

УДК 621.813

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-11

Определение несущей способности комбинированного резьбогладкого соединения с применением полимерных анаэробных материалов

И. И. Воячек¹, Д. В. Кочетков², О. А. Низов³^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия¹voyachek@list.ru, ²denis.kochetkov80@yandex.ru, ³tmspgu@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение функциональных свойств резьбовых соединений является актуальной задачей производства. Рассматривается новое комбинированное резьбогладкое соединение (РГС) с использованием полимерных анаэробных материалов, функциональные свойства которого изучены недостаточно. Соединение содержит резьбовой и гладкий цилиндрический участок сопряжения деталей, а также промежуточный слой анаэробного материала, находящийся в зазоре между поверхностями деталей. Цель работы – определение влияния цилиндрического участка с анаэробным материалом на несущую способность комбинированного РГС. *Материалы и методы.* Определение параметров контактирования деталей и несущей способности РГС ведется аналитическим методом и путем компьютерного моделирования методом конечных элементов. *Результаты.* Разработана методика проектирования и определения несущей способности РГС. *Выводы.* Установлено, что цилиндрический участок соединения с анаэробным материалом воспринимает существенную долю эксплуатационной нагрузки, что позволяет разгрузить резьбовую часть и повысить несущую способность комбинированного соединения. Цилиндрический участок РГС необходимо формировать со стороны приложения эксплуатационной нагрузки. Конструкция РГС технологична и не требует существенных затрат при практической реализации.

Ключевые слова: комбинированное резьбогладкое соединение, анаэробный полимерный материал, несущая способность

Для цитирования: Воячек И. И., Кочетков Д. В., Низов О. А. Определение несущей способности комбинированного резьбогладкого соединения с применением полимерных анаэробных материалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 147–156. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-11

Determination of the load-bearing capacity of a combined threaded smooth connection using polymeric anaerobic materials

I.I. Voyachek¹, D.V. Kochetkov², O.A. Nizov³^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia¹voyachek@list.ru, ²denis.kochetkov80@yandex.ru, ³tmspgu@mail.ru

Abstract. *Background.* Improving the functional properties of threaded connections is a pressing manufacturing challenge. This paper explores a new combined threaded connection (CTC) using anaerobic polymer materials, the functional properties of which have been insufficiently studied. The connection contains a threaded and smooth cylindrical section of the mating parts, as well as an intermediate layer of anaerobic material located in the gap between the surfaces of the parts. The purpose of the study is to determine the influence of a cylindrical section with anaerobic material on the bearing capacity of a combined CTC.

Materials and methods. The determination of the contact parameters of the parts and the load-bearing capacity of the CTC is carried out using an analytical method and computer modeling using the finite element method. *Results.* A methodology for designing and determining the bearing capacity of CTC has been developed. *Conclusions.* It has been established that the cylindrical section of the connection with the anaerobic material bears a significant portion of the operating load, which allows for the relief of the threaded part and increases the load-bearing capacity of the combined connection. The cylindrical section of the CTC must be formed on the side where the operational load is applied. The CTC design is technologically feasible and does not require significant investment in practical implementation.

Keywords: combined threaded smooth connection, anaerobic polymer material, load-bearing capacity

For citation: Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Nizov O.A. Determination of the load-bearing capacity of a combined threaded smooth connection using polymeric anaerobic materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):147–156. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-11

Введение

Резьбовые соединения (РС), которые широко используются в разных конструкциях, должны надежно выполнять заданные функции при различных условиях нагружения.

Для комплексного обеспечения требуемых характеристик РС в большинстве случаев необходимо сочетание различных конструкторских и технологических решений, что обычно приводит к удорожанию процесса производства и не всегда оказывается оправданным с точки зрения эффективности [1–11].

Известна технология сборки резьбовых соединений с использованием полимерных анаэробных материалов [4–9], которая показала высокую эффективность. Анаэробные материалы находятся в жидком состоянии на воздухе и полимеризуются в зоне контакта деталей в условиях отсутствия кислорода, приобретая достаточную сдвиговую прочность.

