

УДК 621.753.2/.24; 621.8  
doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-12

## О параметрах соединения с натягом, определяющих устойчивость при сборке тонкостенных цилиндрических деталей

Н. Е. Курносов<sup>1</sup>, В. В. Салмин<sup>2</sup>, А. Г. Елистратова<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup>kurnosov-ne@mail.ru, <sup>2</sup>salmin-penza@yandex.ru, <sup>3</sup>elistratova.anny@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования является совокупность конструктивных и технологических решений, определяющих устойчивость при сборке с натягом тонкостенных цилиндрических деталей. Предметом исследования являются взаимосвязанные параметры фактической площади контакта и удельной силы трения. Цель работы – теоретическое определение параметров, определяющих критерии устойчивости при сборке (с использованием формулы Мизеса) и факторов, способствующих снижению силы трения при сборке. *Материалы и методы.* Исследован процесс сборки тонкостенных цилиндрических деталей, собираемых с натягом с использованием формулы Мизеса. Показана специфика взаимодействия деталей соединения при сборке и определены взаимосвязанные параметры фактической площади контакта и силы трения, влияющие на устойчивость тонкостенных деталей при сборке. *Результаты.* Отмечены недостатки информации при проектировании тонкостенных соединений по устойчивости, приводящие, как правило, к усложнению технологии сборки. Предложено определение критического контактного давления в соединении при сборке по известной формуле Мизеса. Рассмотрены вопросы сборки соединения с натягом под воздействием пресса и характер взаимодействия сопрягаемых поверхностей, а также вопросы формирования фактической площади контакта. Отмечены вопросы двойственной природы трения и силы трения. Приведен ряд конструктивно-технологических решений, способствующих уменьшению силы трения. *Выводы.* Рассмотрение устойчивости при сборке тонкостенных цилиндрических деталей под воздействием пресса позволяет отметить, что определяющими параметрами критического давления, помимо геометрических размеров сопрягаемых деталей, являются фактическая площадь контакта и сила трения. Управление величиной фактической площади контакта без снижения эксплуатационных характеристик возможно путем выбора методов обработки сопрягаемых поверхностей. Эффективным способом является управление силой трения, где возможно использовать различные технологические решения, такие как введение в зону контакта поверхностно-активных веществ и наложение ультразвуковых колебаний.

**Ключевые слова:** соединение с натягом, тонкостенные детали, сборка, устойчивость, фактическая площадь контакта, сила трения, технологические решения

**Для цитирования:** Курносов Н. Е., Салмин В. В., Елистратова А. Г. О параметрах соединения с натягом, определяющих устойчивость при сборке тонкостенных цилиндрических деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 2. С. 159–170. doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-12

## On the parameters of a tension connection that determine the stability during assembly of thin-walled cylindrical parts

N.E. Kurnosov<sup>1</sup>, V.V. Salmin<sup>2</sup>, A.G. Elistratova<sup>3</sup>

© Курносов Н. Е., Салмин В. В., Елистратова А. Г., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

<sup>1,2,3</sup>Penza State University, Penza, Russia<sup>1</sup>kurnosov-ne@mail.ru, <sup>2</sup>salmin-penza@yandex.ru, <sup>3</sup>elistratova.anny@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* The object of the study is a set of design and technological solutions that determine the stability during assembly with tension of thin-walled cylindrical parts. The subject of the study is the interrelated parameters of the actual contact area and the specific friction force. The purpose of the work is the theoretical determination of the parameters that determine the criteria for stability during assembly (using the Mises formula) and the factors that contribute to the reduction of the friction force during assembly. *Materials and methods.* Research of the assembly process of thin-walled cylindrical parts assembled with tension using the Mises formula. The specificity of the interaction of the connection parts during assembly is shown and the interrelated parameters of the actual contact area and friction force that affect the stability of thin-walled parts during assembly are determined. *Results.* The shortcomings of information in the design of thin-walled joints in terms of stability are noted, which, as a rule, lead to the complication of assembly technology. A definition of the critical contact pressure in a joint during assembly using the well-known Mises formula is proposed. The issues of assembling a joint with tension under the influence of a press and the nature of the interaction of the mating surfaces, as well as the issues of forming the actual contact area are considered. The issues of the dual nature of friction and friction force are noted. A number of design and technological solutions are given that contribute to the reduction of friction force. *Conclusions.* Consideration of stability during assembly of thin-walled cylindrical parts under the influence of a press allows us to note that the determining parameters of critical pressure, in addition to the geometric dimensions of the mating parts, are the actual contact area and the friction force. Control of the actual contact area without reducing operational characteristics is possible by selecting methods for processing mating surfaces. An effective method is to control the friction force, where it is possible to use various technological solutions such as introducing surfactants into the contact zone and applying ultrasonic vibrations.

