УДК 621.882.29

Оценка несущей способности резьбовой пары из углерод-углеродных композиционных материалов на основе иглопробивного каркаса и пироуглеродной матрицы

М.А. Любченко[1], М.В. Магнитская[2], И.В. Магнитский[1], Д.А. Цветков[2]

[1] МГТУ им. Н.Э. Баумана
[2] АО «Композит»

Estimation of the bearing capacity of a threaded pair made of needle-punched frame/pyrocarbon matrix-based carbon-carbon composite materials

M.A. Lyubchenko[1], M.V. Magnitskaya[2], I.V. Magnitsky[1], D.A. Tsvetkov[2]

[1] Bauman Moscow State Technical University
[2] Kompozit JSC

Выполнено экспериментальное исследование несущей способности резьбового крепежа из углерод-углеродных композиционных материалов на основе иглопробивного каркаса и пироуглеродной матрицы. Определена несущая способность одновинтовой резьбовой пары при нормальной и высоких температурах. Проведена обработка диаграмм деформирования. Проведено экспериментальное исследование прочности материала на срез, имитирующее нагружение одного витка в резьбовом соединении в зависимости от размеров области среза. Определено влияние масштабного эффекта материала на его прочность при срезе. Полученные результаты сопоставлены с данными для резьбового крепежа, изготовленного из пространственно-армированного углерод-углеродных композиционных материалов.

EDN: KULPPZ, https://elibrary/kulppz

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, пироуглеродная матрица, иглопробивной каркас, резьбовое соединение, резьбовая пара, несущая способность

The paper describes experimental investigation of the bearing capacity of threaded fasteners made of carbon-carbon composite materials based on a needle-punched frame and a pyrocarbon matrix. The bearing capacity of a single-screw threaded pair under normal as well as extreme temperatures was estimated. The strain diagrams were obtained and processed. In the experiment simulating loading on one turn of a threaded joint, dependence of the shear strength of the material depending on the shear area size was studied. The scale effect influence on the shear strength of the material was determined. The results obtained were compared to those obtained for threaded fasteners made of spatially reinforced carbon-carbon composite materials.

EDN: KULPPZ, https://elibrary/kulppz

Keywords: carbon-carbon composite material, pyrocarbon matrix, needle-punched frame, threaded joint, threaded pair, bearing capacity

Проектирование соединений конструкций из композиционных материалов (КМ) — сложнейшая задача, так как несущая способность соединения влияет на их долговечность и надежность.

Существует большое количество исследований несущей способности клеевых [1–6] и резьбовых [7–10] соединений КМ. Одновременное использование клея и резьбы для образования клеерезьбового соединения представляется целесообразным, но отсутствие стандартизованных методик расчета и проектирования резьбовых соединений из КМ требует отдельного исследования. Кроме того, отсутствуют исходные данные (несущая способность резьбы и ее оптимальные параметры — шаг, диаметр, профиль и допускаемые напряжения) для расчета резьбовых соединений, выполненных из КМ различного вида.

Работы по исследованию резьбовых соединений, в которых соединяемые детали и крепеж [11–13] являются высокотемпературными композитами (углерод-углеродный КМ (УУКМ), углерод-керамический КМ и т. д.), встречаются редко. Это связано с технологическими сложностями изготовления заготовок материала и высокой стоимостью процесса получения [14] высокотемпературных композитов.

Ранее уже исследованы параметры резьбы и оценена несущая способность резьбовых элементов из пространственно-армированных УУКМ [15–18], однако для УУКМ на основе иглопробивного каркаса (ИПК) и пироуглеродной матрицы (ПУ) подобное исследование не проводилось.

Цель работы — экспериментально оценить несущую способность резьбовой пары из УУКМ на основе ИПК и ПУ при нормальной и высоких температурах.

Для оценки разрушающей нагрузки резьбовой пары из УУКМ при нормальной температуре в работе [16] предложена формула

$$F_{\text{раз}} \geq \frac{\pi d_1 k_1 P \left[\tau_{\text{ср}}\right]}{\eta}, \qquad (1)$$

где d_1 — внутренний диаметр резьбы; k_1 — коэффициент полноты резьбы (для метрической $k_1 = 0{,}87$); P — шаг резьбы; $\left[\tau_{\text{ср}}\right]$ — допускаемое напряжение материала при срезе; η — доля нагрузки, воспринимаемая первым витком, $\eta = 0{,}32$.

Чтобы иметь возможность применить формулу (1) для резьбовой пары из УУКМ на основе ИПК и ПУ, необходимо решить следующие задачи:

- экспериментально оценить несущую способность резьбовой пары;
- экспериментально получить предел прочности материала на срез;
- установить значения допускаемых напряжений материала при срезе.

Исследуемый материал. УУКМ — конструкционные и теплозащитные материалы, обладающие повышенной устойчивостью к эрозии. Их структура состоит из углеродного каркаса и связывающей его углеродной матрицы, что обеспечивает уникальные эксплуатационные характеристики. Первоначально УУКМ разработан для нужд аэрокосмической отрасли, однако благодаря сочетанию таких свойств, как низкая плотность, высокая теплопроводность и стабильность механических показателей при экстремальных температурах, он нашел применение в ракетостроении, химической промышленности и других высокотехнологичных областях [19–23].

