне температур (от 20 до 2500 °С). Они нашли свое применение в авиа- и ракетно-космической технике. Композитные материалы отличаются высокими удельной прочностью и жесткостью, сохраняющимися неограниченно долго в инертных средах при повышенных температурах. Сочетание высокой теплостойкости и химической стойкости с высокими значениями теплопроводности при малом линейном расширении делает УУКМ незаменимыми в области высокотемпературных применений.

Посвящена исследованию резьбового крепежа из УУКМ. Исследовано влияние шага резьбовой пары, изготовленной из пространственно-армированного углерод-углеродного КМ со схемой армирования 4ДЛ, на возможность приблизиться к достижению условия равнопрочности резьбового соединения из композитов. Проведена оптимизация шага резьбы для исследуемого КМ. Получены результаты, основанные на численных расчетах, выполненных с помощью метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS, и натурных экспериментов, проведенных на универсальной испытательной машине. Приведены результаты несущей способности резьбы, изготовленной из УУКМ, при разрушении по стержню, а также представлена прочность витков рассматриваемого типоразмера резьбы в резьбовой паре на срез. На основе анализа результатов численных расчетов и результатов экспериментов сделаны выводы о необходимости повышения шага для резьбовой пары, изготовленной из КМ. Увеличение шага резьбы до значения, отличного от рекомендованных ГОСТом, продемонстрировало повышение несущей способности резьбы из УУКМ при нормальных температурах более чем в 2,5 раза.

**Ключевые слова:** УУКМ, КМ, МКЭ, НДС, резьбовое соединение, резьбовая пара, касательные напряжения, нормальные напряжения, шаг резьбы, несущая способность.

**M.A. Lyubchenko, A.L. Chzhan**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

**REVISITING OPTIMIZATION OF METRIC THREAD PARAMETERS  
ON CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIAL**

Carbon-carbon composite materials (CCCM) are materials that maintain their efficiency under intense heating in a wide temperature range (from 20 °C to 2500 °C). They have found their application in aviation and space technology. Composite materials (CM) are characterized by high specific strength and hardness, which persist indefinitely in inert area at elevated temperatures. The combination of high heat resistance and chemical resistance with high values of thermal conductivity with a small linear expansion make CCCM indispensable in the field of high-temperature applications.

The work is devoted to the study of threaded fasteners from CCCM. The influence of the pitch of a threaded pair made of spatially reinforced CM with a 4DL reinforcement scheme on the possibility of approaching the condition of equal strength of a threaded joint made of composites is investigated. The optimization of the thread pitch for the studied CCCM was carried out. The results are obtained based on numerical calculations performed using the finite element method (FEM) in the ANSYS software package and field experiments conducted on a universal testing machine. The article presents the results of the bearing capacity of a thread made of CCCM when it is destroyed along the rod, and also presents the strength of the turns of the considered thread size in a threaded pair per cut. Based on the analysis of the results of numerical calculations and experimental results, conclusions are drawn about the need to increase the pitch for a threaded pair made of CM. An increase in the thread pitch, to a value other than those recommended by GOST, demonstrated an increase in the bearing capacity of the UUKM thread at normal temperatures by more than 2.5 times.

**Keywords:** CCCM, CM, FEM, VAT, threaded joint, threaded pair, shear stresses, normal stresses, thread pitch, bearing capacity.

## Введение

В настоящее время в мировой промышленности широкое применение находит такой отдельный класс материалов, как композиционные материалы (КМ) [1–6]. Данные материалы состоят из двух и более схожих или различных по своей природе компонентов, каждый из которых имеет свои уникальные характеристики, которые в комплексе усиливают и дополняют друг друга. В КМ их применяют в зависимости от назначения. При этом в процессе изготовления композит в целом приобретает новые свойства, достижение которых невозможно каждым компонентом по отдельности. Благодаря этой особенности КМ с каждым годом становятся все более востребованы [7, 8].

Возможность некоторых классов композитов работать при высоких температурах [9, 10] требует использования специального крепежа [11–17], способного сохранять свою работоспособность при совместном действии механических и термических нагрузок. Но, как правило, для соединения деталей из КМ применяют традиционные способы соединения, такие как клеевые соединения (КС) и металлические резьбовые детали. К недостаткам КС относится невозможность оценки прочности полученного соединения до их непосредственного нагрева до рабочих температур. Металлические резьбовые соединения не обладают необходимыми физико-механическими характеристиками для обеспечения работоспособности изделия в широком интервале высоких температур. Эти недостатки в целом уменьшают эффект от использования деталей из КМ и сужают область применения высокотемпературных композитов.