**Keywords:** tension connection, thin-walled parts, assembly, stability, actual contact area, friction force, technological solutions

**For citation:** Kurnosov N.E., Salmin V.V., Elistratova A.G. On the parameters of a tension connection that determine the stability during assembly of thin-walled cylindrical parts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(2):159–170. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-12

Посадки с натягом широко применяются для обеспечения необходимых эксплуатационных свойств в разных отраслях машиностроения [1–3].

Они используются при передаче больших усилий, вибрационных и ударных нагрузках для обеспечения жесткости соединения, герметичности и т.д. Значительное место среди всех видов соединений с натягом занимают соединения тонкостенных цилиндрических деталей, не позволяющих применять дополнительное крепление: сменные тонкостенные гильзы, запрессовываемые в блок цилиндров дизелей, компрессоров, насосов и других машин, в авиации – соединение дисков первых ступеней компрессора с тонкостенным валом в сочетании с другими элементами крепления в некоторых конструкциях газотурбинных двигателей [4] (по посадке с натягом устанавливают внутренние кольца подшипников качения, полумуфты и ступицы зубчатых колес на полых валах [5]), высоконагруженные втулки узлов фронтальных погрузчиков, экскаваторов и других подъемных машин.

В связи с разнообразием различных условий сборки и эксплуатации тонкостенных соединений часто при проектировании и эксплуатации возникает вопрос устойчивости при сборке таких соединений. Это следует из того, что в основном применяемым способом сборки таких деталей является сборка под действием прессы [3].

Работоспособность соединений с натягом определяется двумя показателями: прочностью сопрягаемых деталей и прочностью собственно соединения по поверхности контакта. Первый показатель определяет величину максимального натяга  $N_{\max}$ , второй – величину минимального натяга  $N_{\min}$ . Однако эти параметры не в полной мере отражают технологические условия обеспечения устойчивости при сборке.

Контактное взаимодействие цилиндрических деталей, сопрягаемых с натягом продольной запрессовкой, имеет характерные особенности, обусловленные, во-первых, предварительным относительным сдвигом поверхностей; во-вторых, срезом части микронеровностей рельефа поверхностей.

Недостаток информации при проектировании тонкостенных соединений по устойчивости приводит, как правило, к усложнению технологии сборки – необходимости назначения дополнительных технологических операций, таких как дорнование (патенты RU 2238181, RU 2305028), дополнительный контроль усилий запрессовки, при котором определяют перекосяк и несоосность деталей (патент RU 2020048).

Изучение напряженного состояния и устойчивости тонкостенных цилиндрических деталей, собираемых с натягом, рассмотрено в работе [5]; критическое контактное давление в соединении находят по известной формуле Мизеса.

Для определения условий устойчивости и возможной необходимости дополнительных операций при сборке тонкостенных деталей в работе рассмотрена устойчивость тонкостенных цилиндрических деталей при запрессовке.

