

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ
ENGINEERING TECHNOLOGY**

Научная статья

УДК 621.813

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-5-16

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННОГО
РЕЗЬБОГЛАДКОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СБОРКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ
АНАЭРОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ****Воячек Игорь Иванович, Кочетков Денис Викторович,
Низов Олег Алексеевич**

Пензенский государственный университет

* для корреспонденции: voyachek@list.ru

**Информация о статье**

Поступила:

04 апреля 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 сентября 2025 г.

Принята к публикации:

30 сентября 2025 г.

Опубликована:

23 октября 2025 г.

Ключевые слова:резьбогладкое соединение;
функциональные свойства;
анаэробный материал;
прочность; несущая
способность**Аннотация.**

Статья посвящена исследованию функциональных свойств нового комбинированного резьбогладкого соединения, при сборке которого используются полимерные анаэробные материалы, размещаемые в пустотах зоны контакта деталей. Снижение несущей способности традиционных резьбовых соединений связано с неравномерностью распределения эксплуатационной нагрузки по длине. В предлагаемом комбинированном резьбогладком соединении кроме резьбового участка формируется гладкий цилиндрический участок сопряжения деталей с промежуточным слоем анаэробного материала (АМ) между ними. Предлагается методика, описывающая напряженно-деформированное состояние элементов соединения при действии осевой эксплуатационной нагрузки и его функциональные свойства. В частности, методика позволяет найти, какая часть нагрузки воспринимается цилиндрическим участком, что важно при проектировании комбинированного соединения. Осуществлено компьютерное моделирование соединения методом конечных элементов. Установлено, что цилиндрический участок соединения с упрочняющим АМ воспринимает значительную часть эксплуатационной нагрузки на соединение, что позволяет разгрузить резьбовую часть и повысить несущую способность соединения. Дополнительно повысить прочность соединения можно путем размещения АМ в зоне контакта витков резьбы. Результаты аналитического исследования и компьютерного моделирования хорошо согласуются. Предлагаемое соединение отличается технологичностью при изготовлении, простотой сборки.

Для цитирования: Воячек И.И., Кочетков Д.В., Низов О.А. Обеспечение функциональных свойств комбинированного резьбогладкого соединения при сборке с применением анаэробных материалов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 5-16. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-5-16, EDN: UDQUQI

Введение

Применяемые в различных конструкциях резьбовые соединения (РС) деталей должны обладать статической и динамической прочностью, жесткостью конструкции, сопротивлением самоотвинчиванию. В ряде

случаев предъявляются требования герметичности, фреттингостойкости, коррозионной стойкости. Если функциональные требования не выполняются, то используют дополнительные крепежные, стопорные и разгрузочные элементы, увеличивают габариты

резьбового соединения, применяют дополнительные технологические операции, что усложняет конструкцию и повышает себестоимость узлов изделий. При этом для комплексного обеспечения совокупности функциональных свойств РС требуется система как конструкторских, так и технологических решений, что крайне нерационально [1–27].

В последнее время при сборке РС применяется весьма эффективная технология с применением анаэробных материалов (АМ). Жидкие АМ наносятся на сопрягаемые поверхности деталей и в отсутствии кислорода воздуха полимеризуются в зоне их контакта, приобретая достаточную прочность. В проспектах фирм, производящих АМ, указывается их эффективность для стопорения РС при действии динамических нагрузок, а также для обеспечения герметичности и коррозионной стойкости.

Результаты, полученные при исследовании авторов [1, 14–18] показали, что при сборке с АМ можно достигнуть повышения прочностных характеристик и жесткости РС, а также фреттингостойкости. Таким образом, при сборке с АМ достигается комплексное обеспечение требуемых функциональных свойств резьбовых и других неподвижных соединений. В частности,

авторами [19–21] проведен цикл исследований и доказано, что при применении АМ повышается статистическая и динамическая (циклическая) прочность соединений деталей с натягом. Если АМ поместить в зазор между сопрягаемыми поверхностями вала и втулки, то можно также получить достаточно прочное неподвижное соединение.

В данной статье предлагается и исследуется новая конструкция комбинированного резьбогладкого соединения (РГС). Конструкция состоит из традиционного резьбового участка соединения и гладкого цилиндрического участка соединения, в котором зазор заполнен полимеризованным АМ (Рис. 1).

На Рис. 1 обозначено: F – осевая эксплуатационная 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.

При компьютерном моделировании методом конечных элементов установлено, что наличие гладкого участка со слоем АМ в РГС, расположенного со стороны приложения эксплуатационной нагрузки, приводит к существенному уменьшению ее доли, приходящейся на резьбовой участок, особенно на наиболее нагруженный первый виток, что позволяет повысить несущую способность данных соединений [18]. Однако следует отметить, что исследования в направлении теоретического обоснования повышения несущей способности комбинированного РГС отсутствуют.

В данной работе осуществлено теоретическое описание распределения эксплуатационной осевой нагрузки между резьбовым и гладким цилиндрическим участками РГС.

