

УДК 621.753

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-11-51-59

Н. Е. Курносков, А. В. Тарнопольский, Ю. Ю. Накашидзе

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ В СОЕДИНЕНИЯХ ДЕТАЛЕЙ С НАТЯГОМ

Выполнено повышение надежности соединений с натягом в процессе их эксплуатации. Проведены теоретические и экспериментальные исследования, повышающие герметичность соединений с натягом при динамической нагрузке. Новизна работы состоит в применении регулярного микро-рельефа и специальных видов покрытий поверхно-

стей сопрягаемых деталей. Доказано, что применение мягких покрытий сопрягаемых поверхностей решает задачу повышения герметичности и надежности соединений с натягом.

**Ключевые слова:** герметичность соединений с натягом, микрогеометрия, материал и покрытия сопрягаемых поверхностей.

N. E. Kurnosov, A. V. Tarnopolsky, Yu. Yu. Nakashidze

## ENSURING TIGHTNESS IN PRESSURE COUPLING PARTS

Work objective is to solve the urgent problem of increasing the tightness and reliability of pressure couplings during their operation under dynamic loads.

Theoretical and experimental studies assessing the impact on the tightness due to roughness nature of mating surfaces and three types of coatings: soft, double-layer and hard have been undertaken. The joints were tested under the influence of axial cyclic load and torque on a bench for accelerated testing.

It is established that tightness of pressure couplings during operation under dynamic loads significantly depends on the parameters of microgeometry

and physical and mechanical properties of the mating surface material that determine their actual contact area. Recommendations for preparing the surfaces of parts before pressure coupling assembling have been developed.

It is proved that the use of regular microrelief and soft galvanic coatings of mating surfaces have a significant effect on the tightness of pressure couplings.

**Key words:** pressure coupling tightness, microgeometry, material and coating of mating surfaces.

### Введение

Герметичность в соединениях деталей машин и механизмов, выполненных по посадке с натягом, в значительной степени определяется физико-механическими характеристиками применяемых материалов. Соединения с натягом работают, как правило, в тяжелых эксплуатационных условиях, в частности, в среде агрессивных газов или вакуума под действием значительных знакопеременных нагрузок и температур. Опыт промышленного применения соединений деталей с натягом, воспринимающих переменные нагрузки и температуры показывает, что их прочность и герметичность со временем снижаются. Однако до настоящего времени вопросы обеспечения герметичности соединений с натягом, в частности, при воздействии пе-

ременных нагрузок и большого перепада температур, разработаны недостаточно.

В данной работе показано, что, характеристики микро-рельефа и физико-механические свойства сопрягаемых поверхностей оказывают значительное влияние на плотность контакта. Проведены экспериментальные исследования прочности соединений при применении трех видов покрытий: мягких, двухслойных, твердых. Установлено, что за счет применения мягких покрытий можно существенно повысить фактическую площадь контакта и герметичность соединений. Разработаны обоснованные рекомендации по выбору характеристик деталей перед сборкой соединений с натягом.

### Проектирование герметичных соединений с натягом

Известны технические решения, повышающие герметичность соединения деталей в посадках с натягом за счет применения дополнительных закладных герметизирующих элементов, либо с пределом текучести меньше, чем у материалов соединяемых деталей (патент РФ № 1315670), либо в виде упругого тороидального элемента, выполненного из эластомерного материала (патент РФ № 2112157). Однако более значимы и существенны технические решения, позволяющие установить взаимосвязь технологического обеспечения характеристик поверхностного слоя и условий контактного взаимодействия сопрягаемых поверхностей деталей.

Установлено, что характеристики микрорельефа и физико-механические свойства поверхностных слоев сопрягаемых поверхностей оказывают значительное влияние на плотность и герметичность контакта [9]. Примерами такого соединения являются неподвижные посадки ряда деталей самолетов, обитаемых космических станций, двигателей внутреннего сгорания и др. Соединение деталей с натягом, спроектированное по известной методике, не обеспечивает достаточной надежности и герметичности при эксплуатации. Поэтому исследование эффективного способа повышения герметичности и надежности соединений с натягом, который состоит в применении регулярного микрорельефа поверхностей и специальных видов покрытий сопрягаемых деталей, является актуальной задачей.