Развитие численных методов и вычислительной техники привело к созданию апробированных алгоритмов численных расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов изделий, результаты которых имеют высокую степень достоверности, сравнимую с достоверностью экспериментальных исследований. В связи с этим в настоящее время существует возможность определения зависимости предельных нагрузок разрушения от характера напряженного состояния методами, сочетающими в себе экспериментальное исследование и численное моделирование.

Для подбора оптимальных параметров резьбы из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) с целью достижения равнопрочности резьбовой пары был выбран подход, основанный на численном анализе НДС в зоне концентраторов напряжений в резьбе при известных экспериментальных значениях несущей способности резьбовой па-

ры из УУКМ, которую имеют образцы (шпилька–гайка) на разрыв. При этом полученные результаты численного расчета подтверждаются натурными испытаниями резьбовой пары.

Идея заключается в том, чтобы в численном расчете получить зависимость напряжения среза витков от нормальных напряжений в теле шпильки для определения возможного интервала равенства допускаемых напряжений при различных значениях с использованием нестандартного шага резьбы.

## Расчет НДС резьбовых соединений из УУКМ

Для получения распределения напряжений в зоне контакта витков резьбы был выбран УУКМ со схемой армирования 4ДЛ. В материале со схемой армирования 4ДЛ можно выделить несколько основных направлений: плоскость  $XU$  – в ней размещаются три группы волокон, смещенные между собой на угол  $60^\circ$ ; направление оси  $Z$ , которое формирует четвертую группу стержней, направленных перпендикулярно плоскости  $XU$  [10, 18].

Оси  $X$ ,  $U$  и  $Z$  образуют декартову систему координат, которая будет использоваться в дальнейшем как основная [19].

Расчеты проведены для резьбовой пары, вырезанной вдоль оси  $Z$ , моделирующие действие растягивающей силы вдоль оси шпильки. Расчеты реализованы в программном комплексе ANSYS методом конечных элементов (МКЭ) в геометрической нелинейной постановке и с учетом физической линейности материала. При расчете материал рассматривался как однородный и ортотропный со свойствами, соответствующими средним характеристикам рассматриваемого УУКМ [7].

С учетом симметрии детали относительно поворота и переноса вдоль оси  $Z$  рассматривалась четвертая часть резьбового соединения М16 с размерами резьбового шага  $P$  от 1 до 8 мм. На модели строилась нерегулярная конечно-элементная сетка из элементов Solid187 – трехмерный (3D) элемент объемного НДС с десятью узлами в форме тетраэдра на теле шпильки, а на гайке с преобладанием элемента Solid186 – трехмерный (3D) элемент объемного НДС с 20 узлами. Общий характерный размер элементов составил 0,5 мм, в зоне контакта – 0,2 мм. Витки резьбового соединения рассматривались как конечное число кольцевых выступов. В целях проверки сходимости решения была проведена серия расчетов с различным числом элементов.

В качестве граничных условий использовались следующие условия. Предполагалось, что в зоне соприкосновения реализуется контакт с кулоновским трением, а коэффициент трения равен 0,1 [20–22].

Значение коэффициента трения в резьбе подтверждено на рассматриваемом материале экспериментально на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана. На площадке *A* были заданы симметричные граничные условия, запрещающие перемещения в направлении нормали к площадкам, на площадке *B* запрещено перемещение вдоль оси *Z*, а к площадке *C* приложена растягивающая сила *F* (рис. 1).

Из-за анизотропии свойств материала распределение напряжений по витку имеет неравномерный характер в зоне среза витков, поэтому для получения реальной действующей нагрузки было принято решение об осреднении результатов по наиболее нагруженному витку в два этапа.

На первом этапе осреднение результатов проводилось по витку в цилиндрической системе координат, где ось *Z* совпадала с осью винта, а ось *Y* определяла угол поворота от 0° до 90° по витку резьбы. Путь осреднения задавался по основанию витка, в зоне среза резьбы. В полученных путях определялось среднее значение напряжений на срез (табл. 1). Для примера в табл. 1 представлены полученные значения средних напряжений среза для шага *P* = 3,5 мм.

На втором этапе кривые, построенные по значениям табл. 1, проинтегрированы по углу поворота  $\varphi$  и получены эффективные напряжения  $\tau_3$ , приходящиеся на один виток в соединении:

$$\tau_3 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \tau_{\text{ср. сред}} d\varphi,$$

где  $\tau_3$  – эффективные напряжения, действующие на витке;  $\tau_{\text{ср. сред}}$  – среднее напряжение на пути;  $\varphi$  – полярный угол поворота по витку.

