

# Машиностроение и машиноведение

УДК 621.882.29

doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-14-22

## Масштабные эффекты в резьбовых деталях из пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов

М.А. Любченко<sup>1</sup>, И.В. Магнитский<sup>1</sup>, С.В. Тащилов<sup>2</sup>, А.Л. Чжан<sup>2</sup><sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана<sup>2</sup> АО «Композит»

## Scaling effects in the threaded pieces made of the spatially reinforced carbon-carbon composite materials

M.A. Lyubchenko<sup>1</sup>, I.V. Magnitsky<sup>1</sup>, S.V. Tashchilov<sup>2</sup>, A.L. Zhang<sup>2</sup><sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University<sup>2</sup> Kompozit JSC

Приведены результаты исследования влияния масштабных эффектов прочности и жесткости в современных пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалах на несущую способность выполненных из них изделий. Эти материалы широко применяют в технике, работающей в экстремальных условиях одновременного нагружения силовыми и температурными факторами. При проектировании таких изделий необходимо знать степень влияния поврежденного при механической обработке каркаса на наблюдаемые свойства используемого материала, в том числе на размеры, при которых необходимо учитывать уменьшение прочности и жесткости, и величину, на которую возможно снижение рассматриваемых свойств.

**Ключевые слова:** углерод-углеродные композиционные материалы, масштабные эффекты, резьбовое соединение, касательные напряжения

The paper presents results of studying the impact of the strength and stiffness scaling effects in modern spatially reinforced carbon-carbon composite materials on bearing capacity of the products made from them. These materials are widely used in equipment operating under extreme conditions of simultaneous loading with force and temperature factors. When designing such products, it becomes necessary to understand the influence degree of the frame damaged during machining on observed properties of the material used, including dimensions, at which it is required to consider reduction in strength and stiffness, as well as the value, which could reduce the considered properties.

**Keywords:** carbon-carbon composite materials, scaling effects, threaded joints, shear stresses

В современной технике, применяемой в различных отраслях промышленности, включая энергетическую и химическую, все большее распространение получают углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), обеспечивающие работу конструкций в условиях высоких температур (до 2500 °С) при наличии агрессивных сред, радиации и других подобных воздействий. Расширение сферы использования УУКМ приводит к необходимости разработки методов расчета типовых элементов конструкций из них.

Однако изменение внутренней укладки армирующего элемента напрямую влияет на получаемые свойства УУКМ и конструкцию в целом. Кроме того, повреждение структуры армирования или изменение адгезии между матрицей и арматурой может как повысить, так и снизить прочностные и упругие характеристики УУКМ. Поэтому целесообразно оценить влияние масштабного эффекта (МЭ) и на механические свойства УУКМ.

При этом наиболее актуальными становятся прочностные расчеты крепежных элементов, прежде всего резьбовых, выполненных из таких материалов.

Прочность резьбовых соединений (РС), как правило, исследуют расчетно-экспериментальным методом [1–6], выполняя численные расчеты с верификацией их результатов в ходе испытаний реальных конструкций.

Основная проблема проектирования РС связана с малыми относительно масштаба структурной неоднородности УУКМ размерами рабочего элемента резьбы — витка [1]. При этом наблюдаются существенные МЭ жесткости и прочности [7]. Кроме того, обычно УУКМ даже с пространственными схемами армирования [8], часто применяемыми в деталях РС, имеют значительную анизотропию свойств, особенно прочностных [9], что существенно усложняет расчетные схемы.

Влияние МЭ на прочность материала применительно к РС исследовано в работе [10]. Установлено, что из-за подреза армирующего элемента (стержней материала) прочность витков резьбы снижается до 25 %. Однако следует отметить, что исследование прочности материала на срез проводилось для конкретного выделенного направления, что не совсем корректно для оценки снижения прочности материала при исследовании конкретной плоскости с явной анизотропией материала

в направлениях, образующих нагруженную плоскость. Однозначного объединения напряжений, полученных для разных направлений вырезки, нет.

Описанные проблемы приводят к необходимости обеспечения расчетов РС из УУКМ набором специфических исходных данных, которые должны учитывать наличие анизотропии и МЭ характеристик материала. Очевидно, что конкретный набор исходных данных полностью зависит от особенностей моделей, применяемых при расчете конструкции.