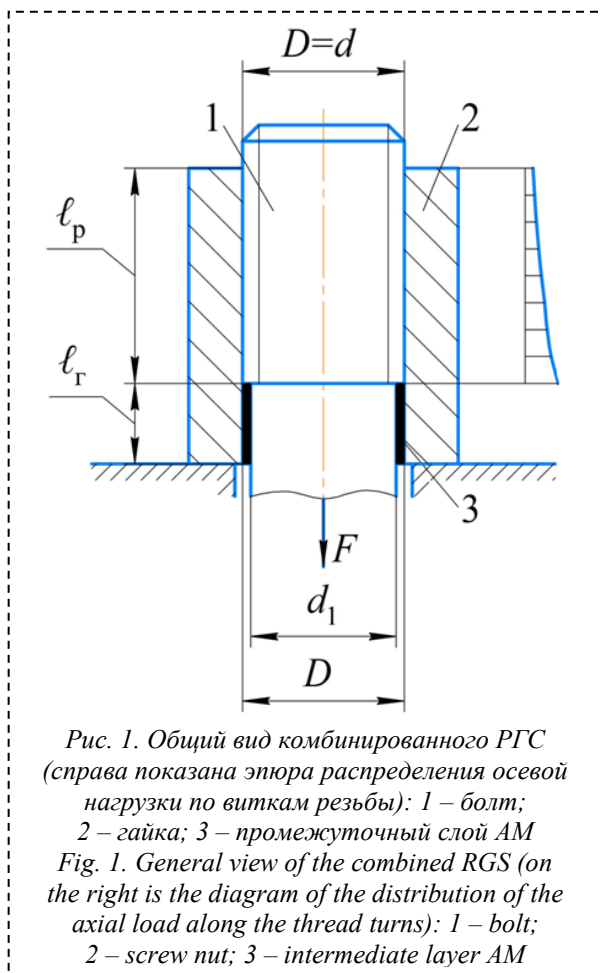
Общую осевую эксплуатационную нагрузку, действующую на РГС, можно разделить на две части:

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

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 полимеризованного 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:

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



С учетом сказанного выше можно считать, что на гладком участке относительное смещение деталей δ_r равно максимальному суммарному относительному перемещению витков $\Sigma\delta_p(z)$ на первом витке резьбового участка (ближайшего к точке приложения нагрузки), определяемому по зависимостям (9)...(13).

Следовательно,

$$\delta_r = \Sigma\delta_p(z) = \Sigma\delta_{p\max}. \quad (3)$$

На Рис. 2 показана деформация сдвига элемента контактного слоя из АМ.

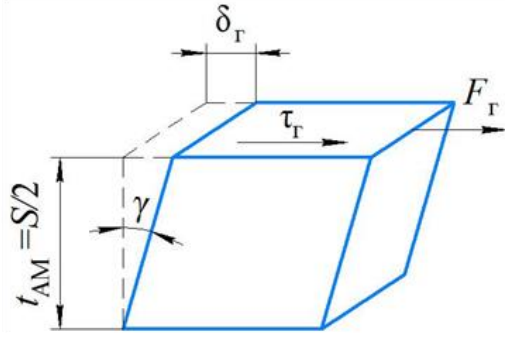


Рис. 2. Деформация сдвига элемента контактного слоя из АМ

Fig. 2. Shear deformation of the contact layer element made of AM

Как известно, модуль сдвига материала определяется отношением касательных напряжений τ_r к углу сдвига γ элемента материала. Применительно к контактному слою из АМ в гладком цилиндрическом соединении можно записать:

$$G_{AM} = \frac{\tau_r}{\gamma}. \quad (4)$$

Касательные напряжения равны:

$$\tau_r = \frac{F_r}{\pi D l_r}. \quad (5)$$

Угол сдвига весьма мал, поэтому с учетом (3) равен:

$$\gamma = \frac{\delta_r}{t_{AM}} = \frac{\Sigma\delta_{p\max}}{t_{AM}}, \quad (6)$$

где $t_{AM} = S/2$ – толщина контактного слоя АМ (S – диаметральный зазор в цилиндрическом соединении).

При подстановке (5) и (6) в (4) можно найти выражение для сдвигающей силы на гладком участке:

$$F_r = \frac{\pi D l_r \Sigma\delta_{p\max} G_{AM}}{t_{AM}}, \quad (7)$$

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:

$$G_{AM} = \frac{E_{AM}}{2(1 + \mu_{AM})}, \quad (8)$$

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 (7), в которых три взаимосвязанных величины F_p , F_r и $\Sigma\delta_{p\max}$ неизвестны. Для их нахождения используется условие совместности деформаций или перемещений при нагружении РГС и расчет ведется методом последовательных приближений.

Вначале отдельно рассматривается резьбовое соединение, нагруженное осевой силой F , то есть принимается, что вся эксплуатационная нагрузка передается резьбовым соединением $F_p = F$. При нахождении перемещений в резьбовом соединении применяется методика, разработанная Воячком И.И. и Кочетковым Д.В. в [17], согласно которой перемещения витков резьбы болта $\delta_1(z)$ и гайки $\delta_2(z)$, где z – осевая координата, а также суммарные относительные перемещения витков $\Sigma\delta_p(z)$ в резьбовых соединениях типа болт-гайка, собранных без АМ, определяются с учетом силы трения рабочих поверхностей витков резьбы по следующим зависимостям:

$$\delta_1(z) = \frac{F_i P}{s_B \left(1 + f \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right) E_1} \Lambda_1^{\text{rp}}, \quad (9)$$

$$\Lambda_1^{\text{rp}} = \left[\begin{aligned} &1 + f \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{d_1 H_1^A (1 - \mu_1)}{2 P^2} \times \\ &\times \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - f \right) \end{aligned} \right], \quad (10)$$