Путем такого осреднения было получено значение напряжения на витке  $\tau_3$ , равное 11,047 МПа, для резьбы М16×3,5.

Значения нормальных напряжений по одному витку проинтегрированы по объему, и получено их осредненное значение:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \int \sigma dV, \tag{1}$$

где  $\sigma$  – напряжение в рассматриваемой области  $\sigma = \frac{\sum \sigma_i V_i}{\sum V_i}$ ;  $\sigma_i$  – напряжение в *i*-й точке впадины резьбы;  $V_i$  – *i*-я объемная доля, которой соответствует *i*-е напряжение;  $V$  – объемная доля всего витка в выделенной области (рис. 2, б).

Область осреднения показана на рис. 2. Указанная область выбиралась относительно максимального значения нормальных напряжений, полученного в ходе численного расчета МКЭ. Максимальное значение нормального напряжения в результате численно-

го расчета зафиксировано во впадине первого витка на шпильке резьбового соединения. Осреднялся участок между точками перехода радиуса впадины в прямолинейный участок витка.

Таблица 1

Средние напряжения наиболее нагруженного витка

Путь	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
$\varphi, ^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
$\tau_{\text{ср. сред}}, \text{МПа}$	11,535	11,190	11,209	10,981	10,588	10,823	11,446

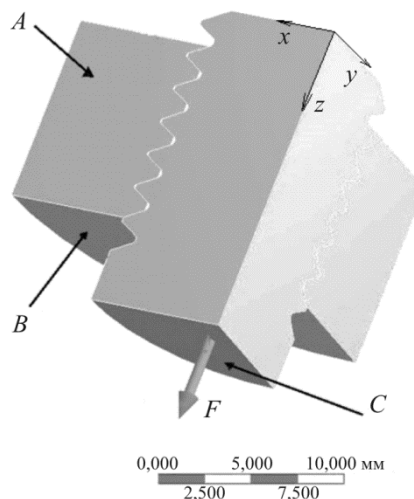


Рис. 1. Граничные условия

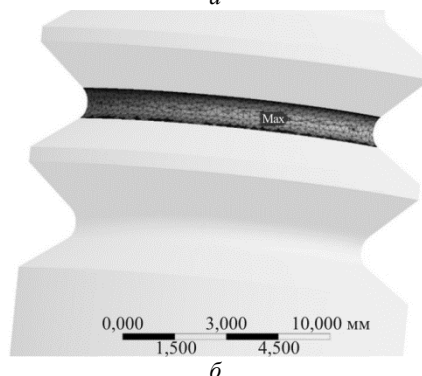
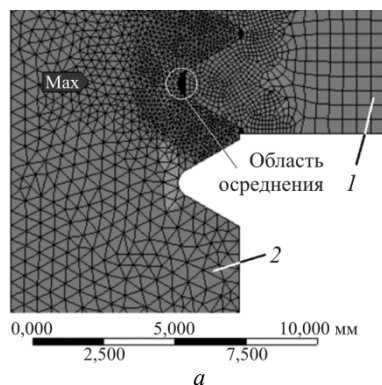


Рис. 2. Область осреднения нормальных напряжений: *a* – вид с торца на резьбовое соединение (*1* – гайка; *2* – шпилька); *б* – область осреднения нормальных напряжений на шпильке

Таблица 2

Нормальные  $\bar{\sigma}$  и касательные  $\tau_e$  напряжения и приведенные значения

$P$ , мм	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma} / [\sigma]$	$\tau_e$ , МПа	$\tau_e / [\tau]$
1	23,113	0,257	24,903	0,830
2	27,547	0,306	14,032	0,468
3	32,851	0,365	11,960	0,399
3,5	36,111	0,401	11,047	0,368
4	40,287	0,448	10,880	0,363
5	50,032	0,556	10,386	0,346
6	64,288	0,714	10,705	0,357
7	85,507	0,950	11,786	0,393
8	119,482	1,328	13,344	0,445

Примечание:

 $\bar{\sigma}$  – средние нормальные напряжения; $\bar{\sigma} / [\sigma]$  – коэффициент запаса прочности по критерию максимальных напряжений, где  $[\sigma] = 90$  МПа; $\tau_e$  – эффективные касательные напряжения; $\tau_e / [\tau]$  – коэффициент запаса прочности по критерию максимальных напряжений, где  $[\tau] = 30$  МПа.

Таким образом, с помощью формулы (1) было получено значение нормального напряжения во впадине резьбы  $\bar{\sigma} = 36,111$  МПа для типоразмера М16×3,5.

