

УДК 621.882.29

doi: 10.18698/0536-1044-2021-3-22-28

Определение коэффициентов трения в резьбовых соединениях из углерод-углеродных композиционных материалов

М.А. Любченко

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Friction Coefficient Estimate for Threaded Joints Made of Carbon-Carbon Composite Materials

M.A. Lyubchenko

Bauman Moscow State Technical University

Проведены экспериментальные исследования по определению коэффициентов трения в резьбовой паре винт — гайка из пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов. Получены количественные значения коэффициентов трения в резьбе и на торце гайки. Определен предельный момент завинчивания резьбовой пары из таких материалов. Установлен характер разрушения резьбовой пары из углерод-углеродных композиционных материалов при разрушающем моменте завинчивания. Испытания выполнены на лабораторной установке для измерения силы затяжки. Моменты при завинчивании гайки измерены с помощью динамометрического ключа.

Ключевые слова: углерод-углеродные композиционные материалы, резьбовая пара, трение в резьбе из УУКМ, несущая способность соединения, коэффициент трения в резьбе, коэффициент трения на торце гайки

Experimental studies were carried out to estimate the friction coefficients for a screw-nut threaded pair made of spatially reinforced carbon-carbon composite materials (CCCM). Quantitative values were obtained for the thread friction coefficient and nut end friction coefficient. The ultimate screw-in torque for the CCCM threaded pair was determined, and its failure mode at a destructive screw-in torque was established. The laboratory tests were carried out to measure the tightening force. The nut screw-in torque was measured using a torque wrench.

Keywords: carbon-carbon composite materials, threaded pair, CCCM thread friction, bearing capacity of the connection, thread friction coefficient, nut end friction coefficient

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) — это композиционные материалы (КМ) способные длительное время работать в диапазоне высоких температур (до 2700...3000 °С), и отличающиеся от большинства традиционных материалов механическими свойствами при высоких температурах. При температуре до 900 °С их физико-механические характеристики практически не изменяются,

а в диапазоне температур 900...2200 °С наблюдается одновременное возрастание значений пределов прочности, модулей упругости и деформаций при разрушении.

Сочетание высокой теплостойкости и химической стойкости с высокой теплопроводностью при малом линейном расширении делают УУКМ незаменимыми материалами в области высоких температур.

УУКМ активно используют в авиационной технике в качестве фрикционных материалов (в тормозных дисках летательных аппаратов). В ракетно-космической технике их применяют как теплозащитные и конструкционные материалы (в системах соплового тракта и для тепловой защиты космических аппаратов).

На базе УУКМ создают материалы для подшипников скольжения, работающих в тяжело нагруженных системах в атомном машино- и судостроении. Широкое применение такие материалы находят в химическом машиностроении при изготовлении тиглей, нагревателей и теплообменников.

Самым распространенным способом соединения деталей из УУКМ являются клеевые рецептуры, которые при определенных темпах нагрева могут образовывать неразъемные соединения, сохраняющие работоспособность в условиях высоких температур. Недостатками клеевого соединения УУКМ является отсутствие возможности многократной сборки-разборки изделия и его низкая способность сопротивляться отрывающим нагрузкам.

Альтернативным способом может служить резьбовое соединение УУКМ элементами из того же материала, что и связываемые детали. Преимущества резьбовой пары из УУКМ перед клеевым соединением композитных конструкций заключаются в возможности многократной сборки-разборки изделия и его способности воспринимать все виды действующих нагрузок.

Среди разъемных резьбовые соединения являются самыми популярными, поэтому их применяют повсеместно. Они различаются по типам, классам прочности, диаметрам (габаритным размерам резьбовых элементов), kvalitетам точности и материалам соединительных деталей.

Монтаж резьбового соединения состоит из нескольких операций, которые не зависят от собираемой конструкции. Например, при сборке летательного аппарата сверлят тысячи отверстий, обрабатывают их от заусенцев, вставляют болты (шпильки) и завинчивают гайку. Все операции выполняют вручную и в зависимости от ответственности соединения затяжку резьбовой пары могут контролировать или не контролировать. Процесс сборки конструкции резьбовыми элементами является трудоемким и дорогостоящим [1].