Таким образом, управление микрогеометрией сопрягаемых поверхностей при применении различных технологических методов их обработки, а также использо-

вание специальных видов гальванических покрытий, позволит повысить герметичность и прочность соединений с натягом в условиях динамического нагружения. Как показано в работах [4-5,10-13], надежность машин зачастую определяется именно характером контактного взаимодействия их деталей: фактической площадью контакта, контактной жесткостью деталей и видом гальванического покрытия. В настоящее время вопросы обоснованного выбора технологических режимов механической обработки сопрягаемых поверхностей с учетом их контактного взаимодействия и влияния методов сборки на герметичность соединений с натягом являются актуальными.

Герметичность соединения можно оценить плотностью стыка - величиной, характеризующей соотношение между объемом материала в стыке  $V_M$  и объемом стыка  $V_{СТ}$  [5]. Плотность стыка связана с фактической площадью контакта и, как показано в работе [11] с относительной площадью контакта. Данные подходы позволяют прогнозировать как прочность, так и герметичность соединений деталей на стадии проектирования.

Методика определения плотности стыка в соединении при поперечной сборке и при контактном взаимодействии твердой и мягкой сопрягаемых поверхностей приведена в работе [10]. При использовании предложенной аппроксимации кривой опорной поверхности могут быть получены выражения, определяющие отношение объема материала в стыке  $V_M$  к объему стыка  $V_{СТ}$  (рис. 1).

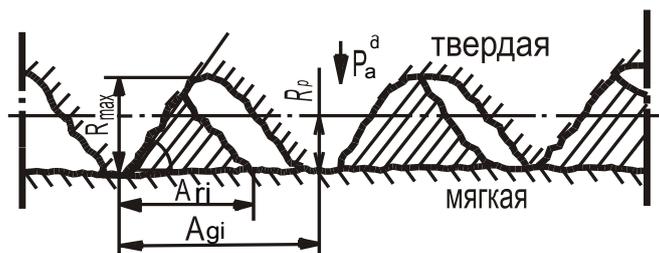


Рис. 1. Контактное взаимодействие профилей шероховатости твердой и мягкой сопрягаемых поверхностей при поперечной сборке

При значении относительного внедрения  $0 < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{Rp}$ , плотность стыка

$$\Omega = \frac{V_M}{V_{CT}} = \frac{V_M}{(1 - \varepsilon_1)A_C R_{MAX}} = \frac{b(\varepsilon_{Rp}^{V+1} - \varepsilon_1^{V+1})}{(v+1)(v - E_1)} + \frac{(1 - \varepsilon_{Rp})(q - \bar{\eta}_{rc})}{(v - \varepsilon_1)(q + 1)}, \quad (1)$$

где  $R_p$  и  $\varepsilon_{Rp} = \frac{R_p}{R_{max}}$  - абсолютное и относительное

расстояние от линии выступов до средней линии профиля шероховатости;  $\eta_{r1,c}$  - относительная опорная площадь на уровне средней линии шероховатости;  $b$ ,  $V$  - параметры степенной аппроксимации начального участка кривой относительно опорной поверхности [5];  $\varepsilon_1 = \frac{a_1}{R_{max}}$  -

максимальное значение относительного внедрения, равное  $\varepsilon_1 = \left(\frac{\eta_{rc}}{b}\right)^{\frac{1}{v}}$ ;

$$q = 5 - 2\bar{\eta}_{rc} \frac{R_p}{R_a}.$$

При  $0 < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{Rp}$ , плотность стыка поверхностей вала и втулки равна

$$\Omega = 1 - \frac{1 - \bar{\eta}_{rc}}{q + 1} \left(\frac{1 - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_{Rp}}\right)^q, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_1 = 1 - (1 - \varepsilon_{Rp}) \left(\frac{1 - \eta_{rc}}{1 - \bar{\eta}_{rc}}\right)^{\frac{1}{q}}$ .