Рассмотрим метод расчета РС, предложенный в работе [10], выбор которого обусловлен сравнительной простотой модели и отсутствием в ее составе численных расчетов, выполняемых с помощью метода конечных элементов (МКЭ) или его аналогов.

Расчет РС сводится к определению силы, при которой происходит срез витков, по формуле

$$F_{\text{раз}} = \frac{S\tau_{\text{ср}}}{k\eta}, \text{ Н,}$$

где  $S$  — площадь среза первого витка,  $S = \pi d_3 H$  ( $d_3$  — внутренний диаметр резьбы, мм;  $H$  — высота среза витка, мм), мм<sup>2</sup>;  $\tau_{\text{ср}}$  — предел прочности материала при срезе, МПа;  $k$  — коэффициент неравномерности восприятия нагрузки витком;  $\eta$  — доля нагрузки, воспринимаемая первым витком, %.

К важнейшим предположениям, на которых основан этот метод, можно отнести допущения об отсутствии МЭ жесткости и прочности при срезе резьбы как основном характере разрушения РС, а также о линейном законе деформирования деталей при растяжении и срезе.

Цель работы — проверка указанных допущений и определение подходов к формированию исходных данных.

**Объект исследования.** Рассмотрен современный пространственно-армированный УУКМ Арголон-4ДЛ производства АО «Комполит». Примененная в этом материале схема армирования 4ДЛ имеет четыре направления, три из которых, обозначенных  $X$ , направлены под углами 120° друг к другу, лежат в параллельных плоскостях и эквивалентны друг другу, а четвертое,  $Z$ , перпендикулярно им. Кроме того, можно выделить направление  $Y$ , дополняющее систему координат  $XYZ$  до правой.

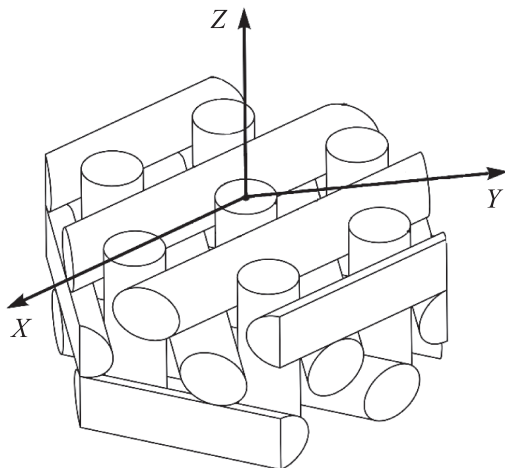


Рис. 1. Схема армирования 4ДЛ пространственно-армированного УУКМ

Описанная схема армирования показана на рис. 1. Характерный размер поперечного сечения армирующего элемента составляет около 0,7 мм.

**Методы исследования.** Для исследования МЭ жесткости при срезе витков резьбы использован численный подход, основанный на моделировании конструктивно-подобного элемента витка с помощью МКЭ в программном комплексе ANSYS. Такой выбор сделан ввиду низкой точности и высокой сложности экспериментального определения модулей сдвига на малогабаритных образцах из УУКМ.

УУКМ представляли совокупностью армирующих элементов и матрицы, объединенных в массив структурных ячеек. Матрицу принимали изотропной, армирующие элементы — трансверсально изотропными с упругими характеристиками [11], а контакт между стержнями и матрицей — идеальным.

Из массива материала вырезали элементы витков резьбы в форме треугольных призм. Основания призм представляли собой равно-сторонние треугольники со стороной 3 мм, что соответствует крупному шагу метрической резьбы М27.

Однако следует отметить, что в работе [12] показана необходимость увеличения стандартного шага метрической резьбы, выполненной из УУКМ. На вырезанных элементах строилась нерегулярная сетка из элементов Solid187. Средний характерный размер элементов, принятый по результатам пробных расчетов, составлял 0,07 мм.

Элементы витков резьбы в каждой из плоскостей ортотропии материала вырезали не менее чем с пятью различными случайными положениями относительно структуры материала, что позволило оценить разбросы соответствующих характеристик в зависимости от положения витков резьбы деталей в массиве заготовки УУКМ. Первая буква в условном обозначении направления вырезки — ось, совпадающая с осью вращения резьбовой пары, вторая — ось, вдоль которой выбрано направление вырезки.