Теория и практика использования резьбовых элементов из традиционных материалов

хорошо известна и проработана, чего нельзя сказать о резьбовых соединениях из КМ. Сведения, имеющиеся в литературе, о применении резьбы на композите ограничены.

Результаты их использования известны только для специфических конструкций, где инженерами предложено решение для конкретного случая и с определенным КМ, что обычно подтверждается значительным количеством испытаний резьбовой пары определенного типоразмера без возможности расширения полученных данных на целые классы КМ.

Работы по исследованию резьбовых соединений из УУКМ проводились как в России [2–4], так и за рубежом [5, 6]. Основными результатами этих работ являются количественная оценка несущей способности соединения из пространственно-армированных УУКМ и неравномерность распределения нагрузки по виткам резьбы в зависимости от анизотропии свойств материала.

На практике у металлических резьбовых соединений часто встречается обрыв винтов и шпилек малого диаметра (меньше 14 мм) при затяжке нетарированными ключами. Для резьбовых соединений существующая проблема актуальна, так как физико-механические характеристики УУКМ при нормальной температуре значительно ниже таковых для металлов и их сплавов.

Прочность резьбового соединения при затяжке определяется статической прочностью резьбовых деталей. При завинчивании гайки соединение может разрушиться вследствие среза витков на стержне винта или шпильки (если винт и гайка изготовлены из одного материала), а также из-за обрыва стержня винта или шпильки по внутреннему диаметру.

Согласно теории винтовой пары, момент на ключе в процессе затяжки гайки складывается из суммы момента сил в резьбе T_p и момента сопротивления на торце гайки T_t , которые вызваны силами трения между резьбовыми деталями и стыком [7, 8]:

$$T = T_p + T_t. \quad (1)$$

Момент сил в резьбе

$$T_p = 0,5Fd_2 \operatorname{tg}(\psi + \varphi), \quad (2)$$

где F — сила затяжки резьбовой пары; d_2 — средний диаметр резьбы; ψ — угол подъема винтовой линии; φ — угол трения в резьбе.

Угол подъема винтовой линии

$$\psi = \arctg(P/\pi d_2),$$

где P — шаг резьбы.

Угол трения в резьбе

$$\varphi = \arctg f_1.$$

Здесь f_1 — приведенный коэффициент трения в резьбе,

$$f_1 = f / \cos \gamma,$$

где f — действительный коэффициент трения в резьбе; γ — угол наклона боковой стороны, $\gamma = \alpha/2$ (α — угол наклона профиля резьбы).

Момент сопротивления на торце гайки

$$T_{\tau} = 0,5 F d_{\tau} f_{\tau}, \quad (3)$$

где d_{τ} — средний диаметр торца гайки; f_{τ} — коэффициент трения на торце гайки.

После подстановки выражений (2) и (3) в формулу (1) получаем

$$\begin{aligned} T &= 0,5 F d_2 \operatorname{tg}(\psi + \varphi) + 0,5 F d_{\tau} f_{\tau} = \\ &= 0,5 F d_2 \left[\operatorname{tg}(\psi + \varphi) + f_{\tau} \frac{d_{\tau}}{d_2} \right]. \quad (4) \end{aligned}$$

Цель работы — определение коэффициентов трения в резьбе и на торце гайки при соединении конструкции из пространственно-армированных УУКМ, резьбовыми элементами из УУКМ. Известные значения коэффициентов трения в резьбе и на торце при нормальной температуре позволят конструкторам оптимально определять необходимую силу

затяжки резьбовых деталей из УУКМ при сборке изделий.