Значения  $\varepsilon_{Rp}$  и  $\bar{\eta}_{rc}$  могут быть найдены по экспериментальным данным с использованием профилограмм или аналитически [3]:

$$\varepsilon_{Rp} = \frac{1}{R_{max}} \left[ \frac{R_a R_{max}^v (v + 1)}{2b} \right]^{\frac{1}{1+v}}; \quad (3)$$

$$\bar{\eta}_{rc} = \left[ \frac{R_a (v + 1)}{2R_{max}} \right]^{\frac{v}{v+1}} b^{\frac{1}{v+1}}. \quad (4)$$

Основное соотношение для определения  $\bar{\eta}_{rc}$ , предложенное в настоящей работе, имеет вид:

$$\frac{p_a^{\circ}}{m \sigma_T \eta_{c1a}} = 1,15 \ln \frac{1}{1 - \eta_{rc}} + 0,6 \eta_{rc}. \quad (5)$$

где  $m = \frac{H_{\mu\text{пов}}}{H_{\mu\text{исх}}}$ , здесь  $H_{\mu\text{пов}}$  и  $H_{\mu\text{исх}}$  -

поверхностная микротвердость и микротвердость материала;  $p_a^{\circ}$  - действительное номинальное давление в области контактного взаимодействия;  $\sigma_T$  - предел текучести более мягкого из контактирующих материалов.

В области упругих деформаций давление  $p_a^{\circ}$  может быть найдено с использованием выражения Ляме-Годолина. При этом необходимо учесть уменьшение натяга на величину сближения сопрягаемых поверхностей за счет сглаживания неровностей мягкой поверхности  $\delta_{ce} = 2R_p^M$  и глубины внедрения неровностей твердой поверхности  $\delta_{вн}$  в мягкую поверхность [9]. Кроме того, необходимо учитывать краевой эффект, влияющий на изменение фактической площади контакта. Обычно для учета краевого эффекта вводится поправочный коэффициент  $k_1$  [9].

При продольной сборке деталей с натягом (под прессом), выполненных из материалов разной твердости, неровности более твердой поверхности срезают частицы мягкой поверхности, которые размещаются в пустотах зоны контакта (рис. 2).

На плотность стыка в этом случае влияет степень заполнения пустот профиля твердой поверхности, характеризуемая коэффициентом  $K_3$ .

$$\Omega = 1 + V_{\Pi}' (K_3 - 1), \quad (6)$$

где  $V_{\Pi}'$  - относительный объем пустот на части твердой поверхности, участвующей в контакте.

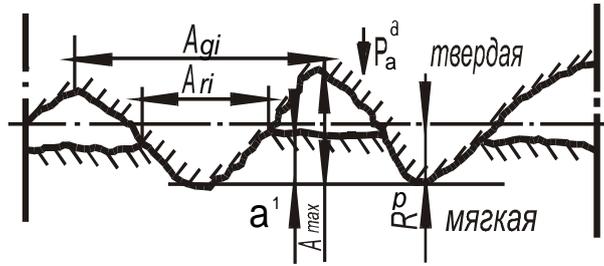


Рис. 2. Продольная сборка с натягом деталей, изготовленных из материалов различной твердости

$$V_{\Pi}' = 1 - \left[ b \frac{\varepsilon_{Rp}^{v+1}}{v+1} + (1 - \varepsilon_{Rp}) \left( \frac{q + \bar{\eta}_{rc}}{q+1} \right) \right]. \quad (7)$$

Используя соотношение  $\frac{p_a^{\delta} \eta_{ca}}{K_{cd}} = \frac{A_r}{A_c}$  [8], при выполнении условия

$$\frac{p_a^{\delta}}{\eta_{ca} K_{cd}} \leq \frac{\operatorname{tg} \alpha + 1}{2}, \quad (8)$$

можно найти

$$K_3 = \frac{V_{cp}}{V_{\Pi}} = \left( \frac{p_a^{\delta}}{\eta_{ca} K_{cd}} \right)^2 \frac{2}{\operatorname{tg} \alpha + 1}, \quad (9)$$

где  $V_{\Pi}$  – объем пустот;  $V_{cp}$  – объем срезаемого материала;  $K_{cd} = \frac{m\sigma_T}{2}$  – константа сдвига (пластическая постоянная) мягкого материала.

Для определения  $p_a^{\delta}$  при продольной сборке соединения необходимо знать уменьшение измеренного натяга за счет сглаживания и среза частиц с мягкой по-

верхности [2]. Экспериментальными исследованиями установлено, что величина, характеризующая сьем материала по длине детали с более мягкой поверхностью, изменяется по закону, близкому к линейному. Выполняя усреднение, можно с некоторым приближением найти фактический натяг:

$$V_{cp} = V_{\Pi} K_3 = A_a \eta_{ca} R_{max} V_{\Pi}' K_3; \quad (10)$$

$$N_{\phi} = N_{изм} - 2 \left( R_p^m + \frac{V_{cp}}{A_a} \right) = N_{изм} - 2 \left( R_p^m + \eta_{ca} \cdot V_{\Pi}' \cdot R_{max} \cdot K_3 \right). \quad (11)$$