На выделенных объемах задавали граничные условия, показанные на рис. 2. В одной из граней, перпендикулярных одной из осей, задавали перемещения в направлении этой оси, отмеченные красным цветом (А), в другой — опору без трения, выделенную синим цветом (В). В направлениях, нормальных выбранной оси, упомянутые грани оставались свободными.

Далее с помощью МКЭ получали значения касательных напряжений и упругих деформаций. Упругие свойства интегрировали по объему и усредняли по формулам

$$\bar{\tau} = \frac{\sum \tau_i V_i}{\sum V_i}; \quad \bar{\gamma} = \frac{\sum \gamma_i V_i}{\sum V_i},$$

где  $\bar{\tau}$  и  $\bar{\gamma}$  — касательное напряжение и упругая деформация в рассматриваемой модели соответственно;  $\tau_i$  и  $\gamma_i$  — средние напряжения и деформации в  $i$ -м элементе;  $V_i$  — объем  $i$ -го элемента, которой соответствует  $i$ -е значение деформации.

Средние по элементу напряжения и упругие деформации вычисляли средствами программ-

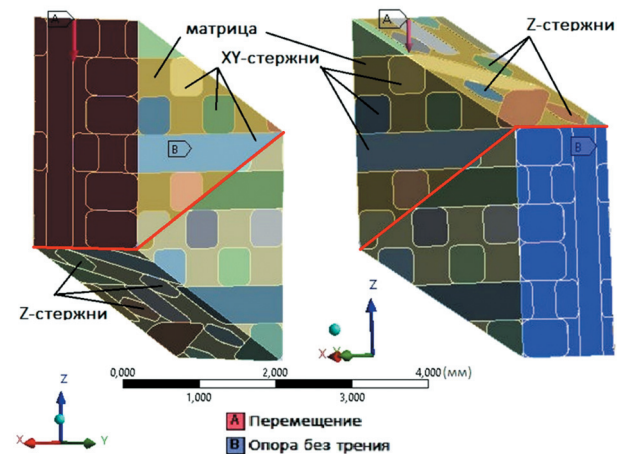


Рис. 2. Численная модель с указанием граничных условий

ного комплекса ANSYS. Модуль сдвига для каждой плоскости ортотропии материала определяли по формуле

$$G = \bar{\tau} / \bar{\gamma}.$$

При этом учитывали, что коэффициенты Ченцова пренебрежимо малы [13].

Для проверки наличия МЭ прочности и линейности диаграмм деформирования при срезе использовали экспериментальный метод исследования, так как численные эксперименты, связанные с определением особенностей заупругого поведения пространственно-армированных УУКМ, на сегодняшний день недостаточно достоверны ввиду малой точности соответствующих моделей поведения материалов.

Для экспериментального исследования влияния МЭ, а значит, и объема нагружаемого материала, на прочность при срезе материала непосредственно в его плоскости использовали образцы, схема которых показана на рис. 3, а. Образцы вырезали так, чтобы их оси совпадали с направлениями X, Y или Z материала. Толщину образца варьировали от 1 до 10 мм в направлении вырезки.

На каждую точку по толщине изготавливали не менее шести образцов. Максимальную толщину образца выбирали из соображения, что его объем является представительным для материала [11, 14], т. е. объемом, при котором МЭ уже незначительны. Фактически при реализации поставленного эксперимента получали напряжения среза для нагружаемых плоскостей.

Схема испытания образца на срез приведена на рис. 3, б, где  $F_{сж}$  — сила сжатия. Диаметр цилиндрической поверхности среза  $d$  составлял 12 мм. В процессе нагружения образцов снималась диаграмма деформирования, что позволило проанализировать, насколько она линейна, и установить значение предела пропорциональности материала при срезе для каждой исследованной толщины образца.