Экспериментальное исследование. Для определения приведенного коэффициента трения в резьбе и коэффициента трения на торце гайки использован лабораторный стенд кафедры «Основы конструирования машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана, предназначенный для измерения моментов в болтовом соединении. Схема стенда для измерения моментов в резьбовом соединении приведена на рис. 1 [1, 9], где D — внешний диаметр торца гайки; $d_{\text{отв}}$ — диаметр отверстия в гайке.

Стенд состоит из зафиксированной станины, на которой закреплена динамометрическая скоба (пружина), предназначенная для определения силы затяжки в момент завинчивания болтового соединения.

Силу затяжки определяли с помощью индикатора часового типа, измеряющего перемещения пружины и позволяющего с помощью заранее известного тарировочного коэффициента пересчитать ее прогиб вследствие растяжения винта. Момент завинчивания измеряли тарированным динамометрическим ключом.

Для вычисления коэффициента трения в резьбе необходимо найти момент трения в резьбе T_p , что позволит выразить из формулы (4) угол трения в резьбе φ и тем самым получить приведенный коэффициент трения в резьбе f_1 , что даст возможность найти действительный коэффициент трения в резьбе f .

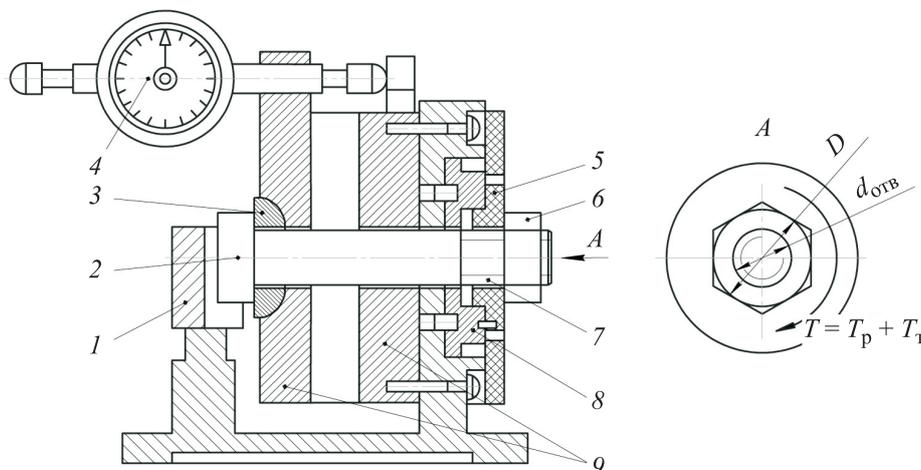


Рис. 1. Схема стенда для измерения моментов в резьбовом соединении:

- 1 — стопорная скоба; 2 — болт из УУКМ; 3 — сферическая шайба; 4 — индикатор часового типа; 5 — опорная шайба из УУКМ; 6 — гайка из УУКМ; 7 — резьба на болте; 8 — подкладка; 9 — динамометрическая скоба (пружина)

Для экспериментального определения момента трения в резьбе T_p потребовалось заменить опорную шайбу, установленную между гайкой и станиной, на упорный подшипник, тем самым заменив трение скольжения на торце гайки f_t трением качения. Это значительно уменьшило коэффициент трения на торце гайки и позволило принять момент трения сопротивления на торце $T_t = 0$.

Тогда коэффициент трения в резьбе

$$f = \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \frac{2T_p}{Fd_2} - \psi \right) \cos \gamma. \quad (5)$$

Момент трения сопротивления на торце гайки вычисляли из экспериментально определенного полного момента завинчивания по формуле

$$f_t = \frac{2(T - T_p)}{Fd_t}. \quad (6)$$

Средний диаметр торца гайки находили из соотношения $d_t = 0,5(D - d_{отв})$, а момент трения в резьбе T_p — из выражения (2) при использовании коэффициента трения, рассчитанного по формуле (5).

Для экспериментального исследования коэффициентов трения в резьбе и на торце гайки резьбовой пары из УУКМ выбрали пространственно-армированный УУКМ со схемой армирования 4ДЛ (рис. 2) и характерным поперечным размером армирующего элемента (стержня) 0,7 мм. Матрица материала представляла собой кокс каменноугольного пека. Материал изготавливали путем многократной пекопропитки с последующей карбонизацией и графитацией до конечной плотности, равной примерно 1950 кг/м^3 .