где

$$\delta_2(z) = \frac{F_i P}{s_B \left(1 + f \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right) E_2} \Lambda_2^{\text{rp}}, \quad (11)$$

$$\Lambda_2^{\text{rp}} = \left[\begin{aligned} &1 + f \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{D H_1^A}{2 P^2} \times \\ &\times \left(\mu_2 + \frac{D_0^2 + D^2}{D_0^2 - D^2} \right) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - f \right) \end{aligned} \right], \quad (12)$$

где

$$\Sigma\delta_p(z) = \delta_1(z) + \delta_2(z), \quad (13)$$

где F_i – нагрузка, приходящаяся на соответствующий виток; α – угол профиля резьбы; f – коэффициент трения в зоне контакта витков; P – шаг резьбы; H_1^A – высота, на которой витки болта и гайки контактируют (l_p – на Рис. 1); D_0 – наружный диаметр гайки; E_1 , E_2 и μ_1 , μ_2 –

модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов болта и гайки.

По вышеприведенным формулам определяются максимальные суммарные перемещения $\Sigma \delta_{p \max}$, которые возникают на первом витке резьбового соединения при действии прилагаемой нагрузки, то есть при $z = H_1^A = l_p$.

Таким образом, в нулевом приближении ($i = 0$), как отмечалось выше, 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 $\delta_r(i) = \Sigma \delta_{p \max}(i)$ или в нулевом приближении $\delta_r = \Sigma \delta_{p \max}^0$. Затем определяется значение нагрузки, воспринимаемой гладким участком $F_r(i)$, соответствующее перемещениям δ_r по формуле (7).

Следующим этапом является первое приближение ($i = 1$). Корректируется значение нагрузки, приходящейся на резьбовой участок по формуле:

$$F_p(i) = F_p^0 - F_r(i). \quad (14)$$

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

Затем циклы приближений повторяются. Определяется относительное перемещение на первом витке с учетом уменьшения нагрузки на резьбовое соединение. Так как в соответствии с выражениями (9) и (11) перемещения пропорциональны действующей нагрузке, то можно использовать формулу:

$$\Sigma \delta_{p \max}(i) = \Sigma \delta_{p \max}^0 \frac{F_p(i)}{F_p^0}. \quad (15)$$

Циклы повторяются до тех пор, пока не выполнится условие (16), где можно принять $\Delta = 0,01$:

$$\frac{|F_p(i) - F_p(i-1)|}{F_p(i)} \leq \Delta. \quad (16)$$

При выполнении условия (16) необходимо провести еще одну проверку, связанную с предельным значением сдвиговой прочности применяемого АМ – $\tau_{сдАМ}$. Следует выполнить проверку условия:

$$F_r(i) \leq \frac{A_{a,r} \tau_{сдАМ}}{n}, \quad (17)$$

где $A_{a,r} = \pi D l_r$ – номинальная площадь контакта деталей на гладком участке; n – коэффициент запаса прочности.

Если условие (17) не выполняется, то необходимо увеличить длину гладкого участка l_r или выбрать АМ с более высоким значением $\tau_{сдАМ}$.

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

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; $\alpha = 60$ град; $H_1^A = 8$ 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 $E_{AM} = 2,62 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu_{AM} = 0,38$, сдвиговая прочность $\tau_{AM} = 30$ МПа). Эксплуатационная осевая нагрузка, прикладываемая к резьбовому соединению, равна $F = 10$ кН.

Значения относительных перемещений в РС, определенные по формулам (9)...(13) [17] показаны на Рис. 3. Максимальные относительные перемещения возникают на первом наиболее нагруженном витке. Кроме того, с увеличением коэффициента трения перемещения уменьшаются из-за повышения общей жесткости резьбового соединения.

Используются исходные данные, приведенные выше при расчете по формулам (9)...(13). Длина гладкого участка (Рис. 1) принимается равной $l_r = 5$ мм.

Определяется константа сдвига АМ по формуле (8):

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

Нулевое приближение. В нулевом приближении, когда вся нагрузка воспринимается РС, по графикам можно принять $\delta_r = \Sigma \delta_{p \max}^0 \approx 0,004$ мм (на первом витке, см. Рис. 3, кривая 2).

Если принять $t_{AM} = S/2 = 0,1$ мм, то по формуле (8) можно найти:

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

Первое приближение. По формуле (14) определяется, какая часть нагрузки воспринимается резьбовым участком:

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

По формуле (15) корректируется максимальное перемещение:

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

и определяется нагрузка на гладком участке:

$$F_r(1) = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 0,0016 \cdot 95}{0,1} = 239 \text{ кг} = 2,39 \text{ кН}.$$

Второе приближение.

$$F_p(2) = 10 - 2,39 = 7,61 \text{ кН},$$

$$\Sigma \delta_{p\max}(2) = 0,004 \frac{7,61}{10} = 0,003 \text{ мм},$$

$$F_r(2) = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 0,003 \cdot 95}{0,1} = 447 \text{ кг} = 4,47 \text{ кН}.$$

Третье приближение.

$$F_p(3) = 10 - 4,47 = 5,53 \text{ кН},$$

$$\Sigma \delta_{p\max}(3) = 0,004 \frac{5,53}{10} = 0,0022 \text{ мм},$$

$$F_r(3) = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 0,0022 \cdot 95}{0,1} = 328 \text{ кг} = 3,28 \text{ кН}.$$

Четвертое приближение.