Для каждой группы образцов (см. рис. 3, а), отсортированных по направлению вырезки и толщине на срез, определяли напряжения среза при достижении образцом предела пропорциональности, расчет которых проводили по формуле

$$\tau_{ср} = F / S_{обр},$$

где  $F$  — сила, соответствующая пределу пропорциональности, определенная по диаграмме деформирования как пик линейного участка

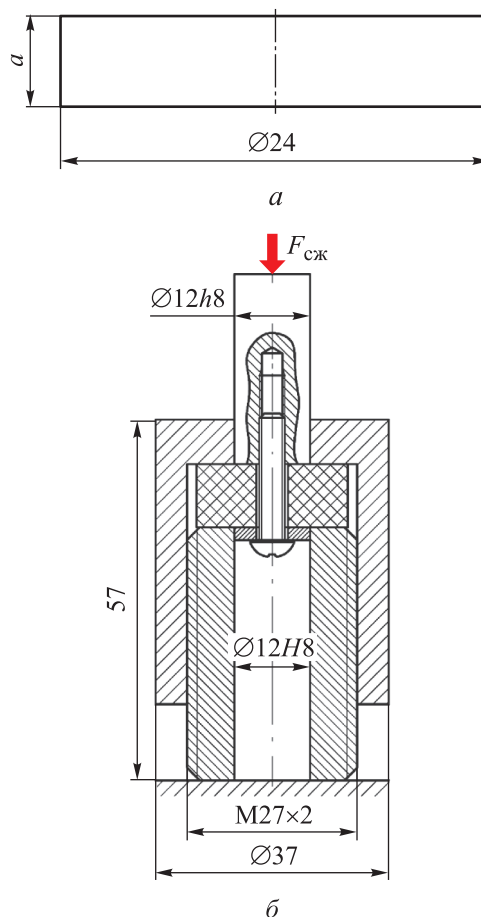


Рис. 3. Схемы образца (а) и его испытания на срез (б)

диаграммы,  $H$ ;  $S_{обр}$  — площадь среза испытуемого образца,  $S_{обр} = \pi da$ , мм<sup>2</sup>.

Для каждой группы образцов определяли математическое ожидание с доверительным интервалом для доверительной вероятности 95 %.

Линейность диаграммы деформирования УУКМ при растяжении изучали экспериментально на образцах материала в соответствии с ОСТ 92–1459 на количестве образцов, не меньшем шести. При растяжении МЭ не исследовали, так как размеры рабочей части стандартного образца сравнимы с характерными размерами стержней винтов, изготавливаемых из УУКМ рассматриваемого класса, и обеспечивают представительность объема материала.

**Результаты и обсуждение.** Результаты численного определения МЭ жесткости при срезе витков — значения модуля сдвига материала  $G$  в различных плоскостях приведены на рис. 4. Там же показаны значения этого параметра, полученные путем эксперимента на стандарт-

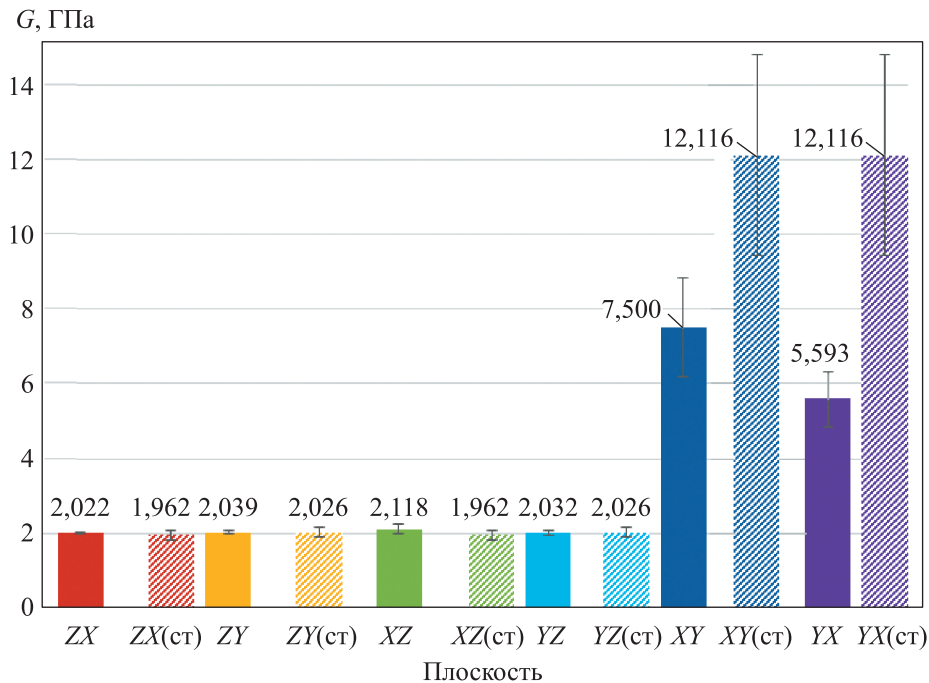


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные значения модуля сдвига материала при срезе витков в различных плоскостях