Приведенные выражения позволяют определить плотность стыка поверхностей на контурной площади контакта. При оценке по номинальной площади контакта плотность стыка можно приближенно определить, как

$$\Omega' = \Omega \eta_{ca}. \quad (12)$$

Сопоставляя рассмотренные выше выражения, можно заключить, что плотность стыка (герметичность) соединения с натягом зависит от ряда параметров:

$$\Omega = f(R_a, R_{max}, R_p, b, v, R_p^m, \eta_{ca}, \sigma_T, m, p_a^{\delta}). \quad (13)$$

Таким образом, управляя параметрами, входящими в функцию, можно получить соединение, обеспечивающее требуемую герметичность. С другой стороны, негерметичность соединения, характеризу-

емая величиной течи  $W$  л×мкм/с, связана, соответственно, с пористостью зоны контакта;

$$W = 1 - \Omega. \quad (14)$$

### Методика исследования герметичности соединения деталей с натягом

Рассмотрим пример оценки герметичности зоны контакта соединения с натягом. Исследование прочности и герметичности соединений с натягом производилось на основе использования различных видов покрытий сопрягаемых деталей. Изменялись конструктивные особенности сопрягаемых деталей, диапазоны варьирования параметров шероховатости и натяга в экспериментальных образцах соединений:

Посадочные поверхности деталей обрабатывались точением и шлифованием, валы дополнительно обрабатывались виброобкаткой. На валы гальваническим способом наносились металлические покрытия, толщина которых входила в измеренный натяг. Требуемые натяги обеспечивались при изменении наружного диаметра валов. Параметры шероховатости определялись по результатам обработки профилограмм. Параметры волнистости поверхностей контролировались по профилограммам на увеличенной базовой длине (до 6 мм). После измерения осуществлялся подбор пар деталей, в результате которого разброс средних натягов и

высотных параметров шероховатости не превышал  $\pm 10\%$  от необходимого значения.

Сборка деталей соединений проводилась как поперечным методом, с нагревом охватывающей детали в муфельной печи модели МП – 2УМ, так и продольным методом путем запрессовки на гидравлических прессах модели П125 и П – 4726 при скорости запрессовки 2 мм/мин с записью диаграмм усилия запрессовки в координатах усилие – перемещение.

Для осуществления сборки с нагревом охватывающая деталь помещалась в специальную обойму (рис. 3) уменьшающую скорость ее остывания на воздухе.

Температура нагрева втулки выбиралась в зависимости от величины натяга и необходимого сборочного зазора. Так как коэффициент линейного расширения сплавов у цветных металлов (бронза, латунь) значительно больше, чем у стали, то при нагреве вала из сплава цветного металла за счёт тепла нагретой стальной втулки возможно пластическое обжатие вала, что приводит к потере натяга при остывании соединения.

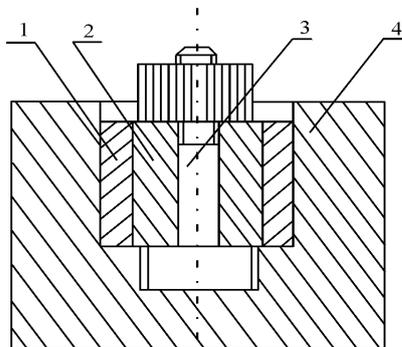
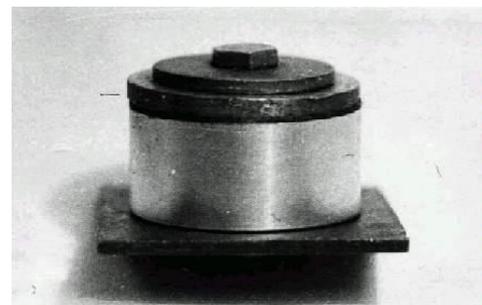


Рис. 3. Приспособление для поперечной сборки соединения с нагревом втулки: 1 – втулка; 2 – вал; 3 – оправка; 4 – обойма



Для исключения из-за этого эффекта искажений результатов экспериментов по определению фактической площади контакта и прочности соединений, а также для центрирования вала и втулки при сборке вал фиксировался оправкой (см. рис. 3). После схватывания деталей соединение вынималось из стакана и устанавливалось на металлическую плиту. Контакт соединения с плитой осуществлялся через

оправку. Таким образом, за счет увеличения массы нагреваемых деталей и интенсивного отвода тепла от вала, его средняя температура в течение времени ее снижения поддерживалась существенно ниже температуры втулки. Кроме того, при необходимости, (например, для значительных натягов  $N_{изм} = 45 \div 70$  мкм) вал с оправкой предварительно охлаждался в

морозильной камере модели АХК-6 до 223 К, т. е. применялся комбинированный метод сборки.