$$F_p(4) = 10 - 3,28 = 6,72 \text{ кН},$$

$$\Sigma \delta_{p\max}(4) = 0,004 \frac{6,72}{10} = 0,0027 \text{ мм},$$

$$F_r(4) = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 0,0027 \cdot 95}{0,1} = 403 \text{ кг} = 4,03 \text{ кН}.$$

Пятое приближение.

$$F_p(5) = 10 - 4,03 = 5,97 \text{ кН},$$

$$\Sigma \delta_{p\max}(5) = 0,004 \frac{5,97}{10} = 0,0024 \text{ мм},$$

$$F_r(5) = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 0,0024 \cdot 95}{0,1} = 358 \text{ кг} = 3,58 \text{ кН}.$$

Шестое приближение.

$$F_p(6) = 10 - 3,58 = 6,42 \text{ кН},$$

$$\Sigma \delta_{p\max}(6) = 0,004 \frac{6,42}{10} = 0,00257 \text{ мм},$$

$$F_r(6) = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 0,00257 \cdot 95}{0,1} = 383 \text{ кг} = 3,83 \text{ кН}.$$

Расчет ведется до выполнения соотношения (16). После всех итераций получено $F_r = 3,7 \text{ кН}$, $F_p = 6,3 \text{ кН}$.

Условие (17) выполняется:

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

Фиксируются значения:

$$F = 10 \text{ кН}, F_r = 3,7 \text{ кН}, F_p = 6,3 \text{ кН}, \Sigma \delta_{p\max}^0 = 0,004 \text{ мм}, \Sigma \delta_{p\max} = 0,00257 \text{ мм} = \delta_r.$$

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.

На Рис. 4 приведен алгоритм, при реализации которого определяется распределение эксплуатационной нагрузки между резьбовым и гладким участками соединения.

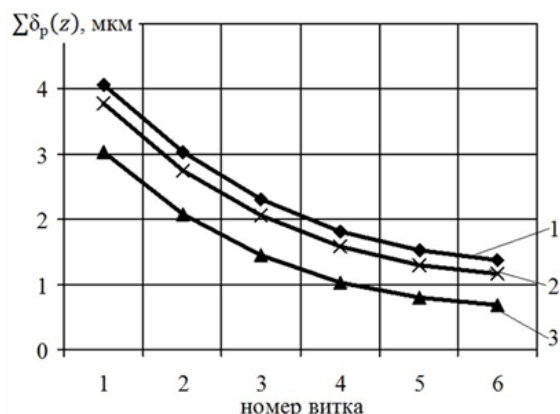


Рис. 3. Суммарные относительные перемещения в зоне резьбового контакта болта и гайки $\Sigma \delta_p(z)$:

1 - $f = 0$; 2 - $f = 0,1$; 3 - $f = 0,4$

Fig. 3. Total relative displacements in the threaded contact zone of the bolt and screw nut $\Sigma \delta_p(z)$:

Полученные выше результаты коррелируются с данными компьютерного моделирования.

На Рис. 5 представлена твердотельная расчетная модель РГС с приложением осевой нагрузки, в которой АМ заполняет зазоры на гладком участке.

При компьютерном моделировании методом конечных элементов определялось распределение нагрузки F по виткам резьбы в РГС (Таблица 1). Исходные данные при моделировании соответствовали примеру расчета.

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

Заключение

При исследовании характеристик резьбогладкого соединения установлено, что гладкий участок с прослойкой из АМ воспринимает существенную часть эксплуатационной нагрузки, уменьшаются также перемещения в зоне резьбового контакта, повышается жесткость, снижается концентрация напряжений. Все это значительно повышает несущую способность соединения, особенно при воздействии переменного нагружения.

Таким образом, в РГС происходит разделение функций. Резьбовой участок нагружается при сборке в момент затягивания резьбового