ных полноразмерных образцах, т. е. на размерах, при которых МЭ является незначительным. Для различия расчетных и экспериментальных данных для последних в обозначение плоскостей добавлена надпись «(ст)».

Согласно полученным результатам, материал в отношении сдвига трансверсально изотропен с осью изотропии, совпадающей с направлением  $Z$ , причем значимая разница между направлениями вырезки в пределах одной плоскости сдвига отсутствует. Соответствующий модуль сдвига составил около 2 ГПа.

Результаты моделирования и эксперимента на полноразмерных образцах для плоскостей  $ZX$ ,  $XZ$  и  $ZY$ ,  $YZ$  близки между собой и находятся в рамках доверительного интервала. Следовательно, можно сделать вывод об отсутствии влияния МЭ на упругие характеристики материала при срезе в этих плоскостях. Однако значения модуля сдвига материала  $G$ , полученные при численном расчете для плоскостей  $XY$  и  $YX$ , оказались соответственно в 1,6 и 2,2 раза меньше, чем измеренные значения  $G$  при экспериментах на полноразмерных образцах в этих плоскостях.

Кроме того, разница между модулями сдвига плоскостей  $XY$  и  $YX$  составляет 25 % в пользу плоскости  $XY$ , что свидетельствует о различном влиянии МЭ для разных направлений вырезки резьбы. Тогда как при экспериментальном ис-

следовании на полноразмерных образцах разница между указанными плоскостями не наблюдалась.

Результаты экспериментального исследования прочности материала на срез в зависимости от размеров образца приведены на рис. 5, где кривые аппроксимируют результаты по средним значениям.

Анализ результатов показывает наличие зависимости предела прочности материала при срезе от его размеров и демонстрирует монотонный рост предела прочности материала при срезе с увеличением размеров образцов.

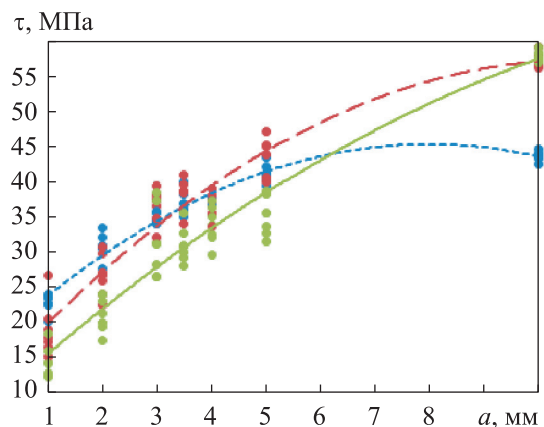


Рис. 5. Экспериментальные зависимости касательного напряжения  $\tau$  от толщины образца  $a$  в направлениях вырезки резьбы  $X$  (●),  $Y$  (●) и  $Z$  (●)



Следует отметить, что самыми прочными направлениями на срез в представительном объеме материала являются  $X$  и  $Y$ , где предел прочности равен 57 МПа. Для направления вырезки  $Z$  максимальный предел прочности при срезе на представительном объеме составил 44 МПа, т. е. стал меньше на 22 %.

Однако проявление МЭ прочности на срез сильнее выражено именно в наиболее прочных направлениях вырезки  $X$  и  $Y$ , и при снижении объемов материала до размеров ячейки она падает на 58 %, что в 2 раза больше, чем для направления  $Z$ , снижение прочности в котором составило 30 %.

Проведен анализ диаграмм деформирования в координатах, полученных при изучении влияния МЭ на предел прочности материала при срезе. Пример диаграммы деформирования при испытании на срез приведен на рис. 6.