Соединения испытывались при воздействии осевой циклической нагрузки и при воздействии крутящего момента на стенде для ускоренных испытаний, позво-

ляющем варьировать интенсивность и частоту нагружения.

Распрессовка образцов осуществлялась на прессах модели П-125, скручивание проводилось в специальном разработанном для испытаний приспособлении с фиксацией начального усилия срыва.

### Результаты экспериментальной оценки герметичности соединений

Результаты экспериментальных исследований относительной фактической площади контакта и плотности контакта от измеренного натяга при сборке с нагревом втулки, представлены на рис. 4. Материал втулки – сталь 45, материал вала – бронза

Бр.0Ц10-2. Сопрягаемый диаметр  $D = 30$  мм; наружный диаметр втулки  $D_1 = 50$  мм; внутренний диаметр вала  $d = 8$  мм; длина сопрягаемых поверхностей  $l_1 = l_a = l_g = 30$  мм.

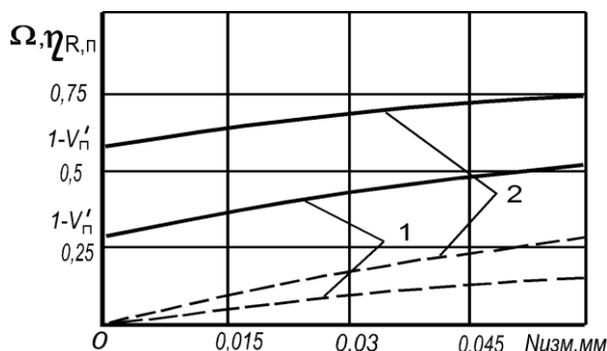


Рис. 4. Зависимость относительной фактической площади контакта и плотности контакта от натяга при сборке соединения с нагревом втулки (поперечная сборка): 1 –  $R_a = 5 \mu\text{м}$ ; 2 –  $R_a = 1 \mu\text{м}$

Оценка герметичности при сборке соединения под прессом (рис. 5) проведена по следующим исходным данным: материал втулки - сталь 35, материал вала - латунь ЛМцА 57-3-1. Сопрягаемый диаметр  $D = 20$  мм; наружный диаметр втулки  $D_1 = 30$  мм; внутренний диаметр вала  $d = 10$

мм; длина сопрягаемых поверхностей  $l_1 = l_a = l_g = 18$  мм. Параметры шероховатости поверхности вала  $R_a = 4 \mu\text{м}$ ,  $R_{\text{max}} = 22 \mu\text{м}$ . Покрытие вала – кадмий ( $\sigma_T^{\text{II}} = 60 \text{ МПа}$ ), толщина покрытия  $\Delta^{\text{II}} = 15 \mu\text{м}$ .

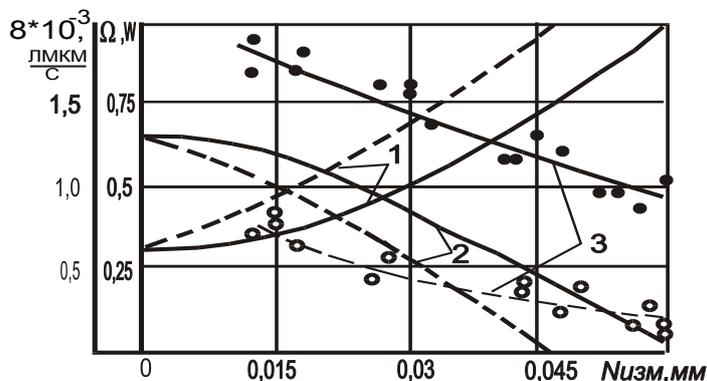


Рис. 5. Зависимость плотности, пористости контакта и величины течи от измеренного натяга при сборке соединения под прессом