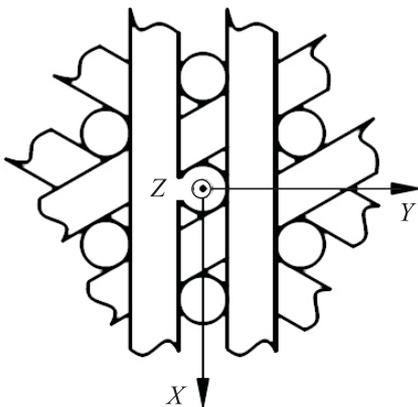


Рис. 2. Структура армирования материала по схеме 4ДЛ

Исследовали резьбовые элементы типоразмера М16, вырезанные в направлении оси X, обозначенные 1X и 2X. Изготовили два комплекта резьбовых пар винт — гайка из различных заготовок УУКМ. На каждом из комплектов выполнили не менее десяти закручиваний для определения момента трения на торце и момента трения в резьбе.

Образцы доводили до разрушения и экспериментально измеряли разрушающий момент закручивания для резьбовой пары винт — гайка из УУКМ с резьбой М16, вырезанной в направлении оси X. Также определяли характер разрушения резьбовой пары при предельном моменте. Исследования проводили при нормальной температуре, что соответствует условиям сборки изделий из УУКМ.

Анализ результатов. Результаты экспериментального исследования зависимости силы затяжки F от моментов трения в резьбе T_p и на ключе T приведены на рис. 3 и 4 для резьбовых элементов 1X и 2X. Там же показана аппроксимация

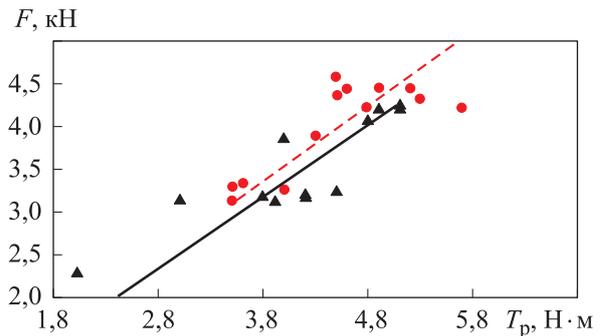


Рис. 3. Зависимость силы затяжки F от момента трения в резьбе T_p :
 ● и ▲ — экспериментальные данные для резьбовых элементов 1X и 2X; - - и — — их аппроксимация линейными функциями $F = 837,94T_p$ и $F = 885,4T_p$

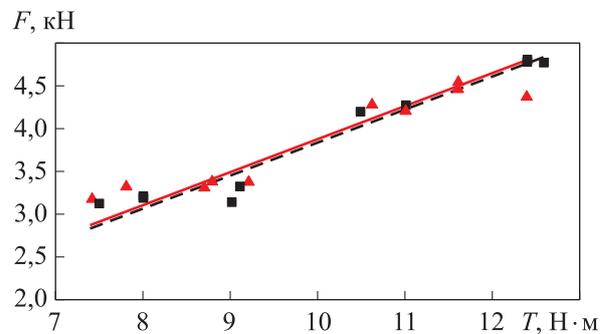


Рис. 4. Зависимость силы затяжки F от момента на ключе T :

▲ и ■ — экспериментальные данные для резьбовых элементов 1X и 2X; — и - - — их аппроксимация линейными функциями $F = 387,2T$ и $F = 385,91T$

мация экспериментальных данных линейными функциями.

При расчете коэффициентов трения приняты следующие параметры резьбовых пар: $d = 16$ мм; $d_2 = 14,701$ мм; $P = 2$ мм; $d_T = 21,2$ мм; $\psi = 2,480^\circ$; $\alpha = 60^\circ$; $\gamma = 30^\circ$ [10].