УУКМ на основе ИПК и ПУ является эффективным с точки зрения скорости насыщения каркаса матрицей и экономически обоснованным способом изготовления УУКМ, так как за один цикл можно достичь плотности заготовки 1400…1750 кг/м^3. Как и другие КМ такого типа, УУКМ на основе ИПК и ПУ обеспечивает работоспособность конструкций в условиях высоких температур (до 2500 °С), агрессивных сред, радиационного излучения и других неблагоприятных факторов.

Каркас материала изготавливают на основе углеродной ткани АСМ С400В из высокопрочного карбонизованного волокна, слои которой последовательно скрепляют путем пробития иглопробивной машиной. Пробивающие иглы имеют зазубрины, которые протаскивают волокна между слоями, тем самым соединяя слои между собой. Готовый каркас фиксируют на нагревателе и помещают в реакционную камеру. После подачи природного газа (с содержанием метана не менее 95 %) внутрь камеры и ступенчатого режима изменения температуры ПУ уплотняет каркас. В результате осаждения на каркас ПУ из природного газа получают заготовку УУКМ. Метод изготовления такого КМ и его механические характеристики приведены в работе [24]. После остывания и извлечения заготовки из камеры ее подвергают механиче-

ской обработке для получения требуемых размеров, либо готовых деталей.

Однако нарезание резьбы из заготовки УУКМ является нетривиальной задачей, так как технология обработки таких материалов не позволяет выполнять резьбу на этапе создания заготовки и требует механической обработки резаньем (токарной или фрезерной), которая повреждает структуру УУКМ и снижает его механические характеристики в зоне витков резьбы. Кроме того, из-за хрупкости УУКМ при нормальной температуре невозможно применять методы накатки для изготовления резьбы.

Постановка экспериментов. ***Исследование прочности резьбовой пары.*** Для исследования несущей способности резьбовой пары из УУКМ на основе ИПК и ПУ при нормальной и высоких температурах использована высокотемпературная установка «УВТК» разработки АО «Композит», предназначенная для определения прочностных, упругих и деформационных характеристик неметаллических КМ в диапазоне температуры 20…2700 °С.

Принцип действия установки «УВТК» заключается в локальном нагреве рабочей части образца до температуры испытаний в инертной среде (аргон) с последующим приложением к образцу нагрузки [25, 26] согласно схеме эксперимента (рис. 1). В установке использованы графитовые нагреватели, активная часть которых греется за счет джоулева тепла. На образец тепло передается путем лучистого теплопереноса через незначительный зазор между ним и нагревателями. Источник силового питания имеет обратную связь по температуре, измеряемой пирометром.

Испытывали образцы с резьбой М8 с крупным шагом, представляющие собой шпильки с резьбовыми участками с двух концов (рис. 2).

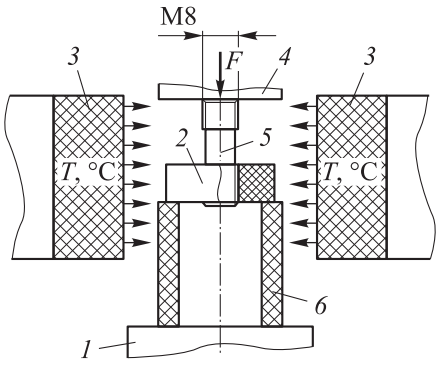


Рис. 1. Схема эксперимента с приложением к образцу нагрузки *F*:
1 — неподвижный столик; *2* — гайка; *3* — графитовые нагреватели; *4* — шарнирный столик; *5* — шпилька; *6* — втулка

Шпильки изготавливали из материала вдоль слоев (в направлении оси *X*), а гайки — перпендикулярно слоям (в направлении оси *Z)*. Выбор различных направлений вырезки для деталей обусловлен анизотропией свойств материала. Так как гайки при нагружении соединения сжимаются, для них выбрано направление вырезки перпендикулярно слоям каркаса (вдоль оси Z), при котором прочность на сжатие выше. Аналогично выбрано направление *X* для шпильки, так как пределы прочности материала при растяжении и срезе больше вдоль укладки слоев (оси *X*) материала.

Резьба, нарезанная с двух концов, позволяет испытывать один образец дважды при условии замены гайки, что приводит к увеличению количества экспериментов и уменьшению затрат.