Следует отметить, что зависимость силы  $F$  от деформации  $\delta$  монотонно возрастает и имеет два участка: линейный в зоне упругости ( $AB$ ) и нелинейный — заупругий участок ( $BC$ ). Точка  $B$  является точкой раздела двух участков и соответствует пределу пропорциональности материала. Для метизов традиционно при расчете прочности ориентируются на предел текучести материала, а так как площадки текучести у УУКМ не наблюдается, было принято решение проводить расчет на прочность РС из УУКМ по напряжениям, соответствующим концу линейного участка, т. е. пределу пропорциональности.

Результаты обработки диаграмм деформирования приведены на рис. 7, где кривые аппроксимируют результаты по средним значениям. Видно, что в основном граница наблю-

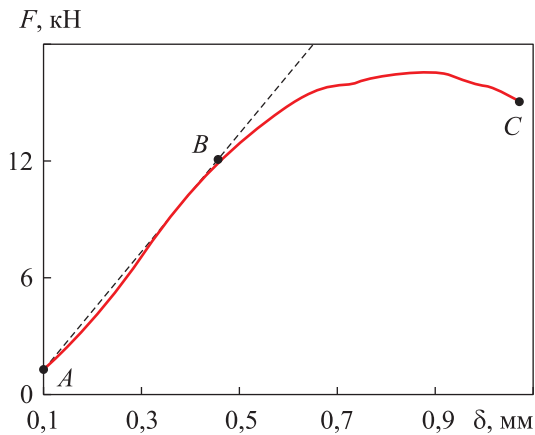


Рис. 6. Пример диаграммы деформирования при испытании на срез

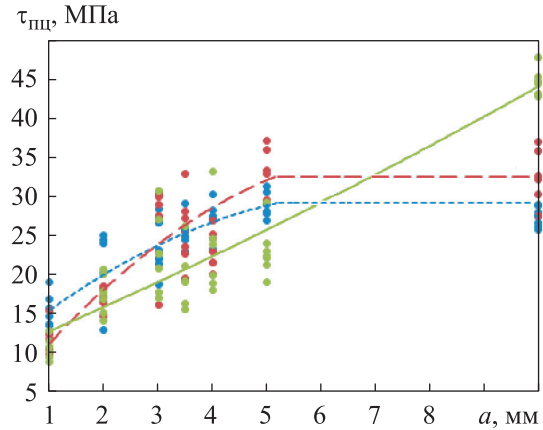


Рис. 7. Зависимости предела пропорциональности  $\tau_{пц}$  при срезе от толщины образцов  $a$  в направлениях вырезки резьбы  $X$  (•),  $Y$  (•) и  $Z$  (•)

даемого МЭ соответствует толщине образцов 5 мм. Исключение составляет направление вырезки  $Z$ , где монотонный рост продолжается до максимальной исследованной толщины 10 мм. Следовательно, при расчетах необходимо учитывать малую толщину срезаемых витков резьбы.

Диаграммы деформирования материала с высокой точностью линейны, предел пропорциональности совпадает с пределом прочности.

## Выводы

1. Полученные данные о влиянии МЭ на упругие и прочностные характеристики рассмотренного УУКМ указывают на необходимость их учета при проектировании изделий из такого материала.

2. Численная оценка влияния МЭ на упругие характеристики пространственно-армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ показала его отсутствие в плоскостях  $ZX$ ,  $XZ$ ,  $ZY$ ,  $YZ$ , а также снижение модуля сдвига в плоскостях  $XU$  и  $YU$  на малых объемах материала, составляющее 38 и 54 % соответственно, по сравнению с модулем сдвига, полученным на полно-размерных образцах в эксперименте.

3. Экспериментальное исследование влияния МЭ на прочностные характеристики пространственно-армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ в направлениях вырезки  $Z$ ,  $X$  и  $Y$  выявило снижение предела прочности при срезе на образцах малой толщины на 30 и 58 % соответственно относительно этого параметра для образцов толщиной 10 мм.

4. Для расчетов следует применять исходные данные, полученные для соответствующих размеров образцов, учитывающие нелинейность диаграмм деформирования. Эту особенность также можно учесть рациональным выбором значений коэффициентов безопасности.