Результаты экспериментальных исследований относительной фактической площади контакта и плотности контакта от измеренного натяга при сборке с нагревом втулки, представленные на рис. 4, подтверждают, что параметры микрогеометрии и физико-механические свойства сопрягаемых поверхностей оказывают значительное влияние на фактическую площадь и плотность контакта. При поперечной сборке на плотность контакта в меньшей степени влияет натяг. За счет мягких

### Выводы

Увеличения фактической площади контакта, а, следовательно, герметичности и прочности соединений можно достигнуть за счет избирательного переноса материала в зоне контакта. Процесс избирательного переноса возможен, например, в случае, когда одна из деталей выполнена из медного сплава или имеет медное покрытие, а в качестве дополнительного (третьего) элемента используется глицерин [6]. После сборки соединения, за счет восстановления в пустотах зоны контакта частиц меди из окислов, увеличивается фактическая площадь контакта.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований процесса контактного взаимодействия де-

покрытий можно существенно повысить фактическую площадь контакта и герметичность соединений, что подтверждается результатами, приведенными в работе [7]. Это объясняется тем, что материал покрытия заполняет пустоты зоны контакта, образующиеся из-за волнистости и отклонения формы деталей.

Полученные экспериментальные значения (см. рисунок 5) согласуются с теоретической оценкой герметичности контакта.

талей, соединяемых с натягом, позволяют заключить, что, управляя параметрами контактирования, можно без существенного усложнения конструкции и технологии изготовления получить требуемую герметичность неподвижных соединений. На основе полученных теоретических положений разработан ряд эффективных способов повышения как герметичности, так и несущей способности соединений с натягом, основанных на введении третьего элемента в зону контакта. Таким образом, по предложенной методике можно не только оценить, но и выявить возможности обеспечения требуемой герметичности на этапе проектирования соединений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов, Ю. Н. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, В. Н. Пучков. — М.: Машиностроение, 1986. — 224 с.
2. Жабин, А. И. Сборка изделий в единичном и мелкосерийном производстве / А. И. Жабин, А. П. Мартынов. — М.: Машиностроение, 1983. — 184 с.
3. Волчкевич, Л. И. Автоматы и автоматические линии / Л. И. Волчкевич, М. М. Кузнецов, Б. А. Усов. — М.: Высшая школа, 1976. — Ч. 1. — 225 с.
4. Горохов, Д. Б. Обеспечение эксплуатационных свойств соединений деталей машин / Д. Б. Горохов, А. С. Кожевников // Системы. Методы. Технологии. — 2016. - № 3 (31). - С. 75-80.
5. Берникер, Е. И. О расчете посадок с натягом при одновременном действии крутящегося и изгибающего моментов / Е. И. Берникер // Вестник машиностроения. - 1968. — № 8. — С. 36-37.
6. Корона, А. Б. Расчет сопряжений с натягом с учетом метода обработки посадочных поверхностей и их чистоты / А. Б. Корона // Станки и инструменты. — 1950. — № 9. — С. 22-24.
7. Воячек И. И. Оптимизация толщины мягкого покрытия, нанесенного на сопрягаемые поверхности деталей неподвижного соединения / И. И. Воячек, Н. Е. Курносов // Технологические методы управления качеством деталей машин и приборов. — Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1981. — С. 33-34.
8. Горохов, Д. Б. Герметичность уплотнительных соединений с тонкослойными упругими покрытиями / Д. Б. Горохов, А. С. Кожевников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2015. - № 3 (47). - С. 34-40.
9. Курносов, Н.Е. Влияние покрытий сопрягаемых деталей на прочность соединений с натягом / Н. Е. Курносов, А. В. Тарнопольский // Технология металлов. — 2019. - № 12. — С. 7-11.