В процессе эксперимента при нормальной температуре (T = 20 °С) один из концов шпильки завинчивали в гайку (рис. 3). Соединение доводили до разрушения сжатием путем установки гайки на втулку и перемещением активного захвата испытательной машины. Значение



Рис. 2. Внешний вид образцов шпилек

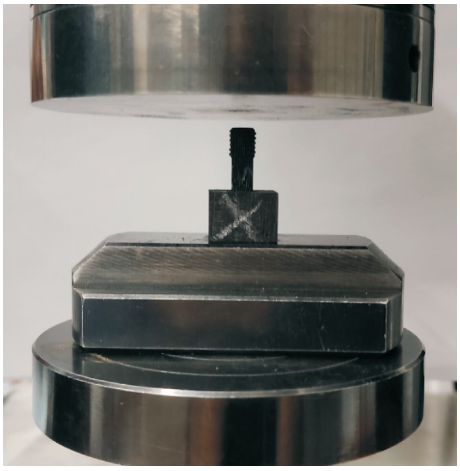


Рис. 3. Фрагмент эксперимента при нормальной температуре

разрушающей силы фиксировали силоизмерительным датчиком испытательной машины.

При высокотемпературных испытаниях после установки образца на втулку резьбовое соединение нагревали графитовыми нагревателями до требуемой температуры. Измерения температуры выполняли пирометром, который фиксировал ее значение на границе шпильки и гайки одновременно (см. рис. 1). Для установления стационарного температурного поля в камере образец выдерживали в течение 5 мин, что гарантировало прогрев витков шпильки и гайки.

Для исследования каждой из трех температурных точек (20, 1900 и 2200 °С) использовали не менее пяти образцов. Резьбовое соединение имело не менее пяти рабочих витков, предварительная затяжка отсутствовала, усилие в резьбе имитировалось внешним осевым усилием сжатия $F_{сж}$, создаваемым испытательной машиной. Длину резьбовых участков выбирали так, чтобы витки резьбы можно было прогреть до требуемой температуры при высокотемпературном эксперименте [17].

Исследование предела прочности материала на срез. Для УУКМ разного типа опытные значения предела прочности материала на срез существенно различаются, а для УУКМ на основе ИПК и ПУ эти данные в открытой литературе отсутствуют. Кроме того, в ранее исследованных УУКМ при уменьшении площади среза наблюдался масштабный эффект, заключавшийся в снижении прочности материала вследствие уменьшения его объемных размеров. Поэтому для экспериментального исследования влияния размеров витков (объема материала)

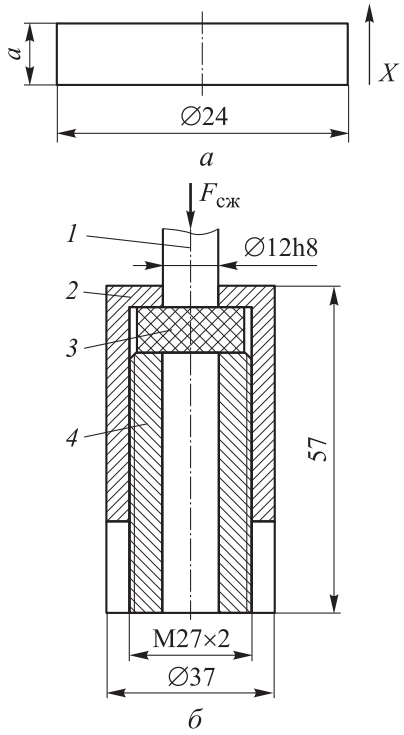


Рис. 4. Схемы образца (*а*) и его испытания на срез (*б*): *1* — пуансон; *2* — гайка; *3* — образец; *4* — резьбовая втулка

на предел прочности при срезе непосредственно в плоскостях (*YZ* и *ZY*) среза резьб изготовили несколько образцов (рис. 4, *а*).

Для эксперимента выбраны шесть толщин образцов a = 1, 2, 3, 4, 5 и 10 мм, имитирующих шаг резьбы. Максимальная толщина a ограничена 10 мм, так как предполагалось, что при большем значении достигается представительный объем материала [27, 28], и масштабный эффект отсутствует. Для каждого значения толщины изготавливали не менее шести образцов.

Схема испытания образца на срез приведена на рис. 4, *б*. Исследования имитировали срез витков на шпильке при нормальной температуре. Образцы выполняли из той же заготовки, из которой вырезали резьбовые пары шпилька — гайка.

Результаты экспериментов. ***Результаты экспериментального исследования несущей способности резьбы.*** Результаты экспериментального исследования несущей способности резьбы из УУКМ на основе ИПК и ПУ при осевом нагружении приведены в табл. 1, где $\overline{F}_{экс}$ — среднее значение разрушающей силы, полученной в ходе эксперимента; ДИ — доверительный

Таблица 1

Результаты экспериментального исследования несущей способности резьбы из УУКМ на основе ИПК и ПУ

Количество образцов, шт.	Температура T, °С	$\overline{F}_{экс}$ ±ДИ, Н	$\overline{F}_{пц}$ ±ДИ, Н
16	20	3388 ± 275	2640 ± 230
5	1900	6707 ± 691	5672 ± 714
5	2200	5973 ± 847	3162 ± 610

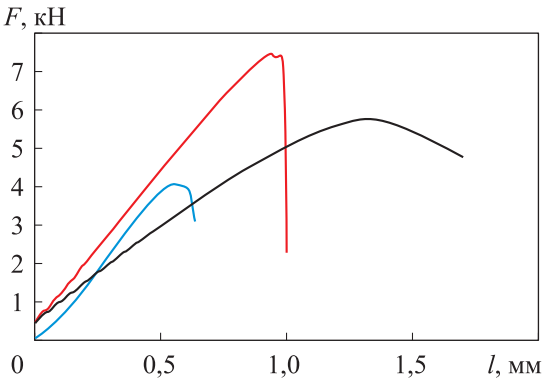


Рис. 5. Типовые диаграммы деформирования при температуре испытаний T = 20 (——), 1900 (——) и 2200 °С (——)

интервал для вероятности 95 %; $\overline{F}_{пц}$ — среднее значение силы пропорциональности.