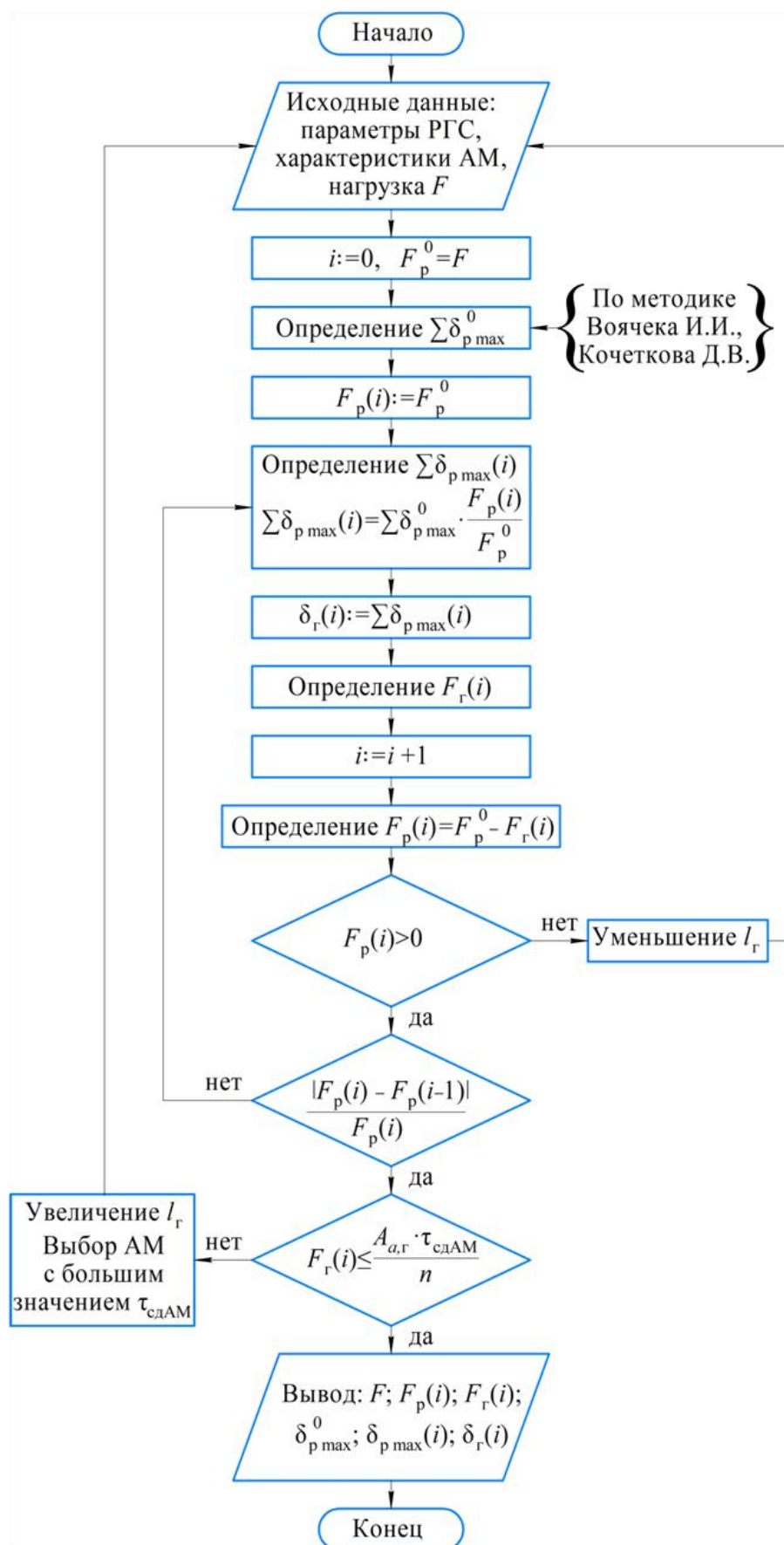


Рис. 4. Алгоритм определения параметров РГС
Fig. 4. Algorithm for determining parameters RGS

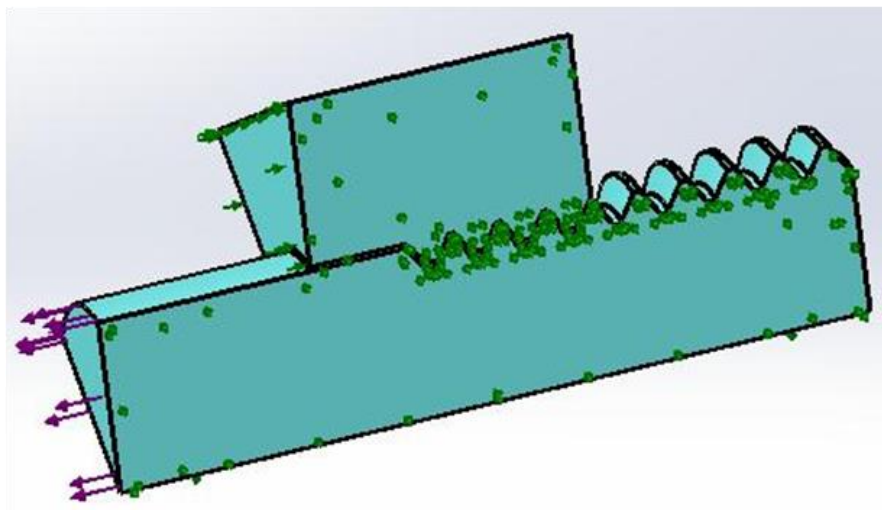


Рис. 5. Твердотельная расчетная модель резьбогладкого соединения
(на гладком участке в зазоре между деталями находится АМ)
Fig. 5. Solid-state calculation model of a threaded smooth connection
(on the smooth section in the gap between the parts there is AM)

Таблица 1. Распределение нагрузки по виткам РГС при сборке с АМ
Table 1. Distribution of load on RGS turns during assembly with AM

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-ый виток	2-ый виток	3-ый виток	4-ый 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

соединения. В процессе эксплуатации РГС нагрузку наряду с резьбовым участком в значительной степени воспринимает цилиндрический участок с прослойкой из АМ. С увеличением площади гладкого цилиндрического участка его несущая способность возрастает. Следует отметить, что РГС обеспечивает надежную передачу нагрузки при действии не только осевой силы, но и изгибающего момента.

Проектировать РГС можно путем создания специальной конструкции. Однако можно использовать стандартные крепежные элементы, применяя высокую или особо высокую гайку, у которой срезается несколько витков, и болты с короткой резьбовой частью. Сборка с АМ достаточно проста и заключается в очистке, обезжиривании сопрягаемых поверхностей, нанесении АМ на одну или обе поверхности, завинчивании и выдержке соединения до полимеризации АМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воячек И. И. Обеспечение качества неподвижных соединений на основе интеграционной системы конструкторско-технологического проектирования : автореферат на

соискание ученой степени доктора технических наук. Пенза, 2006. 42 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003268872?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 22.03.2025).