Предлагается проектировать и применять комбинированное резьбогладкое соединение (РГС), содержащее резьбовой и гладкий цилиндрический участки сопряжения деталей, а также промежуточный слой анаэробного материала (АМ), находящийся в зазоре между цилиндрическими сопрягаемыми поверхностями (рис. 1). Предполагается, что цилиндрический участок соединения с АМ должен воспринимать существенную долю эксплуатационной нагрузки, что позволит разгрузить резьбовую часть и повысить несущую способность комбинированного соединения. Можно размещать АМ и в зоне резьбового контакта, что дополнительно повышает прочность и жесткость РС [10, 11].

Определение параметров контактирования и несущей способности комбинированного резьбогладкого соединения

Определение функциональных свойств резьбовых соединений при сборке с АМ подробно изложено в статье [5]. Ниже приводится аналитическое определение параметров контактирования и свойств комбинированного РГС (рис. 1) с применением АМ.

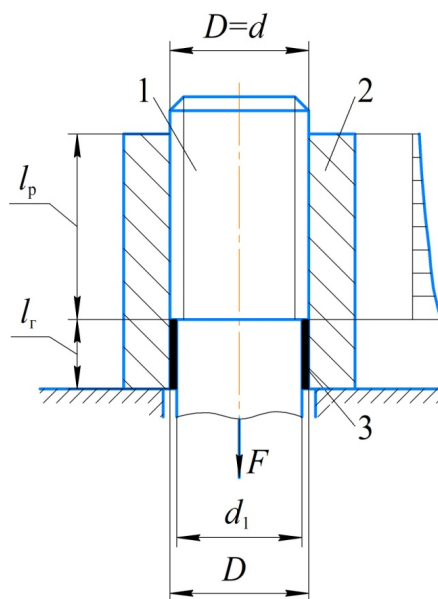


Рис. 1. Общий вид комбинированного РГС
(справа показана эпюра распределения осевой нагрузки по виткам резьбы):
1 – болт; 2 – гайка; 3 – промежуточный слой АМ

На рис. 1 обозначено: F – осевая нагрузка на соединение; $D = d$ – номинальный диаметр резьбы и гладкого участка; d_1 – диаметр стержня болта; l_p – длина резьбового участка соединения; l_r – длина гладкого участка соединения, равная длине контактного слоя из АМ.

Общую осевую нагрузку, действующую на РГС, можно разделить на две части:

$$F = F_p + F_r, \quad (1)$$

где F_p – часть осевой силы, воспринимаемая резьбовым участком РГС; F_r – часть осевой силы, воспринимаемая гладким цилиндрическим участком РГС с промежуточным контактным слоем из АМ.

Так как при действии нагрузки, например осевой силы, податливость контактного слоя из АМ на гладком участке значительно больше, чем податливость соединяемых деталей, то можно считать их абсолютно жесткими по отношению к контактному слою. В этом случае действующая нагрузка F_r распределяется в контактном слое из АМ равномерно по длине и ее интенсивность будет равна:

$$q(z) = q_r = \frac{F_r}{l_r} = \text{const}. \quad (2)$$

Величину F_r предлагается определять по формуле

$$F_r = \frac{\pi D l_r \sum \delta_{p \max} G_{AM}}{t_{AM}}, \quad (3)$$

где $t_{AM} = S/2$ – толщина контактного слоя АМ, равная зазору между деталями на цилиндрическом участке или половине посадочного диаметрального зазора; $\sum \delta_{pmax}$ – максимальное суммарное относительное перемещение витков резьбы при действии осевой нагрузки; G_{AM} – модуль сдвига полимеризованного АМ.

При действии осевой силы на РГС происходит относительное смещение сопрягаемых деталей. С некоторым приближением можно считать, что максимальное относительное смещение деталей в РГС и, следовательно, на гладком участке будет равно максимальному суммарному относительному перемещению витков $\sum \delta_{pmax}$, которое реализуется на первом витке резьбового участка (ближайшего к точке приложения нагрузки).

В литературе практически отсутствуют данные по упругим константам марок АМ, в частности, не определены модули сдвига G_{AM} .