Как и работе [18], проведен анализ диаграмм деформирования в координатах, полученных при эксперименте для определения силы пропорциональности $F_{пц}$, при достижении которой перестает быть линейной зависимость между напряжением и деформацией, и соединение неспособно возвращаться в исходное состояние после снятия нагрузки.

Типовые диаграммы деформирования приведены на рис. 5, где l — перемещение подвижной траверсы испытательной машины. Видно, что при T = 20 и 2200 °С характер разрушения резьбового соединения соответствует вязкому разрушению, а при T = 1900 °С он ближе к хрупкому. Это согласуется с данными табл. 1, где минимальное расхождение между разрушающей силой, полученной в эксперименте $F_{экс}$, и силой пропорциональности $F_{пц}$ наблюдается при температуре 1900 °С и составляет 15 %, а при T = 20 и 2200 °С — 22 и 47 % соответственно. Причем при T = 1900 и 2200 °С $F_{пц}$ сила пропорциональности больше (примерно на 115 и 20 % соответственно), чем при T = 20 °С. Это, предположительно, связано с ростом прочностных характеристик материала.

Результаты экспериментального исследования предела прочности материала на срез. Результаты этого исследования приведены в табл. 2, где $\overline{\tau}_{ср}$ — среднее значение предела прочности.

Зависимости предела прочности образца на срез $\tau_{ср}$ от его толщины a приведены на рис. 6. Здесь синими маркерами обозначены значения предела прочности при срезе $\tau_{ср}$, полученные в ходе эксперимента, красными маркерами — средние значения предела прочности на срез $\overline{\tau}_{ср}$ для разной толщины образца a с указанными ДИ, а красной линией — результаты аппроксимации по среднему значению предела прочности при срезе, выполненной методом наименьших квадратов. Зависимость среднего предела прочности при срезе $\overline{\tau}_{ср}$ от толщины образца a можно аппроксимировать выражением

$$\overline{\tau}_{ср} = 6{,}6\ln a + 26.$$

Анализ результатов эксперимента указывает на наличие монотонно возрастающей зависимости предела прочности при срезе $\overline{\tau}_{ср}$ от толщины материала a. Типовые диаграммы деформирования, полученные в ходе эксперимента, приведены на рис. 7.

По диаграммам деформирования определен предел пропорциональности напряжений сре-

Таблица 2

Результаты экспериментального исследования предела прочности УУКМ на срез

a, мм	$\overline{\tau}_{ср}$ ±ДИ, МПа	a, мм	$\overline{\tau}_{ср}$ ±ДИ, МПа
10	39,1 ± 5,2	3	31,6 ± 3,5
5	38,9 ± 6,8	2	33,9 ± 3,8
4	34,2 ± 1,5	1	22,8 ± 6,0

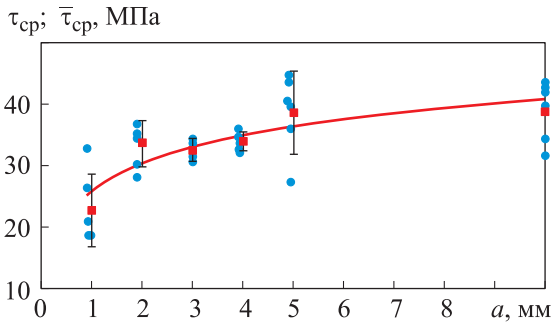


Рис. 6. Результаты исследования влияния толщины испытуемого УУКМ на предел прочности при срезе: ● — экспериментальная зависимость $\tau_{ср} = f(a)$; ■ и —— — экспериментальная и аппроксимирующая зависимости $\overline{\tau}_{ср} = f(a)$

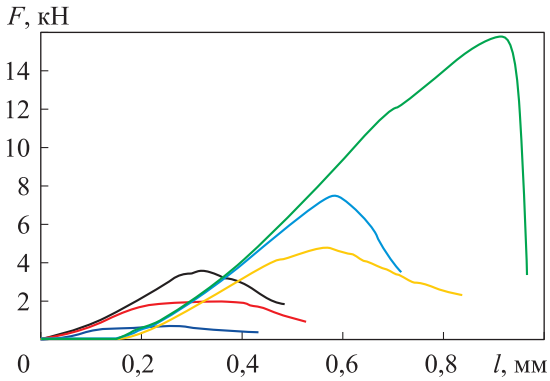


Рис. 7. Типовые диаграммы деформирования образцов толщиной a = 1 ( ), 2 ( ), 3 ( ), 4 ( ), 5 ( ) и 10 мм ( )