2. Биргер И. А. [и др.] Расчет на прочность деталей машин: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1993. 640 с. URL: https://cloud.mail.ru/public/We88/Rqtaa3yJL?dialog=EBOOK_READER&from=viewer (дата обращения: 22.03.2025).

3. Иванов М. Н. Детали машин: Учеб. для студентов вузов / Под ред. В. А. Филинонова. – 6-е изд., перераб. М. : Высш. шк., 2000. 383 с. URL: <https://djvu.online/file/nj3gEfKTIpauT?ysclid=m7yer6ho86411352029> (дата обращения: 22.03.2025).

4. Андриенко Л. А., Байков Б. А., Ганулич И. К. [и др.] Детали машин: Учебник для вузов / Под ред. О. А. Ряховского. М. : Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2002. 544 с. URL: <https://djvu.online/file/j5SfMbFmNMNe2?ysclid=m7yf44w4v1411640711> (дата обращения: 22.03.2025).

5. Сухов А. В., Сундуков С. К., Фатюхин Д. С. Сборка резьбовых и клеерезьбовых соединений с наложением ультразвуковых колебаний // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2024. Т. 26. № 3. С. 6–23. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-6-23.

6. Барабанова И. А. Анализ распределения нагрузки по виткам в резьбовых соединениях и способов обеспечения ее равномерности // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 1(139). С. 20–23. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-1-20-23.
7. Мольцен С. Н., Кравченко А. В., Симонов Ю. Н., Полежаев Р. М. Повышение долговечности резьбовых соединений штоков при циклической нагрузке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2021. № 2(23). С. 27–35. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.04.
8. Зенков С. Г. Работоспособность резьбовых и штифтовых соединений в условиях интенсивного вибрационного нагружения // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 3(389). С. 173–179. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-173-179.
9. Прокофьев А. Н. Технологическое обеспечение и повышение качества резьбовых соединений : автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. Брянск, 2008. 34 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003172196?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 22.03.2025).
10. Марков А. М., Некрасов В. Н., Салман А. М., Гайст С. В., Цзянь С. Исследование влияния технологических параметров на прочность резьбового соединения в деталях из углепластика // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. № 2. С. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-6-15.
11. Зайцев А. Н. Определение предельно допустимого коэффициента трения в болтовых соединениях модулей бланкета ИТЭР // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 1. С. 3–20. DOI: 10.18698/0536-1044-2024-01-3-20.
12. Ланщиков А. В. Технологические методы обеспечения качества автоматизированной сборки резьбовых соединений : автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. Пенза, 2004. 39 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003248389?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 22.03.2025).
13. Лебедев П. В. Технологическое обеспечение качества резьбовых соединений в деталях из высокопрочных композиционных полимерных материалов : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Барнаул, 2011. 16 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005004321?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 22.03.2025).
14. Шакурова А. М. Технологическое обеспечение качества резьбовых соединений путем применения капсулированных полимерных материалов при сборке : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2015. 22 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005570619?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 22.03.2025).
15. Зиновьев В. Е., Хачкина А. Е., Зиновьев Н. В. Исследование статической прочности неподвижных соединений, собранных с применением полимерных анаэробных материалов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. № 1(224). С. 12–16.
16. Игнатов А. В. Новые тенденции развития сборки клеевых соединений в машиностроении // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 10. С. 62–68.
17. Кочетков Д. В. Технологическое обеспечение прочности и жесткости резьбовых соединений при сборке с применением анаэробных материалов : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пенза, 2010. 21 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01004617426?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 22.03.2025).
18. 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. Сборник статей XI Международной научно-практической конференции. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2017. С. 3–8.
19. Евстифеева Е. А. Технологическое обеспечение прочностных характеристик соединений с натягом при сборке с анаэробными материалами : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пенза, 2009. 21 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003492582?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 22.03.2025).
20. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Тарханов А. Д., Истомина Ю. В. Новая методика проектирования соединений с натягом при применении упрочняющей технологии // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 118–129. DOI: 10.21685/2072-3059-2024-4-10.
21. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Грошев А. А. Особенности формирования контакта деталей при сборке спиралевидного фрикционно-профильного соединения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 4 (164). С. 32–41. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-32-41, EDN: CDMIPG.
22. Oskouei R. H., Chakherlou T. N. Reduction in clamping force due to applied longitudinal load to aerospace structural bolted plates // Aerosp. Sci. Technol. 2009. Vol. 13. P. 325–330. DOI: 10.1016/j.ast.2009.06.001.
23. Nassar S. A., Matin P. H. Clamp load loss due

to fastener elongation beyond its elastic limit // J. Press Vessel Technol. 2006. Vol. 128. P. 379–387. DOI: 10.1115/1.2217971.

24. Liu J. H., Ouyang H. J., Feng Z. Q., Cai Z. B., Liu X. T. [et al.] Study on self-loosening of bolted joints excited by dynamic axial load // Tribology International. 2017. Vol. 115. P. 432–451. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.037. hal-02398144. URL: <https://univ-evry.hal.science/hal-02398144/file/liu2017.pdf> (дата обращения: 28.03.2025).

25. Huda F., Kajiwaru I., Hosoya N., Kawamura S. Bolt loosening analysis and diagnosis by non-contact laser excitation vibration tests // Mech. Syst. Signal

Process. 2013. Vol. 40. P. 589–604. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.05.023.

26. Zhang M., Jiang Y., Lee C. H. An experimental investigation of the effects of clamped length and loading direction on self-loosening of bolted joints // J. Press Vessel Technol. 2006. Vol. 128. P. 388–393. DOI: 10.1115/1.2217972.