Известно, что для однородного изотропного твердого материала упругие константы связаны соотношением

$$G_{AM} = \frac{E_{AM}}{2(1 + \mu_{AM})}, \quad (4)$$

которым в первом приближении можно воспользоваться, если неизвестен модуль сдвига АМ. Модуль упругости АМ E_{AM} можно считать соответствующим модулю упругости пластмасс.

Таким образом, применительно к РГС имеются два соотношения – (1) и (3), в которых три взаимосвязанных величины F_p , F_r и $\sum \delta_{pmax}$ неизвестны. Для их нахождения используется условие совместности деформаций или перемещений при нагружении РГС, и расчет ведется методом последовательных приближений.

В нулевом приближении ($i = 0$) считается, что вся нагрузка воспринимается резьбовым соединением $F_p(i) = F_p^0 = F$. Предполагается, что перемещения деталей на гладком участке равны максимальным суммарным перемещениям на первом витке $\delta_r(i) = \sum \delta_{pmax}(i)$ или в нулевом приближении $\delta_r = \sum \delta_{pmax}^0$. Значения суммарных перемещений на первом витке при отсутствии АМ определяются по методике И. И. Воячека и Д. В. Кочеткова [5, 6, 8, 9].

Следующим этапом является первое приближение ($i = 1$). Определяется значение нагрузки, воспринимаемой гладким участком $F_r(i)$, по формуле (3).

Корректируется значение нагрузки, приходящейся на резьбовой участок по формуле

$$F_p(i) = F_p^0 - F_r(i). \quad (5)$$

Чтобы исключить случай, когда разность в формуле (5) может быть отрицательной или нулевой, проводится проверка $F_p(i) \geq 0$. Если разность отрицательная или нулевая, то можно уменьшить длину гладкого участка l_r .

Затем циклы приближений повторяются. В каждом цикле определяется относительное перемещение на первом витке с учетом уменьшения нагрузки на резьбовое соединение. Так как в соответствии с [5, 6, 8, 9] перемещения пропорциональны действующей нагрузке, то можно использовать формулу

$$\sum \delta_{p\max}(i) = \sum \delta_{p\max}^0 \frac{F_p(i)}{F_p^0}. \quad (6)$$

Циклы повторяются до тех пор, пока не выполнится условие (7), где можно принять $\Delta = 0,01$:

$$\frac{|F_p(i) - F_p(i-1)|}{F_p(i)} \leq \Delta = 0,01. \quad (7)$$

При выполнении условия (7) необходимо провести еще одну проверку, связанную с предельным значением сдвиговой прочности применяемого АМ – $\tau_{сдАМ}$ и соответствующую условию

$$F_{\Gamma}(i) \leq \frac{A_{a,\Gamma} \tau_{сдАМ}}{n}, \quad (8)$$

где $A_{a,\Gamma} = \pi D l_{\Gamma}$ – номинальная площадь контакта деталей на гладком участке; n – коэффициент запаса прочности, связанный с несплошным заполнением АМ зазора на гладком участке РГС и возможным отличием сдвиговой прочности АМ от паспортного значения.

Если условие (8) не выполняется, то необходимо увеличить длину гладкого участка l_{Γ} или выбрать АМ с более высоким значением $\tau_{сдАМ}$.

После окончания вычислений следует зафиксировать следующие параметры РГС: F , $F_p(i)$, $F_{\Gamma}(i)$, $\sum \delta_{p\max}^0$, $\sum \delta_{p\max}(i)$, $\delta_{\Gamma}(i)$.

Пример расчета РГС

Расчет параметров РГС проводился при следующих исходных данных: резьбовое соединение типа болт-гайка $M10 - 6H/6g$; диаметры резьбы – $d = D = 10$ мм, $d_1 = D_1 = 8,647$ мм, $d_2 = D_2 = 9,188$ мм; $D_0 = 17$ мм; $P = 1,25$ мм; угол наклона боковых сторон профиля резьбы $\alpha = 60^\circ$; длина резьбового участка соединения $l_p = 6$ мм; длина гладкого участка соединения $l_{\Gamma} = 5$ мм; материал болта – сталь 45Х (модуль упругости $E_1 = 2,06 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_1 = 0,32$) и гайки – сталь 35Х (модуль упругости $E_2 = 2,14 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_2 = 0,29$); анаэробный материал марки НМ162 (модуль упругости $E_{АМ} = 2,62 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu_{АМ} = 0,38$, сдвиговая прочность $\tau_{сдАМ} = 30$ МПа). К резьбогладкому соединению прикладывается внешняя осевая нагрузка $F = 10$ кН.