за $\tau_{пц}$, средние значения которого при разной толщине образца приведены в табл. 3 и на рис. 8. Синими маркерами обозначены экспериментальные значения предела пропорциональности напряжений среза $\tau_{пц}$, оранжевыми точками — средние значения предела пропорциональности напряжений среза $\overline{\tau}_{пц}$ для разной толщины a с указанными ДИ, а зеленой штриховой линией — результаты аппроксимации по средним значениям предела пропорциональности напряжений среза $\overline{\tau}_{пц}$, выполненной методом наименьших квадратов.

Таблица 3

Результаты обработки диаграмм деформирования

a, мм	$\overline{\tau}_{пц} \pm$ ДИ, МПа	a, мм	$\overline{\tau}_{пц} \pm$ ДИ, МПа
10	31,8 ± 4,8	3	26,4 ± 5,1
5	34,6 ± 6,2	2	20,4 ± 4,5
4	28,3 ± 3,9	1	12,7 ± 3,4

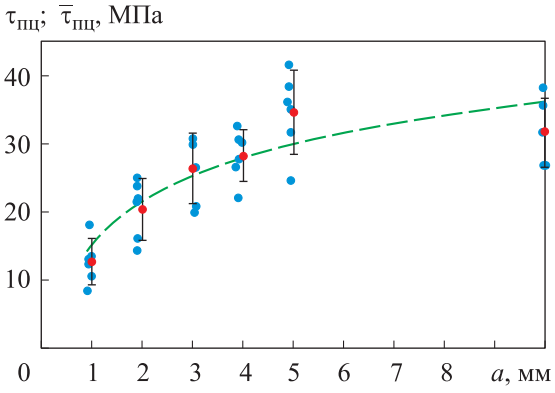


Рис. 8. Результаты исследования влияния толщины испытуемого УУКМ на предел пропорциональности напряжений среза:
• — экспериментальная зависимость $\tau_{пц} = f(a)$;
• и — — экспериментальная и аппроксимирующая зависимости $\overline{\tau}_{пц} = f(a)$

Зависимость среднего значения предела пропорциональности напряжений среза от толщины образца a можно аппроксимировать выражением

$$\overline{\tau}_{пц} = 9{,}1 \ln a + 15. \qquad (2)$$

Из приведенных данных видно, что граница наблюдаемого масштабного эффекта приблизительно соответствует толщине образцов a = = 5 мм.

Исходя из полученных данных, для УУКМ на основе ИПК и ПУ предлагается принять за допускаемые напряжения среза в формуле (1) средние значения предела пропорциональности напряжений среза $\overline{\tau}_{пц}$.

Тогда для резьбы М8 с шагом P = 1,25 мм по формуле (2) получаем допускаемые напряжения среза в витке резьбы

$$[\tau_{ср}] = \overline{\tau}_{пц} \approx 17 \text{ МПа},$$

а по формуле (1) — разрушающую нагрузку резьбовой пары из УУКМ на основе ИПК и ПУ

$$F_{раз} \geq \frac{\pi d_1 k_1 P [\tau_{ср}]}{\eta} = 1206 \text{ Н}.$$

Найденное значение разрушающей нагрузки находится ниже действительной прочности резьбы из УУКМ на основе ИПК и ПУ, полученной при экспериментальном исследовании. Это показывает, что по формуле (1) можно оценить нижнюю границу несущей способности резьбовой пары из УУКМ на основе ИПК с ПУ, однако она требует уточнения в зоне распределения нагрузки по виткам резьбы.

Выводы

1. Анализ результатов экспериментального исследования несущей способности резьбы УУКМ на основе ИПК и ПУ выявил ее увеличение при повышении температуры рабочей среды резьбового соединения до 2200 °С. В диапазоне температуры 1900…2200 °С прочность резьбового соединения снижается. Полученные данные соответствуют поведению резьбы из УУКМ и материала в целом при высоких температурах.

2. Анализ результатов экспериментального исследования прочности материала на срез при различных толщинах образцов подтвердил наличие масштабного эффекта. Наличие масштабного эффекта приводит к плавному снижению прочности УУКМ на основе ИПК и ПУ

на малых объемах материала до 60 % относительно представительного объема, что значительно больше, чем у пространственно-армированных УУКМ.

3. По диаграммам деформирования прочности материала на срез определены допускаемые напряжения, за которые был принят средний предел пропорциональности напряжений среза. Показано, что формула для определения разрушающей нагрузки, полученная в работе [16], позволяет оценить нижнюю границу несущей способности резьбы из УУКМ на основе ИПК и ПУ, хотя и требует уточнения в зоне распределения нагрузки по виткам резьбы.