### Результаты расчета

В результате последовательного осреднения касательных и нормальных напряжений для резьбы М16 с различным размером шага получены значения, представленные в табл. 2.

Далее по полученным значениям приведенных средних нормальных и эффективных касательных напряжений был получен график в безразмерных единицах (рис. 3), из которого следует, что наиболее близким шагом для выполнения условия равнопрочности резьбы из УУКМ является шаг  $P = 3,5$  мм, что превышает установленный ГОСТ 24705<sup>1</sup> крупный шаг.

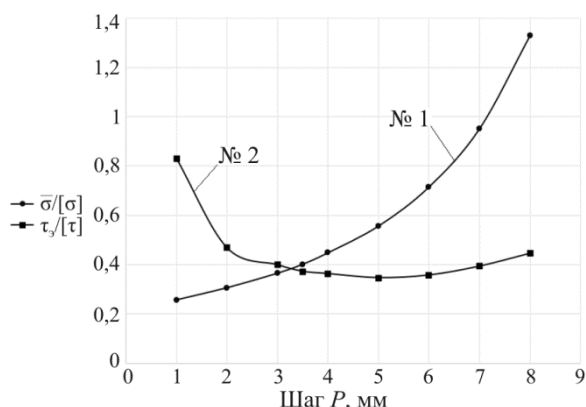


Рис. 3. Графики приведенных нормальных  $\bar{\sigma} / [\sigma]$  (№ 1) и касательных  $\tau_e / [\tau]$  (№ 2) напряжений

Проведенные расчеты и полученные результаты численного моделирования резьбового соединения позволяют составить программу экспериментального исследования параметров резьбы в целях подтверждения полученных результатов расчета.

### Постановка эксперимента

Для определения оптимального шага резьбы на УУКМ необходимо провести однофакторный эксперимент на растяжение и сжатие резьбовой пары, позволяющий выявить влияние шага на характер разрушения резьбовых элементов из УУКМ и оценить несущую способность отдельно тела шпильки и витков резьбы.

Целью механических испытаний является определение характера разрушения резьбы М16 при нестандартном шаге, а также сравнение несущей способности резьбовой пары из УУКМ с традиционным крупным шагом резьбы, изготовленной по ГОСТ 24705 и нарезанной на том же материале.

С учетом погрешности допущений, принятых в расчетах, приведенных выше МКЭ, экспериментально исследован шаг резьбы  $P = 3,5$  мм и его ближайшие окрестности, а именно шаги резьбы  $P = 3$  мм и  $P = 4$  мм.

Для оценки несущей способности тела резьбы при растяжении и прочности витков на срез при сжатии на каждый нестандартный шаг испытано не менее трех образцов на растяжение и не менее шести образцов на сжатие, вырезанных из одной заготовки.

Испытаны метрические резьбы следующего типоразмера М16×3, М16×3,5, М16×4, вырезанные в направлении оси Z.

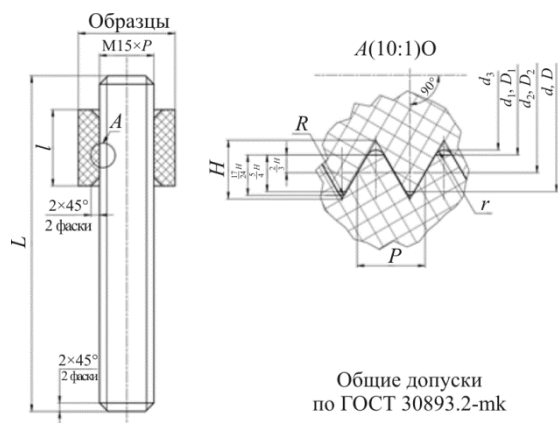
Чертеж образцов с указанием размеров приведен на рис. 4, фото изготовленных образцов – на рис. 5. Значения геометрических размеров резьбовых образцов приведены в табл. 3.

<sup>1</sup> ГОСТ 24705–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры. 23 с.

Таблица 3

Геометрические размеры резьбы рассматриваемых крепежных элементов

№ п/п	$P$ , мм	$H$ , мм	$d, D$ , мм	$d_1, D_1$ , мм	$d_2, D_2$ , мм	$d_3$ , мм	$r$ , мм	$R$ , мм
1	3,0	2,598	16	12,753	14,052	12,320	0,433	0,325
2	3,5	3,031	16	12,211	13,727	11,707	0,505	0,379
3	4,0	3,464	16	11,670	13,402	11,093	0,578	0,433