Анализ результатов эксперимента с применением формулы (5) показал, что для первого комплекта резьбового соединения из УУКМ коэффициент трения в резьбе равен 0,094, для второго — 0,100. Для их определения использованы средние значения силы затяжки и момента трения в резьбе. Полученные результаты хорошо согласуются между собой и могут быть применены для дальнейших расчетов при нахождении коэффициентов трения на торце гайки.

С учетом принятых средних значений коэффициентов трения в резьбе коэффициент трения на торце гайки, рассчитанный по формуле (6), для первой пары винт — гайка составил 0,137, для второй — 0,134.

Анализ результатов расчета коэффициентов трения в резьбе и на торце гайки по формулам (5) и (6) показал, что f меньше f_T . Это отличается от данных, полученных для металлических болтовых соединений [11].

Кроме того, наблюдается большой разброс значений коэффициента трения в резьбе (для элемента 1X $\Delta f_1 = 0,043$, для элемента 2X $\Delta f_2 = 0,060$) и коэффициента трения на торце гайки ($\Delta f_T \approx 0,045$). Причем в резьбе разброс значений коэффициента трения больше, чем на торце гайки, что свидетельствует о менее стабильном качестве резьбы по сравнению с торцом гайки. Этот факт согласуется с результатами работ [11–13].

Особое внимание следует обратить на наличие притирки поверхностей контакта в резьбе и на опорном торце гайки, что вероятнее всего связано с приработкой деталей (контактных поверхностей). Этот факт подтверждается ана-

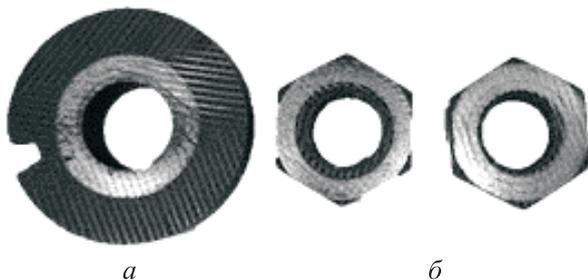


Рис. 5. Внешний вид поверхностей опорной шайбы (а) и гаек (б) после испытания

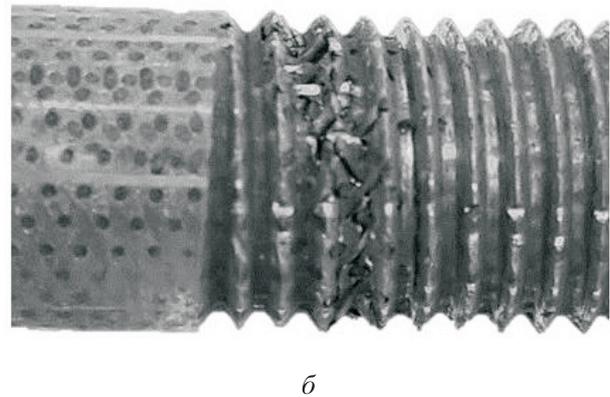
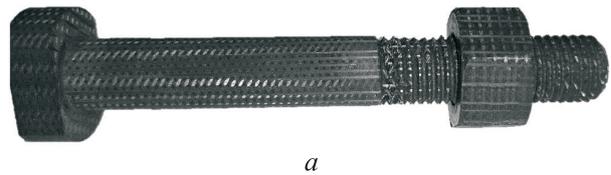


Рис. 6. Внешний вид разрушенного образца (а) и увеличенный фрагмент поврежденной резьбы (б)

лизом поверхностей опорной шайбы и гаек из УУКМ (рис. 5).

Для резьбового элемента 1X разрушающий момент завинчивания, полученный в результате разрушения резьбовой пары, составил 35,0 Н·м, для резьбового элемента 2X — 34,5 Н·м. С учетом средних коэффициентов трения в резьбе и на торце гайки найдены усилия разрушения резьбы: на элементе 1X $F_{\text{раз}}^1 = 6753$ Н, на элементе 2X $F_{\text{раз}}^2 = 6610$ Н.