Расчет резьбового соединения с приведенными выше данными выполнен в работах [5, 6, 8, 9] и определено, что на первом витке при действии нагрузки $F = 10$ кН суммарное перемещение равно $\sum \delta_{p\max}^0 \approx 4$ мкм, которое принимается за перемещение в слое АМ.

Определяется константа сдвига АМ по формуле (4):

$$G_{AM} = \frac{2,62 \cdot 10^3 \text{ МПа}}{2(1 + 0,38)} \approx 950 \text{ МПа} = 95 \text{ кг/мм}^2.$$

Первое приближение. Если принять $t_{AM} = S/2 = 0,1$ мм, то по формуле (3) можно найти

$$F_T(1) = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 0,004 \cdot 95}{0,1} = 596 \text{ кг} = 5,96 \text{ кН}$$

и по формуле (5):

$$F_p(1) = F_p^0 - F_T(1) = 10 - 5,96 = 4,04 \text{ кН}.$$

По формуле (6) корректируется максимальное перемещение в РГС:

$$\sum \delta_{p\max}(1) = \sum \delta_{p\max}^0 \frac{F_p(1)}{F_p^0} = 0,004 \frac{4,04}{10} = 0,0016 \text{ мм},$$

которое подставляется в формулу (3).

Конечное приближение. После всех итераций при выполнении условия (7) получено $F_T = 3,7$ кН, $F_p = 6,3$ кН.

Условие (8) выполняется:

$$F_T \leq \frac{A_{a,\Gamma} \tau_{сдАМ}}{n} = \frac{\pi D l_T \tau_{сдАМ}}{n} = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 3,0}{1,2} = 393 \text{ кг} = 3,93 \text{ кН}.$$

Фиксируются значения:

$$F = 10 \text{ кН}, F_T = 3,7 \text{ кН}, F_p = 6,3 \text{ кН},$$

$$\sum \delta_{p\max}^0 = 0,004 \text{ мм}, \sum \delta_{p\max} = 0,00257 \text{ мм} = \delta_T.$$

Таким образом, гладкий участок РГС с прослойкой из полимеризованного АМ воспринимает 37 % эксплуатационной нагрузки, существенно разгружает наиболее нагруженный первый виток и всю резьбовую часть соединения.

Компьютерное моделирование резьбогладкого соединения при действии осевой нагрузки

Полученные выше результаты коррелируют с данными компьютерного моделирования.

На рис. 2 представлена твердотельная расчетная модель РГС с приложением осевой нагрузки, в которой АМ заполняет зазоры на гладком участке.

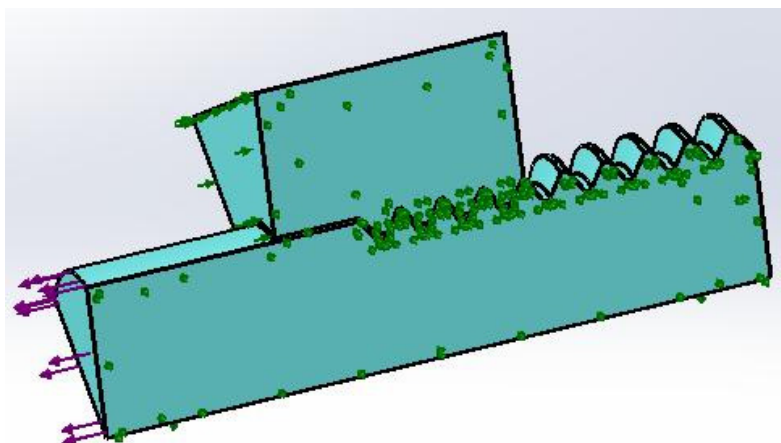


Рис. 2. Твёрдотельная расчетная модель резьбогладкого соединения (на гладком участке в зазоре между деталями находится АМ)

В табл. 1 приведены данные по распределению нагрузки F по виткам резьбы в РГС при сборке с АМ, полученные при компьютерном моделировании методом конечных элементов с исходными данными, соответствующими примеру расчета РГС [10, 11].