Общие допуски по ГОСТ 30893.2-мк

Рис. 4. Чертеж образца для исследования резьбы с нестандартным шагом

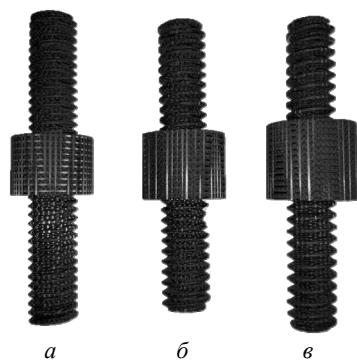


Рис. 5. Фото изготовленных образцов: а – шаг 3 мм; б – шаг 3,5 мм; в – шаг 4 мм

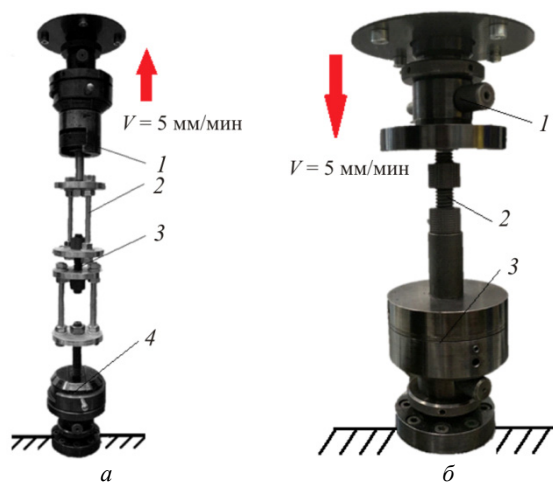


Рис. 6. Фотографии оснасток для испытания в сборе: а – на разрыв (1 – активный захват, 2 – оснастка на разрыв, 3 – резьбовой образец на разрыв, 4 – зафиксированный захват); б – на сжатие (1 – активный стол, 2 – резьбовой образец, 3 – зафиксированный стол)

На рис. 6, а изображена оснастка на разрыв в сборе, указано направление движения активного захвата и скорость его перемещения. Стоит отметить тот факт, что при разрушении принятого образца будет разрушаться наименее прочное резьбовое соединение, так как на один образец приходится две точки фиксации резьбы (гайки). Это значит, что несущая способность резьбовой пары на разрыв будет оценена по нижней границе.

На рис. 6, б изображена оснастка на сжатие в сборе. В отличие от эксперимента на разрыв, при сжатии за счет двух гаек, изначально установленных на шпильку, можно получить два экспериментальных значения несущей способности витков на одном образце и увидеть объективный разброс значений прочности витков для резьбы, изготовленной на УУКМ со схемой армирования 4ДЛ.

Результаты исследования образцов приведены в табл. 4.

### Обсуждение полученных результатов

В эксперименте на разрыв все резьбовые элементы разрушились из-за разрыва по стержню шпильки. При сжатии образцы разрушались от среза витков на теле шпильки. Разрушение по стержню при эксперименте на разрыв подтверждает верность выбранного подхода к подбору оптимального шага резьбы для рассматриваемого УУКМ.

Анализ несущей способности резьбы при растяжении и прочности витков при сжатии показывает, что несущая способность резьбы при растяжении ниже, чем при оценке прочности витков на срез. Из этого можно сделать предположение, что для достижения большей сходимости значений прочности при растяжении и прочности витков при сжатии необходимы доработка принятой математической модели и учет масштабного эффекта прочности и жесткости витков, а именно учет нарушения структуры материала и отсутствия представительного объема материала в витках резьбы.

### Выводы

На модели резьбового соединения из УУКМ с помощью МКЭ получены эффективные касательные и средние нормальные напряжения.

Таблица 4

## Результаты эксперимента

Результаты проведенных экспериментов на разрыв					
№ п/п	Типоразмер	Номер образца	$P$ , Н	$P_{cp}$ , Н	$\pm$ ДИ, Н
1	M16×3	1	12 315	11 643	3192
2		2	10 161		
3		3	12 452		
4	M16×3,5	1	12 753	12 253	1486
5		2	11 590		
6		3	12 415		
7	M16×4	1	11 711	11240	1349
8		2	11 362		
9		3	10 646		
Результаты проведенных экспериментов на сжатие					
1	M16×3	1	18 732	16 691	2256
2			16 735		
3			17 062		
4		2	19 218		
5			14 185		
6			14 214		
7	M16×3,5	1	19 186	18 241	1482
8			17 148		
9			18 231		
10		2	17 701		
11			20 507		
12			16 675		
13	M16×4	1	14 355	17 543	3336
14			21 170		
15			17 058		
16		2	20 401		
17			13 412		
18			18 863		

Примечание: \*ДИ – доверительный интервал с вероятностью 95 %.