При осмотре образцов после испытания (рис. 6) наблюдалось разрушение резьбы вследствие среза витков по внутреннему диаметру винта, но срезанной оказалась только та часть витков, которая испытывала максимальные напряжения. Этот факт согласуется с результатами, полученными в работах [2, 3].

Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования по определению коэффициентов трения в резьбовой паре винт — гайка из пространственно-армированных УУКМ. Установлено, что для данного класса материалов коэффициент трения в резьбе находится в диапазоне 0,094...0,100, поэтому при проектировочных расчетах его можно принять равным примерно 0,1.

2. Пересчет коэффициента трения на торце гайки в резьбовом соединении из УУКМ показал, что он незначительно больше коэффициен-

та трения в резьбе, и при проектировочных расчетах можно принять $f_r \approx 0,136$.

3. Разрушающий момент для резьбы М16 из УУКМ, вырезанной в направлении оси X , составил 35 Н·м. Анализ характера разрушения подтвердил срез резьбы по внутреннему диаметру винта.

4. Полученные значения коэффициентов трения позволяют оценить разрушающий момент закручивания с использованием результатов работы [2] и дать рекомендации для выбора значения момента на гаечном ключе при сборке резьбовых конструкций из пространственно-армированных КМ.

Литература

- [1] Ряховский О.А., Сыромятников В.С. Экспериментальное определение коэффициентов трения в болтовом соединении. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 10(679), с. 18–25, doi: 10.18698/0536-1044-2016-10-18-25
- [2] Захаров М.Н., Любченко М.А. Исследование предельных нагрузок для резьбовых соединений из углерод–углеродных композиционных материалов. *Конструкции из композиционных материалов*, 2017, № 4, с. 82–87.
- [3] Захаров М.Н., Любченко М.А., Магнитский И.В. Критерий разрушения резьбовых соединений деталей из композитных материалов. *Вестник машиностроения*, 2018, № 12, с. 3–6.
- [4] Любченко М.А., Магнитский И.В. Оценка прочности резьбового соединения из углерод–углеродного композиционного материала при проектировании деталей из композита. *Вопросы оборонной техники. Научно-технический сборник. Серия 15 «Композиционные неметаллические материалы в машиностроении»*, 2018, № 3(190), с. 14–20.
- [5] Guan Z., Mu J., Su F., Bian T., Huang Y., Li Z. Pull-Through Mechanical Behavior of Composite Fastener Threads. *Applied Composite Materials*, 2015, vol. 22, iss. 3, pp. 251–267, doi: <https://doi.org/10.1007/s10443-014-9404-5>
- [6] Mei H., Cheng L., Ke Q., Zhang L. High-temperature tensile properties and oxidation behavior of carbon fiber reinforced silicon carbide bolts in a simulated re-entry environment. *Carbon*, 2010, vol. 48, iss. 11, pp. 3007–3013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.056>
- [7] Ряховский О.А., ред. *Детали машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 465 с.
- [8] Kulak G.L., Fisher J.W., Struik J.H.A. *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*. American Institute of Steel Construction, Inc. 2001. 330 p. [9] ISO/TC 20/SC 4 N 136. *Aero-space–Determination of coefficients of friction of bolts and nuts under specific conditions–complementary element*. 2011. 16 p.
- [10] ГОСТ 24705–2004. *Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры*. Москва, Стандартинформ, 2008. 20 с.
- [11] Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Шарловский Ю.В. *Затяжка и стопорение резьбовых соединений*. Москва, Машиностроение, 1985. 224 с.
- [12] Соловьев В.Л. *Обеспечение надежности машин при их ремонте в сельском хозяйстве путем повышения точности и равномерности затяжки групповых резьбовых соединений*. Дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2014. 132 с.
- [13] Mortensen J. *Friction Analysis of Bolts*. Aalborg University Esbjerg, 2013. 83 p.