Литература

[1] Ozel A., Yazici B., Akpinar S. et al. A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends. *Compos. B Eng*., 2014, vol. 62, pp. 167–174, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.001

[2] Kim K.S., Yoo J.S., Yi Y.M. et al. Failure mode and strength of unidirectional composite single lap bonded joints with different bonding methods. *Compos. Struct*., 2006, vol. 72, no. 4, pp. 477–485, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.01.023

[3] Turan K., Pekbey Y. Progressive failure analysis of reinforced-adhesively single-lap joint. *J. Adhes*., 2015, vol. 91, no. 12, pp. 962–977, doi: https://doi.org/10.1080/00218464.2014.985379

[4] Da Silva L.F.M., Adams R.D. Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives. *Int. J. Adhes. Adhes*., 2007, vol. 27, no. 3, pp. 216–226, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2006.04.002

[5] Guilpin A., Franciere G., Barton L. et al. A numerical and experimental study of adhesively-bonded polyethylene pipelines. *Polymers*, 2019, vol. 11, no. 9, art. 1531, doi: https://doi.org/10.3390/polym11091531

[6] Anasiewicz K., Kuczmaszewski J. Adhesive joint stiffness in the aspect of FEM modelling. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 23, art. 3911, doi: https://doi.org/10.3390/ma12233911

[7] 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, doi: https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.008

[8] McCarthy C.T., McCarthy M.A., Lawlor V.P. Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt–hole clearances. *Compos. B Eng*., 2005, vol. 36, no. 4, pp. 290–305, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.11.003

[9] Egan B., McCarthy C.T., McCarthy M.A. et al. Stress analysis of single-bolt, single-lap, countersunk composite joints with variable bolt-hole clearance. *Compos. Struct*., 2012, vol. 94, no. 3, pp. 1038–1051, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.10.004

[10] 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, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.029

[11] Mei H., Cheng L., Ke Q. et al. High-temperature tensile properties and oxidation behavior of carbon fiber reinforced silicon carbide bolts in a simulated re-entry environment. *Carbon*, 2010, vol. 48, no. 11, pp. 3007–3013, doi: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.056

[12] Li S., Chen X., Chen Z. The effect of high temperature heat-treatment on the strength of C/C to C/C–SiC joints. *Carbon*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 3042–3049, doi: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.04.030

[13] Guan Z., Mu J., Su F. et al. Pull-through mechanical behavior of composite fastener threads. *Materials*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 251–267, doi: https://doi.org/10.1007/s10443-014-9404-5

[14] Bruneton E., Narcy B., Oberlin A. Carbon-carbon composites prepared by a rapid densification process I: Synthesis and physico-chemical data. *Carbon*, 1997, vol. 35, no. 10–11, pp. 1593–1598, doi: https://doi.org/10.1016/S0008-6223(97)00118-8

[15] Захаров М.Н., Любченко М.А. Исследование предельных нагрузок для резьбовых соединений деталей из углерод-углеродных композиционных материалов. *Конструкции из композиционных материалов*, 2017, № 4, с. 82–87.

[16] Захаров М.Н., Любченко М.А., Магнитский И.В. Критерий разрушения резьбовых соединений деталей из композитных материалов. *Вестник машиностроения*, 2018, № 12, с. 3–6.

[17] Захаров М.Н., Любченко М.А., Магнитский И.В. Несущая способность резьбовой пары из пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов при высоких температурах. *Вестник машиностроения*, 2021, № 6, с. 30–34.
[18] Любченко М.А., Магнитский И.В., Тащилов С.В. и др. Масштабные эффекты в резьбовых деталях из пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 9, с. 14–22, doi: http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2023-9-14-22
[19] Lim D.W., Kim T.H., Choi J.H. et al. A study of the strength of carbon–carbon brake disks for automotive applications. *Compos. Struct.*, 2008, vol. 86, no. 1–3, pp. 101–106, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.017
[20] Li K.Z., Shen X.T., Li H.J. et al. Ablation of the carbon/carbon composite nozzle-throats in a small solid rocket motor. *Carbon*, 2011, vol. 49, no. 4, pp. 1208–1215, doi: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.11.037
[21] Christin F. Design, fabrication, and application of thermostructural composites (TSC) like C/C, C/SiC, and SiC/SiC composites. *Adv. Eng. Mater*., 2002, vol. 4, no. 21, pp. 903–912, doi: https://doi.org/10.1002/adem.200290001
[22] Windhorst T., Blount G. Carbon-carbon composites: a summary of recent developments and applications. *Mater. Des*., 1997, vol. 18, no. 1, pp. 11–15, doi: https://doi.org/10.1016/S0261-3069(97)00024-1
[23] Kumar S., Kushwaha J., Mondal S. et al. Fabrication and ablation testing of 4D C/C composite at 10MW/m2 heat flux under a plasma arc heater. *Mater. Sci. Eng. A*, 2013, vol. 566, pp. 102–111, doi: https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.059
[24] Магнитская М.В., Магнитский И.В., Тащилов С.В. и др. Влияние высокотемпературной обработки на механические характеристики углерод-углеродных композиционных материалов на основе пироуглеродной матрицы. *Вестник ПНИПУ. Механика*, 2022, № 4, с. 5–12, doi: https://doi.org/10.15593/perm.mech/2022.4.01
[25] МВИ № 02262-11-2008. *Установка УВТК для механических испытаний материалов*. Методика выполнения измерений при определении прочностных, упругих и деформационных свойств неметаллов при одноосных нагружениях в интервале Т (20–2700) °С (изм. 2016 г.). 40 с.
[26] Магнитский И.В., Пономарев К.А., Мирониxин А.Н. и др. Доработка и настройка установки для механических испытаний композиционных материалов при высоких температурах. *Мат. XIX науч.-тех. конф. молодых ученных и специалистов*. Королев, РКК Энергия, 2012, с. 231–235.
[27] Магнитский И.В., Пономарев К.А., Мирониxин А.Н. и др. К вопросу о численном моделировании упругих свойств композиционных материалов с учетом схемы армирования. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 8, doi: http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-8-455
[28] Магнитский И.В. Структурный критерий прочности пространственно армированных углерод-углеродных композиционных материалов. *Вестник ПНИПУ. Механика*, 2020, № 3, с. 48–59, doi: https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.3.06