## Литература

- [1] Guan Z., Mu J., Su F. et al. Pull-through mechanical behavior of composite fastener threads. *Appl. Compos. Mater.*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 251–267, doi: <https://doi.org/10.1007/s10443-014-9404-5>
- [2] Zhang Y., Zhou Z., Tan Z. Compression shear properties of Bonded–Bolted hybrid single-lap joints of C/C Composites at high temperature. *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, no. 3, art. 1054, doi: <https://doi.org/10.3390/app10031054>
- [3] Kushwaha J., Kumar V.P., Sinnur K.H. Development and evaluation of carbon-carbon threaded fasteners for high temperature applications. *Def. Sci. J.*, 2012, vol. 62, no. 5, pp. 348–355.
- [4] Zhang Y., Zhou Z., Pan S. et al. Comparison on failure behavior of three-dimensional woven carbon/carbon composites joints subjected to out-of-plane loading at room and high temperature. *Compos. Commun.*, 2021, vol. 23, art. 100567, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100567>
- [5] Zhang Y., Zhou Z., Pan S. et al. Comparison of failure modes and damage mechanisms of CFRP and C/C composite joints under out-of-plane loading. *Mech. Adv. Mater. Struct.*, 2022, vol. 29, no. 4, pp. 623–632, doi: <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1783404>
- [6] Liu F., Guan Z., Bian T. Damage model for predicting shear strength of carbon/carbon composite fastener based on post-failure behavior. *Compos. Struct.*, 2019, vol. 221, art. 110864, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.036>
- [7] Пономарев К.А., Магнитский И.В. Исследование масштабного фактора и особенностей нелинейного деформирования при сжатии пространственно армированного углерод — углеродного композиционного материала. *Ключевые тренды в компози-тах: наука и технологии. Сб. мат. Межд. науч.-практ. конф.* Москва, Диона, 2019, с. 605–611.
- [8] Гарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. *Пространственно-армированные композиционные материалы.* Москва, Машиностроение, 1987. 224 с.
- [9] Бушуев Ю.Г., Персин М.И., Соколов В.А. *Углерод — углеродные композиционные материалы.* Москва, Металлургия, 1994. 128 с.
- [10] Захаров М.Н., Любченко М.А., Магнитский И.В. Критерий разрушения резьбовых соединений деталей из композитных материалов. *Вестник машиностроения*, 2018, № 12, с. 3–6.
- [11] Магнитский И.В. Структурный критерий прочности пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов. *Вестник ПНИПУ. Механика*, 2020, № 3, с. 49–59, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.3.06>
- [12] Магнитский И.В., Пономарев К.А., Миронихин А.Н. и др. К вопросу о численном моделировании упругих свойств композиционных материалов с учетом схемы армирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 8, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-8-455>
- [13] Гольденблат И.И., ред. *Пластинки и оболочки из стеклопластиков.* Москва, Высшая школа, 1970. 408 с.
- [14] Любченко М.А., Чжан А.Л. К вопросу оптимизации параметров метрической резьбы на углерод-углеродном композиционном материале. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2021, т. 23, № 4, с. 40–48.

## References

- [1] Guan Z., Mu J., Su F. et al. Pull-through mechanical behavior of composite fastener threads. *Appl. Compos. Mater.*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 251–267, doi: <https://doi.org/10.1007/s10443-014-9404-5>