10. **Тихомиров, В.П.** Герметичность металл-металлических уплотнительных устройств / В. П. Тихомиров, М. А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. - № 1(49). - С. 89-99.
11. **Бежелукова, Е. Ф.** Прибор для измерения величины фактической площади контакта в соединениях с натягом / Е. Ф. Бежелукова, Н. Е. Курносов, С. М. Фельдберг // Автоматизация производственных процессов и унификация аппаратуры: Сб. научн. тр. — Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1977. — С. 94-97.
1. **Drozdov, Yu. N.** Friction and wear in extreme conditions: Handbook / Yu. N. Drozdov, V. G. Pavlov, V. N. Puchkov, M.: Mashinostroenie, 1986, 224 p.
2. **Zhabin, A. I.** Assembly of products in single and small-scale production/ A. I. Zhabin, A. P. Martynov, M.: Mashinostroenie, 1983, 184 p.
3. **Volchkevich, L. I.** Automata and automatic lines / L. I. Volchkevich, M. M. Kuznetsov, B. A. Usov, M.: Higher School, 1976, part 1, 225 p.
4. **Gorokhov, D. B.** Ensuring the operational properties of machine assembled joints / D. B. Gorokhov, A. S. Kozhevnikov // Systems. Methods. Technologies, 2016, no. 3 (31), pp. 75-80.
5. **Berniker, E. I.** On the calculation of force fit with simultaneous action of rotational power and transverse moment / E. I. Berniker, Bulletin of Mechanical Engineering, 1968, no. 8, pp. 36-37.
6. **Korona, A. B.** Calculation of conjugations with tension taking into account surface treatment method of mounting surfaces and their roughness/ A. B. Korona, Machines and tools, 1950, no. 9, pp. 22-24
7. **Voyachek I. I.** Optimization of the thickness of the soft coating applied to the mating surfaces of fixed joint parts / I. I. Voyachek, N. E. Kurnosov // Technological methods of quality management of machine parts and devices, Saratov: Publishing House of Saratov. un-ty, 1981, pp. 33-34.
8. **Gorokhov, D. B.** Tightness of sealing joints with thin-walled elastic coatings / D. B. Gorokhov, A. S. Kozhevnikov, Modern technologies. System analysis. Modeling, 2015, no. 3 (47), pp. 34-40.
9. **Kurnosov, N.E.** The influence of coatings of mating parts on the strength of pressure couplings/ N. E. Kurnosov, A.V. Tarnopolsky, Technology of metals, 2019, no. 12, pp. 7-11.
10. **Tikhomirov, V.P.** Tightness of metal-metal sealing devices / V. P. Tikhomirov, M. A. Izmerov. Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2016, no. 1(49), pp. 89-99.
11. **Bezhelukova, E. F.** A device for measuring the value of the actual contact area in pressure couplings / E. F. Bezhelukova, N. E. Kurnosov, S. M. Feldberg. Automation of production processes and unification of equipment: Proceedings, Saratov, Publishing House Saratov. un-ty, 1977, pp. 94-97.
12. **Ogar, P. M.** Features of the contact of a rigid rough surface with an elastic-plastic half-space after unloading / P. M. Ogar, V. A. Tarasov, D. B. Gorokhov. Systems. Methods. Technologies, 2014, no. 3 (23), pp. 41-46.
13. **Kurnosov, N. E.** Increasing the strength of fixed joints of wheeled and tracked vehicles through the use of cylindrical seating fits with contour connection of parts / N. E. Kurnosov, A.V. Tarnopolsky, K. V. Lebedinsky, A. A. Nikolotov. Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University, 2019, no. 3. - pp. 320-327.

Ссылка для цитирования:

*Курносов, Н.Е. Обеспечение герметичности в соединениях деталей с натягом / Н. Е. Курносов, А. В. Тарнопольский, Ю. Ю. Накашидзе // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 11. – С. 64 - 72 . DOI: 10.30987/1999-8775-2021-11-51-59.*

*Статья поступила в редакцию 08.10.21.  
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Шалыгин М.Г.,  
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».  
Статья принята к публикации 27.10.21.*

**Сведения об авторах:**

**Курносков Николай Ефимович**, д.т.н., профессор кафедры «Транспортные машины» Пензенского государственного университета, e-mail: kurnosov-ne@mail.ru.

**Тарнопольский Александр Владимирович**, к.т.н., доцент кафедры «Транспортные машины», Пензен-

**Kurnosov Nikolay Efimovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Transport Machines" of Penza State University, e-mail: kurnosov-ne@mail.ru.

**Tarnopolsky Alexander Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the De-

ского государственного университета, e-mail: taw48@bk.ru.

**Накашидзе Юлия Юрьевна**, ст. преподаватель кафедры «Транспортные машины» Пензенского государственного университета, e-mail: yun700@mail.ru.

partment "Transport Machines", Penza State University, e-mail: taw48@bk.ru.

**Nakashidze Yulia Yuryevna**, Senior lecturer of the Department "Transport Machines" of Penza State University, e-mail: yyn700@mail.ru.