Построены графические зависимости приведенных средних нормальных и эквивалентных касательных напряжений для различных шагов резьбы M16, изготовленной из УУКМ со схемой армирования 4ДЛ.

Выявлено, что оптимальным шагом для резьбовой пары из УУКМ 4ДЛ является более крупный шаг, нежели принятый для металлических резьбовых элементов. Для типоразмера M16 он составил 3,5 мм.

Проведены эксперименты на растяжение и сжатие резьбовых пар из УУКМ 4ДЛ, получены результаты несущей способности резьбы на разрыв и на срез витков. Результаты эксперимента показали, что для достижения равнопрочности резьбовой пары из УУКМ 4ДЛ необходима корректировка математической модели, в которой нужно учесть масштабный эффект прочности и жесткости витков резьбы.

Получено, что оптимизация шага резьбовой пары из УУКМ 4ДЛ повышает несущую способность резьбы в 2,5–3 раза, по сравнению со стандартным крупным шагом, принятым для металлических резьбовых элементов [23, 24].

*Исследование не имело спонсорской поддержки. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## Список литературы

1. Цыгвинцев И.В., Постникова П.И., Сенцов И.В. Применение композитных материалов в строительстве // Инновационное развитие. – 2017. – № 7. – С. 26–29.
2. Рыжков Д.С., Татьянников Д.А. Актуальность применения композитных материалов при усилении несущих конструкций // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2020. – № 2. – С. 54–60.
3. Титков А.А. Применение композитных материалов в автомобилестроении // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2019): материалы XI междунар. науч.-техн. конф., г. Курск, 25 октября 2019 г. – Курск, 2019. – С. 351–355.
4. Применение композитных материалов при строительстве, ремонте и реконструкции объектов транспортной инфраструктуры / А.Н. Бирюков [и др.] // Строительные и дорожные машины. – 2017. – № 10. – С. 46–52.
5. Оганесян О.В. Применение композитных материалов при реконструкции полов промышленных зданий // Смотр-конкурс научных, конструкторских и технологи-

ческих работ студентов Волгоградского государственного технического университета. – Волгоград, 2019. – С. 386–387.

6. Ильиных Е.Л. Углерод-углеродные композиционные материалы и технология изготовления излучателей из углерод-углеродных композиционных материалов // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. – 2015. – Т. 1. – С. 166–170.

7. Татарников О.В. Проектирование, разработка технологических процессов и исследования углерод-углеродных композитов для термонапряженных конструкций: дис. ... д-ра техн. наук. – Королев, 1998. – 248 с.

8. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.

9. Fitzer E. The future of carbon-carbon composites // *Carbon*. – 1987. – Vol. 25, no. 2. – P. 163–190.

10. Потапов А.М. Перспективы использования углерод-углеродных композиционных материалов на основе вискозных углеродных волокон для потребностей ракетно-космической техники // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2015. – № 5 (99). – С. 152–156.

11. Modelling a single-bolt countersunk composite joint using implicit and explicit finite element analysis / B. Egan, C.T. McCarthy; P.J. Gray [et al.] // *Comput. Mater. Sci.* – 2012. – Vol. 64. – P. 203–208.

12. McCarthy C.T., McCarthy M.A., Lawlor V.P. Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole clearances // *Compos. Part B Eng.* – 2005. – Vol. 36. – P. 290–305.

13. Stress analysis of single-bolt, single-lap, countersunk composite joints with variable bolt-hole clearance / B. Egan, C.T. McCarthy, M.A. McCarthy [et al.] // *Compos. Struct.* – 2012. – Vol. 94. – P. 1038–1051.

14. Bearing damage characteristics of fibre-reinforced countersunk composite bolted joints subjected to quasi-static shear loading / H.Y. Nezhad, B. Egan, F. Merwick [et al.] // *Compos. Struct.* – 2017. – Vol. 166. – P. 184–192.

15. Dimensioning method for bolted, adhesively bonded, and hybrid joints involving Fibre-Reinforced-Polymers. / T. Vallee; T. Tannert, R. Meena [et al.] // *Compos. Part B Eng.* – 2013. – Vol. 46. – P. 179–187.

16. Experimental and finite element studies of bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy panels used in aircraft structures. / N.M. Chowdhury, W.K. Chiu, J. Wang [et al.] // *Compos. Part B Eng.* – 2016. – Vol. 100. – P. 68–77.