27. Dziubek T., Budzik G., Kawalec A., Debski M., et al. Strength of threaded connections additively produced from polymeric materials // Polimery. 2022. Vol. 67(6). Pp. 261–270. DOI: 10.14314/polimery.2022.6.4.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Воячек Игорь Иванович, профессор кафедры технологий и оборудования машиностроения, Пензенский государственный университет, (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3423-4182>, e-mail: voyachek@list.ru

Кочетков Денис Викторович, заведующий кафедрой металлорежущих станков, Пензенский государственный университет, (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0506-4025>, e-mail: denis.kochetkov80@yandex.ru

Низов Олег Алексеевич, магистрант кафедры технологий и оборудования машиностроения, Пензенский государственный университет, (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0588-6320>, e-mail: nizovol@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Воячек Игорь Иванович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Кочетков Денис Викторович – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Низов Олег Алексеевич – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

ENSURING FUNCTIONAL PROPERTIES OF A COMBINED THREADED-SMOOTH CONNECTION DURING ASSEMBLY USING ANAEROBIC MATERIALS

Igor I. Voyachek, Denis V. Kochetkov,
Oleg A. Nizov

Penza State University

* for correspondence: voyachek@list.ru



Article info

Received:

04 April 2025

Accepted for publication:

22 September 2025

Accepted:

30 September 2025

Published:

23 October 2025

Keywords: threaded smooth connection; functional properties; anaerobic material; strength; load-bearing capacity.

Abstract.

The article is devoted to the study of the functional properties of a new combined smooth-threaded connection, in the assembly of which polymer anaerobic materials are used, placed in the voids of the contact zone of the parts. A decrease in the bearing capacity of traditional threaded connections is associated with uneven distribution of the operating load along the length. In the proposed combined smooth-threaded connection, in addition to the threaded section, a smooth cylindrical section of the mating parts with an intermediate layer of anaerobic material (AM) between them is formed. A technique is proposed that describes the stress-strain state of the joint elements under the action of axial operating load and its functional properties. In particular, the technique allows us to find what part of the load is supported by the cylindrical section, which is important when designing a combined connection. Computer modeling of the connection using the finite element method is carried out. It is found that the cylindrical section of the connection with strengthening AM supports a significant part of the operating load on the connection, which allows unloading the threaded part and increasing the bearing capacity of the connection. The strength of the connection can be further increased by placing AM in the contact zone of the thread turns. The results of the analytical study and computer modeling are in good agreement. The proposed connection is characterized by its technological effectiveness in manufacturing and ease of assembly.

For citation: Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Nizov O.A. Ensuring functional properties of a combined threaded-smooth connection during assembly using anaerobic materials. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 5(171):5-16. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-5-16, EDN: UDQUQI

REFERENCES

1. Voyachek I.I. Ensuring the quality of fixed joints based on an integrated system of design and technological design : abstract for the degree of Doctor of Technical Sciences. Penza; 2006. 42 p. Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003268872?page=1&rotate=0&theme=white> (accessed 22.03.2025). (In Russ.)
2. Birger I.A. [et al.] Machine Part Strength Calculation: reference book / 4th ed., rev. and add. M.: Mashinostroenie; 1993. 640 p. Available at: https://cloud.mail.ru/public/We88/Rqtaa3yjL?dialog=EB_OOK_READER&from=viewer (дата обращения: 22.03.2025). (In Russ.)
3. Ivanov M.N. Machine Parts: Textbook for High Schools / Ed. V.A. Finogenova. 6-th ed., rev. M.: Vysshaya shkola; 2000. 383 p. Available at: <https://djvu.online/file/nj3gEfKTlpauT?ysclid=m7yep6h086411352029> (дата обращения: 22.03.2025).
4. Andrienko L.A., Baikov B.A., Ganulich I.K. [et al.] Machine parts: Textbook for universities / Ed. O.A. Ryakhovsky. M.: Bauman University Publishing House; 2002. 544 p. Available at: <https://djvu.online/file/j5SfMbFmNMNe2?ysclid=m7yef44w4v1411640711> (дата обращения: 22.03.2025).
5. Sukhov A.V., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Assembly of threaded and adhesive-threaded joints with the application of ultrasonic vibrations. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*. 2024; 26:3:6–23. (In Russ.) DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-6-23.
6. Barabanova I.A. Study case of the load shaping in threaded fastening turns and technique analysis of the ways for ensuring balancing load. *Science intensive technologies in Mechanical Engineering*. 2023; 1(139):20–23. (in Russ.) DOI: 10.30987/2223-4608-2023-1-20-23.