Таблица 1
Распределение нагрузки по виткам РГС при сборке с АМ

Значение коэффициента трения между витками f и зазора на гладком участке t_{AM}	Доля нагрузки, приходящаяся на витки, F_i / F , %				Суммарная нагрузка на витки, %
	1-й виток	2-й виток	3-й виток	4-й виток	
АМ заполняет зазор только на гладком участке					
$f = 0,2$; $t_{AM} = 0,138$ мм	25,21	17,11	13,65	14,06	70,03

Если принять, что суммарная нагрузка на витки резьбы при отсутствии АМ равна 100 %, то уменьшение нагрузки на витки в случае нахождения АМ только на гладком участке составило около 30 % (при $t_{AM} = 0,138$ мм). При расчете уменьшение составило 37 %, но при $t_{AM} = 0,1$ мм. Учитывая, что с уменьшением зазора эффект разгрузки витков увеличивается, то корреляция данных, полученных при моделировании и путем расчета по аналитическим зависимостям, достаточно высокая.

Заключение

В ходе исследования характеристик резьбогладкого соединения было установлено, что гладкий участок с прослойкой из анаэробных материалов эффективно воспринимает значительную часть эксплуатационных нагрузок. Это приводит к снижению перемещений в области резьбового контакта и, следовательно, к повышению жесткости комбинированного соединения, а также к снижению концентрации напряжений. Все эти улучшения создают условия для значительного увеличения несущей способности соединения

не только при действии осевой силы, но и при нагружении крутящим и изгибающим моментами, особенно при наличии переменного нагружения, что является критически важным фактором для надежности работы конструкций в различных условиях эксплуатации.

Таким образом, наблюдается разделение функций между разными участками соединения: во время процесса затягивания резьбогладкого соединения нагружается прежде всего резьбовой участок, тогда как дополнительная эксплуатационная нагрузка в значительной степени воспринимается цилиндрическим участком, содержащим прослойку из АМ. Увеличение площади гладкого цилиндрического участка способствует росту его несущей способности, что позволяет более равномерно распределять эксплуатационную нагрузку между участками РГС. Данное разделение функций в РГС не только увеличивает эффективность работы соединения, но и продлевает срок его службы, уменьшая вероятность усталостного износа.

Список литературы

1. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М. : Машиностроение, 1990. 368 с.
2. Березин С. Я., Леонов В. Н. Упругие модели в решении задачи Н. Е. Жуковского // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. № 4. С. 23–27.
3. Иванов М. Н., Финогенов В. А. Детали машин : учебник для машиностроительных специальностей вузов. 12-е изд., испр. М. : Высш. шк., 2008. 408 с.
4. Воячек И. И. Обеспечение качества неподвижных соединений на основе интеграционной системы конструкторско-технологического проектирования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08. Пенза, 2006. 401 с.
5. Кочетков Д. В. Технологическое обеспечение прочности и жесткости резьбовых соединений при сборке с применением анаэробных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08, 01.02.06. Пенза, 2010. 210 с.
6. Воячек И. И., Кочетков Д. В. Влияние анаэробных материалов на распределение нагрузки в резьбовом соединении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 6. С. 34–39.
7. Воячек И. И., Кочетков Д. В. Перспективы применения анаэробных материалов при сборке соединений технологического оборудования // Актуальные проблемы станкостроения – 2023 : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пенза, 1–3 июня 2023 г.) / под общ. ред. д.т.н., проф. А. Е. Зверовщикова; к.т.н., доцента С. А. Нестерова; к.т.н., доцента Д. В. Кочеткова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. С. 280–286.
8. Voyachek I. I., Kochetkov D. V., Mityasov S. G. Rational Provision of Robustness Properties of Bolted Joints of Assembly with Implementation of Anaerobic Materials // Lecture Notes in Mechanical Engineering : Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Switzerland : Springer International Publishing, 2020. Vol. 2. P. 163–170. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_18
9. Воячек И. И., Кочетков Д. В. Комплексное повышение эксплуатационных характеристик резьбовых соединений при сборке с анаэробными материалами // Вестник машиностроения. 2017. № 2. С. 41–46.
10. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Вантеев А. Н., Фадеев Н. А., Баранов И. В. Распределение нагрузки в резьбогладком соединении при сборке с анаэробными материалами // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2017. С. 3–8.

11. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Вантеев А. Н., Фадеев Н. А., Баранов И. В. Рациональное обеспечение качества резьбогладких соединений, собранных с применением анаэробных материалов // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2017. С. 22–27.

References

1. Birger I.A., Iosilevich G.B. *Rez'bovye i flantsevye soedineniya = Threaded and flanged connections*. Moscow: Mashino-stroenie, 1990:368. (In Russ.)
2. Berezin S.Ya., Leonov V.N. Elastic models in solving N.E. Zhukovsky's problem. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembly in mechanical engineering and instrument making*. 2007;(4):23–27. (In Russ.)
3. Ivanov M.N., Finogenov V.A. *Detali mashin: uchebnik dlya mashinostroitel'nykh spetsial'nostey vuzov. 12-e izd., ispr. = Machine parts: a textbook for mechanical engineering specialties at universities. The 12th edition, revised*. Moscow: Vyssh. shk., 2008:408. (In Russ.)
4. Voyachek I.I. *Quality assurance of fixed connections based on an integrated design and engineering system*. DSc dissertation: 05.02.08. Penza, 2006:401. (In Russ.)
5. Kochetkov D.V. *Technological support for the strength and rigidity of threaded connections during assembly using anaerobic materials*. PhD dissertation: 05.02.08, 01.02.06. Penza, 2010:210. (In Russ.)
6. Voyachek I.I., Kochetkov D.V. The influence of anaerobic materials on load distribution in a threaded connection. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembly in mechanical engineering and instrument making*. 2010;(6):34–39. (In Russ.)
7. Voyachek I.I., Kochetkov D.V. Prospects for the use of anaerobic materials in the assembly of process equipment connections. *Aktual'nye problemy stankostroeniya – 2023: sb. st. po materialam Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (g. Penza, 1–3 iyunya 2023 g.) = Current issues in machine tool manufacturing – 2023: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation (Penza, June 1-3, 2023)*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:280–286. (In Russ.)
8. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Mityasov S.G. Rational Provision of Robustness Properties of Bolted Joints of Assembly with Implementation of Anaerobic Materials. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Switzerland: Springer International Publishing, 2020;2:163–170. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_18
9. Voyachek I.I., Kochetkov D.V. Comprehensive improvement of the performance characteristics of threaded connections during assembly with anaerobic materials. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*. 2017;(2):41–46. (In Russ.)
10. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Vanteev A.N., Fadeev N.A., Baranov I.V. Load distribution in threaded smooth connections during assembly with anaerobic materials. *Sistemy proektirovaniya, modelirovaniya, podgotovki proizvodstva i upravlenie proektami CAD/CAM/CAE/PDM: sb. st. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Design, modeling, production preparation and project management systems CAD/CAM/CAE/PDM: proceedings of the 11th International scientific and practical conference*. Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2017:3–8. (In Russ.)
11. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Vanteev A.N., Fadeev N.A., Baranov I.V. Rational quality assurance of threaded smooth connections assembled using anaerobic materials. *Sistemy proektirovaniya, modelirovaniya, podgotovki proizvodstva i upravlenie proektami CAD/CAM/CAE/PDM: sb. st. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. Konf. = Design, modeling, production preparation and project management systems CAD/CAM/CAE/PDM: proceedings of the 11th International scientific and practical conference*. Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2017:22–27. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Иванович Воячек

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: voyachek@list.ru

Igor I. Voyachek

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of mechanical engineering technologies
and equipment, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Денис Викторович Кочетков

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой металлорежущих
станков, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: denis.kochetkov80@yandex.ru

Denis V. Kochetkov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of metal cutting machines, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Олег Алексеевич Низов

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tmspgu@mail.ru

Oleg A. Nizov

Master's degree student, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 23.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 22.05.2025

Принята к публикации / Accepted 29.09.2025