17. Yanfeng Zhang, Zhengong Zhou, Zhiyong Tan. Compression shear properties of Bonded-Bolted hybrid single-lap joints of C/C Composites at high temperature // *Appl. Sci.* – 2020. – Vol. 10. – P. 1054. DOI: 10.3390/app10031054

18. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы: справ. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

19. К вопросу о численном моделировании упругих свойств композиционных материалов с учетом схемы армирования / И.В. Магнитский, К.А. Пономарев, А.Н. Миронихин, С.В. Тащилов // *Инженерный журнал: наука и инновации: электрон. науч.-техн. изд.* 2012. – № 8 (8). –

URL: <http://engjournal.ru/articles/455/455.pdf> (дата обращения: 28.08.2021).

20. The effect of sliding speed and temperature on the tribological behaviour of carbon-carbon composites / J.R. Gomes, O.M. Silva, C.M. Silva [et al.] // *Wear*. – 2001. – Vol. 249. – P. 240–245.

21. Study on friction performance of carbon / carbon composite under lubrication condition / Yewei Fu, Hejun Li, Jie Fei [et al.] // *ICCM-17 Proceed Carbon*. – 2009. – Vol. 1, no. 4. – P. 1.

22. Любченко М.А. Определение коэффициентов трения в резьбовых соединениях из углерод-углеродных композиционных материалов // *Изв. вузов. Машиностроение*. – 2021. – № 3. – С. 22–28. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-3-22-28

23. Захаров М.Н., Любченко М.А. Исследование предельных нагрузок для резьбовых соединений из углерод-углеродных композиционных материалов // *Конструкции из композиционных материалов: межотрасл. науч.-техн. журн.* – 2017. – № 4. – С. 82–87.

24. Любченко М.А., Магнитский И.В. Оценка прочности резьбового соединения из углерод-углеродного композиционного материала при проектировании деталей из композита // *Вопросы оборонной техники. Секция 15*. – 2018. – № 3 (190). – С. 14–20.

## References

1. Tsygvintsev I.V., Postnikova P.I., Sentsov I.V. Primenenie kompozitnykh materialov v stroitel'stve [Application of composite materials in construction]. *Innovatsionnoe razvitiie*, 2017, no. 7, pp. 26–29.

2. Ryzhkov D.S., Tat'iannikov D.A. Aktual'nost' primeniia kompozitnykh materialov pri usilenii nesushchikh konstruktssii [Relevance of the application of composite materials when reinforcing load-bearing structures]. *Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*, 2020, no. 2, pp. 54–60.

3. Titkov A.A. Primenenie kompozitnykh materialov v avtomobilestroenii [Application of composite materials in the automotive industry]. *Sovremennye avtomobil'nye materialy i tekhnologii (SAMIT-2019): materialy XI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 2019, pp. 351–355.

4. Biriukov . A.N. et al. Primenenie kompozitnykh materialov pri stroi-tel'stve, remonte i rekonstruktssii ob"ektov transportnoi infrastruktury [Application of composite materials during construction, repair and reconstruction of transport infrastructure objects]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2017, no. 10, pp. 46–52.

5. Oganessian O.V. Primenenie kompozitnykh materialov pri rekonstruktssii polov promyshlennykh zdaniy [Application of composite materials when reconstructing the floors of industrial buildings]. *Smotr-konkurs nauchnykh, konstruktorskikh i tekhnologicheskikh rabot studentov Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Volgograd, 2019, pp. 386–387.

6. Il'inykh E.L. Ugl'erod-uglerodnye kompozitsi-onnye materialy i tekhnologiia izgotovleniia izluchatelei iz ugl'erod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov [Carbon-carbon composite materials and carbon-carbon composite transmitter technology]. *Aerokosmicheskaiia tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, 2015, vol. 1, pp. 166–170.

7. Tatarnikov O.V. Proektirovanie, razrabotka tekhnologicheskikh protsessov i issledovaniia ugl'erod-

uglerodnykh kompozitov dlia termonapriazhennykh konstrukttsii [Design, development of technological processes and research of carbon-carbon composites for thermally stressed structures]. Doctor's degree dissertation. Korolev, 1998, 248 p.

8. Bulanov I.M., Vorobei V.V. Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstrukttsii iz kompozitsionnykh materialov [Technology of rocket and aerospace structures made of composite materials]. Moscow: Izdatelstvo MG TU imeni N.E. Baumana, 1998, 516 p.

9. Fitzer E. The future of carbon-carbon composites. *Carbon*, 1987, vol. 25, no. 2, pp. 163–190.

10. Potapov A.M. Perspektivy ispol'zovaniia uglerodnykh kompozitsionnykh materialov na osnove viskoznykh uglerodnykh volokon dlia potrebnosti raketno-kosmicheskoi tekhniki [Prospects for the use of carbon-carbon composites based on viscose carbon fibers for the needs of rocket and space technology]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki*, 2015, no. 5 (99), pp. 152–156.