References

[1] Ozel A., Yazici B., Akpinar S. et al. A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends. *Compos. B Eng*., 2014, vol. 62, pp. 167–174, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.001
[2] Kim K.S., Yoo J.S., Yi Y.M. et al. Failure mode and strength of unidirectional composite single lap bonded joints with different bonding methods. *Compos. Struct*., 2006, vol. 72, no. 4, pp. 477–485, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.01.023
[3] Turan K., Pekbey Y. Progressive failure analysis of reinforced-adhesively single-lap joint. *J. Adhes*., 2015, vol. 91, no. 12, pp. 962–977, doi: https://doi.org/10.1080/00218464.2014.985379
[4] Da Silva L.F.M., Adams R.D. Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives. *Int. J. Adhes. Adhes*., 2007, vol. 27, no. 3, pp. 216–226, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2006.04.002

[5] Guilpin A., Franciere G., Barton L. et al. A numerical and experimental study of adhesively-bonded polyethylene pipelines. *Polymers*, 2019, vol. 11, no. 9, art. 1531, doi: https://doi.org/10.3390/polym11091531

[6] Anasiewicz K., Kuczmaszewski J. Adhesive joint stiffness in the aspect of FEM modelling. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 23, art. 3911, doi: https://doi.org/10.3390/ma12233911

[7] 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, doi: https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.008

[8] McCarthy C.T., McCarthy M.A., Lawlor V.P. Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt–hole clearances. *Compos. B Eng*., 2005, vol. 36, no. 4, pp. 290–305, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.11.003

[9] Egan B., McCarthy C.T., McCarthy M.A. et al. Stress analysis of single-bolt, single-lap, countersunk composite joints with variable bolt-hole clearance. *Compos. Struct*., 2012, vol. 94, no. 3, pp. 1038–1051, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.10.004

[10] 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, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.029

[11] Mei H., Cheng L., Ke Q. et al. High-temperature tensile properties and oxidation behavior of carbon fiber reinforced silicon carbide bolts in a simulated re-entry environment. *Carbon*, 2010, vol. 48, no. 11, pp. 3007–3013, doi: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.056

[12] Li S., Chen X., Chen Z. The effect of high temperature heat-treatment on the strength of C/C to C/C–SiC joints. *Carbon*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 3042–3049, doi: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.04.030

[13] Guan Z., Mu J., Su F. et al. Pull-through mechanical behavior of composite fastener threads. *Materials*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 251–267, doi: https://doi.org/10.1007/s10443-014-9404-5

[14] Bruneton E., Narcy B., Oberlin A. Carbon-carbon composites prepared by a rapid densification process I: Synthesis and physico-chemical data. *Carbon*, 1997, vol. 35, no. 10–11, pp. 1593–1598, doi: https://doi.org/10.1016/S0008-6223(97)00118-8

[15] Zakharov M.N., Lyubchenko M.A. Analysis of ultimate loads on the screw joints to be used in articles made of carbon-carbon composites. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov* [Composite Materials Constructions], 2017, no. 4, pp. 82–87. (In Russ.).

[16] Zakharov M.N., Lyubchenko M.A., Magnitskiy I.V. Fracture criterion of threaded joints of parts from composite materials. *Vestnik mashinostroeniya*, 2018, no. 12, pp. 3–6. (In Russ.).

[17] Zakharov M.N., Lyubchenko M.A., Magnitskiy I.V. Bearing capacity of a threaded pair made of spatially reinforced carbon-carbon composite materials at high temperatures. *Vestnik mashinostroeniya*, 2021, no. 6, pp. 30–34. (In Russ.).

[18] Lyubchenko M.A., Magnitskiy I.V., Tashchilov S.V. et al. Scaling effects in the threaded pieces made of the spatially reinforced carbon-carbon composite materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 9, pp. 14–22, doi: http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2023-9-14-22 (in Russ.).