7. Moltsen S.N., Kravchenko A.V., Simonov Yu.N., Polezhayev R.M. Improvement of valve rods thread connection run life at cyclic loading. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2021; 2(23):27–35. (in Russ.) DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.04.
8. Zenkov S. Operability of threaded and studded joints under intense vibration load. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019; 3(389):173–179. (in Russ.) DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-173-179.
9. Prokofiev A.N. Technological support and improvement of the quality of threaded connections : abstract for the degree of Doctor of Technical Sciences. Bryansk, 2008. 34 p. Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003172196?page=1&rotate=0&theme=white> (accessed 22.03.2025). (In Russ.)
10. Markov A.M., Nekrasov V.N., Salman A.M., Gayst S.V., Su J. Study of the influence of technological parameters on the strength of a threaded connection in carbon fiber parts. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*. 2020; 22(2):6–15. (In Russ.) DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-6-15.
11. Zaytzev A.N. Assessing the maximum permissible friction coefficient in bolted joints of the ITER blanket modules. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024; 1:3–20. (in Russ.) DOI: 10.18698/0536-1044-2024-01-3-20.
12. Lanshchikov A.V. Technological methods for ensuring the quality of automated assembly of threaded connections : abstract for the degree of Doctor of Technical Sciences. Penza, 2004. 39 p. Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003248389?page=1&rotate=0&theme=white> (accessed 22.03.2025). (In Russ.)
13. Lebedev P.V. Technological quality assurance of threaded connections in parts made of high-strength composite polymer materials : abstract for the degree of candidate of technical sciences. Barnaul, 2011. 26 p. Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005004321?page=1&rotate=0&theme=white> (accessed 22.03.2025). (In Russ.)
14. Shakurova A.M. Technological quality assurance of threaded connections by using encapsulated polymer materials during assembly: abstract for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 2015. 22 p. Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005570619?page=11&rotate=0&theme=white> (accessed 22.03.2025). (In Russ.)
15. Zinov'ev V.E., Khachkinayan A.E., Zinov'ev N.V. The study of the static strength of fixed connections assembled with the use of polymeric anaerobic compositions. *News of the Volgograd State Technical University*. 2019; 1(224):12–16. (In Russ.)
16. Ignatov A.V. New trends in the development of adhesive joint assembly in mechanical engineering. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2021; 10:62–68.. (In Russ.)
17. Kochetkov D.V. Technological support for the strength and rigidity of threaded connections during assembly using anaerobic materials: abstract for the degree of candidate of technical sciences. Penza, 2010. 21 p. Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01004617426?page=1&rotate=0&theme=white> (accessed 22.03.2025). (In Russ.)
18. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Vanteev A.N., Fadeev N.A., Baranov I.V. Load distribution in a threaded smooth joint during assembly with anaerobic materials. *Design, modeling, manufacturing preparation and project management systems CAD/CAM/CAE/PDM. Collection of articles of the XI International scientific and practical conference*. Penza: Privolzhsky House of Knowledge; 2017. P 3-8. (In Russ.)
19. Evstifeeva E.A. Technological support of strength characteristics of tension joints during assembly with anaerobic materials : abstract for the degree of candidate of technical sciences. Penza, 2009. 21 p. Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003492582?page=1&rotate=0&theme=white> (accessed 22.03.2025). (In Russ.)
20. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Tarkhanov A.D., Istomina Yu.V. New methodology for designing tension joints using strengthening technology. *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024; 4:118–129. (In Russ.) DOI: 10.21685/2072-3059-2024-4-10.
21. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Groshev A.A. Features of forming contact of parts during assembly of a spiral friction-profile connection. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta=Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2024; 4(164):32–41. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-32-41, EDN: CDMIPG.
22. Oskouei R.H., Chakherlou T.N. Reduction in clamping force due to applied longitudinal load to aerospace structural bolted plates. *Aerosp. Sci. Technol.* 2009; 13:325–330. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.ast.2009.06.001.
23. Nassar S.A., Matin P.H. Clamp load loss due to fastener elongation beyond its elastic limit // *J. Press Vessel Technol.* 2006; 128:379–387. (In Eng.) DOI: 10.1115/1.2217971.
24. Liu J.H., Ouyang H.J., Feng Z.Q., Cai Z.B., Liu X.T., et al. Study on self-loosening of bolted joints excited by dynamic axial load. *Tribology International*. 2017; 115:432–451. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.037. hal-02398144. Available at: <https://univ-evry.hal.science/hal-02398144/file/liu2017.pdf> (accessed: 28.03.2025).
25. Huda F., Kajiwarra I., Hosoya N., Kawamura S. Bolt loosening analysis and diagnosis by non-contact laser excitation vibration tests. *Mech. Syst. Signal Process.* 2013; 40:589–604. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.05.023.
26. Zhang M., Jiang Y., Lee C.H. An experimental investigation of the effects of clamped length and loading direction on self-loosening of bolted joints. *J. Press Vessel Technol.* 2006; 128:388–393. (In Eng.) DOI: 10.1115/1.2217972.

27. Dziubek T., Budzik G., Kawalec A., Debski M., et al. Strength of threaded connections additively produced from polymeric materials. *Polimery*. 2022;

67(6):261–270.

(In

Eng.)

DOI: 10.14314/polimery.2022.6.4.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Igor I. Voyachek, professor of the sub-department of mechanical engineering technologies and equipment, Penza State University (440026, Russia, Penza, Street Krasnaya, 40), Doctor of engineering sciences, professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3423-4182>, e-mail: voyachek@list.ru

Denis V. Kochetkov, head of the sub-department of Metal cutting machines, Penza State University (440026, Russia, Penza, Street Krasnaya, 40), Candidate of engineering sciences, associate professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0506-4025>, e-mail: denis.kochetkov80@yandex.ru

Oleg A. Nizov, Master's degree student of the Department of mechanical engineering technologies and equipment, Penza State University (440026, Russia, Penza, Street Krasnaya, 40), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0588-6320>, e-mail: nizovol@yandex.ru

Contribution of the authors:

Igor I. Voyachek – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

Denis V. Kochetkov – scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

Oleg A. Nizov – scientific management, review of relevant literature, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

All authors have read and approved the final manuscript.