References

- [1] Ryakhovskiy O.A., Syromyatnikov V.S. The Experimental Determination of the Coefficients of Friction in Bolted Joints. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 10(679), pp. 18–25 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2016-10-18-25
- [2] Zakharov M.N., Lyubchenko M.A. Analysis of ultimate loads on the screw joints to be used in articles made of carbon-carbon composites. *Composite materials constructions*, 2017, no. 4, pp. 82–87 (in Russ.).
- [3] Zakharov M.N., Lyubchenko M.A., Magnitskiy I.V. Fracture criterion of threaded joints of parts from composite materials. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2018, no. 12, pp. 3–6 (in Russ.).
- [4] Lyubchenko M.A., Magnitskiy I.V. Evaluation of the strength of a threaded connection made of carbon–carbon composite material in the design of composite parts. *Voprosy oboronnoy*

- tehniki. Nauchno-tehnicheskiy sbornik. Seriya 15 "Kompozitsionnyye nemetallicheskiye materialy v mashinostroyenii"* [Questions of defense equipment. Scientific and technical collection. Series 15 "Composite non-metallic materials in mechanical engineering"]. 2018, no. 3(190), pp. 14–20 (in Russ.).
- [5] Guan Z., Mu J., Su F., Bian T., Huang Y., Li Z. Pull-Through Mechanical Behavior of Composite Fastener Threads. *Applied Composite Materials*, 2015, vol. 22, iss. 3, pp. 251–267, doi: <https://doi.org/10.1007/s10443-014-9404-5>
- [6] Mei H., Cheng L., Ke Q., Zhang L. High-temperature tensile properties and oxidation behavior of carbon fiber reinforced silicon carbide bolts in a simulated re-entry environment. *Carbon*, 2010, vol. 48, iss. 11, pp. 3007–3013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.056>
- [7] *Detali mashin* [Machine parts]. Ed. Ryakhovskiy O.A. Moscow, Bauman Press, 2014. 465 p.
- [8] Kulak G.L., Fisher J.W., Struik J.H.A. *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*. American Institute of Steel Construction, Inc. 2001. 330 p.
- [9] ISO/TC 20/SC 4 N 136. Aerospace-Determination of coefficients of friction of bolts and nuts under specific conditions-complementary element. 2011. 16 p.
- [10] GOST 24705–2004. *Osnovnyye normy vzaimozamenyayemosti. Rez'ba metricheskaya. Osnovnyye razmery* [ISO 724:1993. ISO general-purpose metric screw threads — Basic dimensions]. Moscow, Standartinform publ., 2008. 20 p.
- [11] Iosilevich G.B., Stroganov G.B., Sharlovskiy Yu.V. *Zatyazhka i stoporeniye rez'bovykh soyedineniy* [Tightening and Locking Threaded Connections]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1985. 224 p.
- [12] Solov'yev V.L. *Obespecheniye nadezhnosti mashin pri ikh remonte v sel'skom khozyaystve putem povysheniya tochnosti i ravnomernosti zatyazhki gruppovykh rez'bovykh soyedineniy*. Kand. Diss. [Ensuring the reliability of machines during their repair in agriculture by increasing the accuracy and uniformity of tightening group threaded connections. Cand. Diss.]. Omsk, 2014. 132 p.
- [13] Mortensen J. *Friction Analysis of Bolts*. Aalborg University Esbjerg, 2013. 83 p.

Статья поступила в редакцию 15.11.2020

Информация об авторе

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).

Information about the author

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).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Любченко М.А. Определение коэффициентов трения в резьбовых соединениях из углерод-углеродных композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 3, с. 22–28, doi: [10.18698/0536-1044-2021-3-22-28](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-3-22-28)

Please cite this article in English as:

Lyubchenko M.A. Friction Coefficient Estimate for Threaded Joints Made of Carbon-Carbon Composite Materials. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 3, pp. 22–28, doi: [10.18698/0536-1044-2021-3-22-28](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-3-22-28)