[19] Lim D.W., Kim T.H., Choi J.H. et al. A study of the strength of carbon–carbon brake disks for automotive applications. *Compos. Struct*., 2008, vol. 86, no. 1–3, pp. 101–106, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.017

[20] Li K.Z., Shen X.T., Li H.J. et al. Ablation of the carbon/carbon composite nozzle-throats in a small solid rocket motor. *Carbon*, 2011, vol. 49, no. 4, pp. 1208–1215, doi: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.11.037

[21] Christin F. Design, fabrication, and application of thermostructural composites (TSC) like C/C, C/SiC, and SiC/SiC composites. *Adv. Eng. Mater*., 2002, vol. 4, no. 21, pp. 903–912, doi: https://doi.org/10.1002/adem.200290001

[22] Windhorst T., Blount G. Carbon-carbon composites: a summary of recent developments and applications. *Mater. Des*., 1997, vol. 18, no. 1, pp. 11–15, doi: https://doi.org/10.1016/S0261-3069(97)00024-1

[23] Kumar S., Kushwaha J., Mondal S. et al. Fabrication and ablation testing of 4D C/C composite at 10MW/m2 heat flux under a plasma arc heater. *Mater. Sci. Eng. A*, 2013, vol. 566, pp. 102–111, doi: https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.059

[24] Magnitskaya M.V., Magnitskiy I.V., Tashchilov S.V. et al. Influence of high temperature treatment on the mechanical characteristics of carbon-carbon composite materials with pyrocarbon matrix. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin], 2022, no. 4, pp. 5–12, doi: https://doi.org/10.15593/perm.mech/2022.4.01 (in Russ.).
[25] MVI no.02262-11-2008. *Ustanovka UVTK dlya mekhanicheskikh ispytaniy materialov. Metodika vypolneniya izmereniy pri opredelenii prochnostnykh, uprugikh i deformatsionnykh svoystv nemetallov pri odnoosnykh nagruzheniyakh v intervale T (20–2700) °S (izm. 2016 g.)* [MVI No. 02262-11-2008. UVTK plant for mechanical testing of materials. Methodology for performing measurements to determine strength, elastic, and deformation properties of non-metals under uniaxial loading in the temperature range of (20–2700) °C (revised 2016).]. 40 p. (In Russ.).
[26] Magnitskiy I.V., Ponomarev K.A., Mironikhin A.N. et al. [Refinement and adjustment of a setup for mechanical testing of composite materials at high temperatures]. *Mat. XIX nauch.-tekh. konf. molodykh uchennykh i spetsialistov* [Proc. XIX Sci.-Tech. Conf. of Young Scientists and Specialists]. Korolev, RKK Energiya Publ., 2012, pp. 231–235. (In Russ.).
[27] Magnitskiy I.V., Ponomarev K.A., Mironikhin A.N. et al. To the question on numerical simulation of elastic properties of composites with consideration for their reinforcement schemes. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 8, doi: http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-8-455 (in Russ.).
[28] Magnitskiy I.V. Structural failure criterion for spatially-reinforced carbon-carbon composite materials. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin], 2020, no. 3, pp. 48–59, doi: https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.3.06 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 20.12.2025

Информация об авторах

ЛЮБЧЕНКО Михаил Алексеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ma.ljubchenko@yandex.ru).

МАГНИТСКАЯ Мария Владимировна — кандидат технических наук, начальник сектора. АО «Композит» (141070, Королёв, Московская область, Российская Федерация, Пионерская ул., д. 4, e-mail: masshka1@gmail.com).

МАГНИТСКИЙ Илья Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: soleylju@gmail.com).

ЦВЕТКОВ Дмитрий Алексеевич — инженер первой категории. АО «Композит» (141070, Королёв, Российская Федерация, Пионерская ул., д. 4, e-mail: d.c.komp@mail.ru).

Information about the authors

LYUBCHENKO Mikhail Alekseevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Machine Design Principles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ma.ljubchenko@yandex.ru).

MAGNITSKAIA Maria Vladimirovna — Candidate of Science (Eng.), Head of the Section. Kompozit JSC (141070, Korolev, Russian Federation, Pionerskaya St., Bldg. 4, e-mail: masshka1@gmail.com).

MAGNITSKY Ilya Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Machine Design Principles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: soleylju@gmail.com).

TSVETKOV Dmitriy Alekseevich — Engineer of the 1st Category. Kompozit JSC (141070, Korolev, Russian Federation, Pionerskaya St., Bldg. 4, e-mail: d.c.komp@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:
Любченко М.А., Магнитская М.В., Магнитский И.В., Цветков Д.А. Оценка несущей способности резьбовой пары из углерод-углеродных композиционных материалов на основе иглопробивного каркаса и пироуглеродной матрицы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 11, с. 31–40.

Please cite this article in English as:
Lyubchenko M.A., Magnitskaya M.V., Magnitsky I.V., Tsvetkov D.A. Estimation of the bearing capacity of a threaded pair made of needle-punched frame/pyrocarbon matrix-based carbon-carbon composite materials. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 11, pp. 31–40.