- [2] Zhang Y., Zhou Z., Tan Z. Compression shear properties of Bonded–Bolted hybrid single-lap joints of C/C Composites at high temperature. *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, no. 3, art. 1054, doi: <https://doi.org/10.3390/app10031054>
- [3] Kushwaha J., Kumar V.P., Sinnur K.H. Development and evaluation of carbon-carbon threaded fasteners for high temperature applications. *Def. Sci. J.*, 2012, vol. 62, no. 5, pp. 348–355.
- [4] Zhang Y., Zhou Z., Pan S. et al. Comparison on failure behavior of three-dimensional woven carbon/carbon composites joints subjected to out-of-plane loading at room and high temperature. *Compos. Commun.*, 2021, vol. 23, art. 100567, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100567>
- [5] Zhang Y., Zhou Z., Pan S. et al. Comparison of failure modes and damage mechanisms of CFRP and C/C composite joints under out-of-plane loading. *Mech. Adv. Mater. Struct.*, 2022, vol. 29, no. 4, pp. 623–632, doi: <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1783404>
- [6] Liu F., Guan Z., Bian T. Damage model for predicting shear strength of carbon/carbon composite fastener based on post-failure behavior. *Compos. Struct.*, 2019, vol. 221, art. 110864, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.036>
- [7] Ponomarev K.A., Magnitskiy I.V. [Investigation of the scale factor and the nonlinear deformation characteristics under compression of spatially reinforced carbon-carbon composite material]. *Klyuchevye trendy v kompozitakh: nauka i tekhnologii. Sb. mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Key Trends in Composites: Science and Technology. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Moscow, Diona, 2019, pp. 605–611. (In Russ.).
- [8] Tarnopolskiy Yu.M., Zhigun I.G., Polyakov V.A. *Prostranstvenno-armirovannyye kompozitsionnyye materialy* [Spatially reinforced composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 224 p. (In Russ.).
- [9] Bushuev Yu.G., Persin M.I., Sokolov V.A. *Uglerod — uglerodnyye kompozitsionnyye materialy* [Carbon-carbon composite materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1994. 128 p. (In Russ.).
- [10] 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.).
- [11] Magnitskiy I.V. Structural failure criterion for spatially-reinforced carbon-carbon composite. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin], 2020, no. 3, pp. 49–59, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.3.06> (in Russ.).
- [12] 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. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana*, 2012, no. 8, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-8-455> (in Russ.).
- [13] Goldenblat I.I., ed. *Plastinki i obolochki iz stekloplastikov* [Glass fibre reinforced plastic plates and casings]. Moscow, Vysshaya shkola Publ. 1970. 408 p. (In Russ.).
- [14] Lyubchenko M.A., Chzhan A.L. Revisiting optimization of metric thread parameters on carbon-carbon composite material. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2021, vol. 23, no. 4, pp. 40–48. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 09.03.2023

## 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](mailto:ma.ljubchenko@yandex.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, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [ma.ljubchenko@yandex.ru](mailto:ma.ljubchenko@yandex.ru)).



**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).

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

**ТАЩИЛОВ Сергей Васильевич** — кандидат технических наук, начальник отделения 0220. АО «Композит» (141070, Королев, Московская область, Российская Федерация, Пионерская ул., д. 4, e-mail: info@kompozit-mv.ru).

**TASHCHILOV Sergey Vasilyevich** — Candidate of Science (Eng.), Head of Department. Kompozit JSC (141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, Pionerskaya St., Bldg. 4, e-mail: info@kompozit-mv.ru).

**ЧЖАН Анна Лиевна** — инженер. АО «Композит» (141070, Королев, Московская область, Российская Федерация, Пионерская ул., д. 4, e-mail: ania461@yandex.ru).

**ZHANG Anna Lиеvna** — Engineer. Kompozit JSC (141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, Pionerskaya St., Bldg. 4, e-mail: ania461@yandex.ru).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Любченко М.А., Магнитский И.В., Тащилов С.В., Чжан А.Л. Масштабные эффекты в резьбовых деталях из пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 9, с. 14–22, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-14-22

**Please cite this article in English as:**

Lyubchenko M.A., Magnitsky I.V., Tashchilov S.V., Zhang A.L. Scaling effects in the threaded pieces made of the spatially reinforced carbon-carbon composite materials. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 9, pp. 14–22, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-14-22



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям учебник В.В. Девяткова  
«Системы искусственного интеллекта»**

Исследованы системы искусственного интеллекта как сообщества рассуждающих агентов. Каждый агент имеет возможность восприятия состояния среды, в которой он находится, и воздействия на нее с помощью реакций, вырабатываемых в результате осуществляемого им рассуждения в том или ином исчислении, на языке которого представляются знания агента. Создание системы искусственного интеллекта рассматривается как задача построения процедур такого рассуждения.

Для студентов и аспирантов вузов, обучающихся по специальностям «Информационные системы и технологии» и «Автоматизированные системы обработки информации и управления» по направлениям подготовки «Информационные системы» и «Информатика и вычислительная техника».

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>