11. Egan B., McCarthy C.T., Gray P.J. et al. Modelling a single-bolt countersunk composite joint using implicit and explicit finite element analysis. *Comput. Mater. Sci.*, 2012, vol. 64, pp. 203–208.

12. McCarthy C.T., McCarthy M.A., Lawlor V.P. Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole clearances. *Compos. Part B Eng.*, 2005, vol. 36, pp. 290–305.

13. Egan B., McCarthy C.T., McCarthy M.A. et al. Stress analysis of single-bolt, single-lap, counter-sunk composite joints with variable bolt-hole clearance. *Compos. Struct.*, 2012, vol. 94, pp. 1038–1051.

14. Nezhad H.Y., Egan B., Merwick F. et al. Bearing damage characteristics of fibre-reinforced countersunk composite bolted joints subjected to quasi-static shear loading. *Compos. Struct.*, 2017, vol. 166, pp. 184–192.

15. Vallee T., Tannert T., Meena R. et al. Dimensioning method for bolted, adhesively bonded, and hybrid joints involving Fibre-Reinforced-Polymers. *Compos. Part B Eng.*, 2013, 46, pp. 179–187.

16. Chowdhury N.M., Chiu W.K., Wang J. et al. Experimental and finite element studies of bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy panels used in aircraft structures. *Compos. Part B Eng.*, 2016, vol. 100, pp. 68–77.

17. Yanfeng Zhang, Zhengong Zhou, Zhiyong Tan. Compression shear properties of Bonded-Bolted hybrid single-lap joints of C/C Composites at high temperature. *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, pp. 1054. DOI: 10.3390/app10031054

18. Tamopol'skii Iu.M., Zhigun I.G., Poliakov V.A. Prostranstvenno-armirovannye kompozitsionnye material [Spatially reinforced composite materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 224 p.

19. Magnitskii I.V., Ponomarev K.A., Mironikhin A.N., Tashchilov S.V. K voprosu o chislennom modelirovani i uprugikh svoistv kompozitsionnykh materialov s uchetom

skhemy armirovaniia [On the numerical simulation of the elastic properties of composite materials, taking into account the reinforcement scheme]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*. URL: <http://engjournal.ru/articles/455/455.pdf> (accessed January 2017).

20. Gomes J.R., Silva O.M., Silva C.M. et al. The effect of sliding speed and temperature on the tribological behaviour of carbon-carbon composites. *Wear.*, 2001, vol. 249, pp. 240–245.

21. Yewei Fu, Hejun Li, Jie Fei et al. Study on friction performance of carbon-carbon composite under lubrication condition. *ICCM-17 Proceed.* 2009.

22. Liubchenko M.A. Opredelenie koeffitsientov treniia v rez'bovykh soedineniiakh iz uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie*, 2021, no. 3, pp. 22–28. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-3-22-28

23. Zakharov M.N., Liubchenko M.A. Issledovanie predel'nykh nagruzok dlia rez'bovykh soedinenii iz uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov [Study of ultimate loads for threaded joints made of carbon-carbon composites]. *Konstrukttsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2017, no. 4, pp. 82–87.

24. Liubchenko M.A., Magnitskii I.V. Otsenka prochnosti rez'bovogo soedineniia iz uglerod-uglerodnogo kompozitsionnogo materiala pri proektirovani i detalei iz kompozita [Evaluation of the strength of a carbon-carbon composite threaded joint in the design of composite parts]. *Voprosy oboronnoi tekhniki: Sektsiia 15*, 2018, no. 3 (190), pp. 14–20.

Получено 27.09.2021

Принято 10.11.2021

Опубликовано 30.12.2021

### Сведения об авторах

**Любченко Михаил Алексеевич** (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры основ конструирования машин Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, e-mail: [ma.lyubchenko@yandex.ru](mailto:ma.lyubchenko@yandex.ru).

**Чжан Анна Лиевна** (Москва, Россия) – магистрант кафедры основ конструирования машин Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, e-mail: [ania461@yandex.ru](mailto:ania461@yandex.ru).

### About the authors

**Mikhail A. Lyubchenko** (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Fundamentals of Design, Bauman Moscow State Technical University, e-mail: [ma.lyubchenko@yandex.ru](mailto:ma.lyubchenko@yandex.ru).

**Anna L. Chzhan** (Moscow, Russian Federation) – Master's Degree Student, Department of Fundamentals of Design, Bauman Moscow State Technical University, e-mail: [ania461@yandex.ru](mailto:ania461@yandex.ru).