На основе оценки устойчивости, приведенной в работах [6, 7], рассмотрим влияние сил трения на запрессовку. Для охватываемой тонкостенной оболочки величина максимальной сжимающей силы  $P$  может быть определена следующим образом [6]:

$$P \leq \alpha_c P_{\text{кр}} \left( 1 - \frac{q}{|q_{\text{кр}}|} \right), \quad (1)$$

где  $P_{\text{кр}}$  – критическая сжимающая сила;  $q_{\text{кр}}$  – критическое контактное давление;  $q$  – контактное давление в соединении;  $\alpha_c$  – поправочный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения радиуса соединения  $R$  к толщине оболочки  $h_1$ ;  $\alpha_c \approx 0,3$  при  $R/h_1 \leq 250$ .

Величину сжимающей силы приближенно определяем как силу трения при запрессовке, условно приложенную к торцу оболочки:

$$P \approx F_{\text{тр}} = 2\pi R l q f, \quad (2)$$

или

$$P \approx F_{\text{тр}} = 2\pi R l S_{\text{ф}} \tau_{\text{сд}}, \quad (3)$$

где  $l$  – длина соединения;  $f$  – коэффициент трения при запрессовке деталей соединения;  $S_{\text{ф}}$  – относительная фактическая площадь контакта в соединении;  $\tau_{\text{сд}}$  – удельная сила трения в соединении.

Для наиболее распространенных на практике оболочек средней длины, для которых

$$\frac{1}{2\sqrt{3(1-\mu_1^2)} R/h_1} \ll \frac{\pi^2 R^2}{l^2} \ll 2\sqrt{3(1-\mu_1^2)} \frac{R}{h_1}, \quad (4)$$

величину критического контактного давления в соединении можно определять по известному соотношению [6]:

$$q_{\text{кр}} \approx 0,918 \frac{E_1 h_1^2}{Rl} \sqrt{\frac{h_1}{R}}, \quad (5)$$

где  $\mu_1$  и  $E_1$  – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала охватываемой детали соответственно.

Величина критической сжимающей силы определяется как [6]:

$$P_{\text{кр}} = 3,8 E_1 h_1^2. \quad (6)$$

После подстановки значений  $P$ ,  $q_{\text{кр}}$ ,  $P_{\text{кр}}$ , определяемых согласно выражениям (3), (5) и (6), в соотношение (1) получим выражение для контактного давления:

$$q \leq \frac{q_{\text{кр}}}{1 + 5,057 f \sqrt{h_1/R}}, \quad (7)$$

или

$$q \leq \frac{0,918 \left( E_1 \frac{h_1^2}{R} l \right) \sqrt{\frac{h_1}{R}}}{1 + 5,057 f \sqrt{h_1/R}}. \quad (8)$$

Для охватываемой тонкостенной детали должно выполняться условие

$$P \leq t_2 P_{\text{кр}} = 3,8 t_2 E_2 h_2^2, \quad (9)$$

здесь  $t_2$  – коэффициент, определяемый в зависимости от величины безразмерного давления  $\bar{q}$  [6]:

$$\bar{q} = q \left( \frac{R}{h_2} \right)^2 \sqrt{3(1-\mu_2^2)} \frac{1}{E_2}, \quad (10)$$

где  $\mu_2$  и  $E_2$  – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала охватываемой детали;  $h_2$  – толщина охватываемой оболочки. При малых значениях  $\bar{q}$  ( $\bar{q} \leq 0,1$ )  $t_2 \approx 0,3$ , тогда

$$P \approx F_{\text{тр}} \leq 1,14E_2h_2^2. \quad (11)$$

Из зависимости (3) следует: в ней присутствует константа  $2\pi$  и геометрические параметры соединения  $R$  и  $l$ , которые задаются конструктором при проектировании узла, а управление обеспечения устойчивости при сборке возможно взаимосвязанными параметрами фактической площади контакта  $S_{\text{ф}}$  и удельной силы трения  $\tau_{\text{сд}}$ .

При запрессовке (рис. 1) микронеровности втулки, взаимодействуя с фаской вала, деформируются в области  $A$ . Микронеровности вала деформируются в области  $B$ . Из-за высокой концентрации напряжений в локальных областях  $A$  и  $B$  рабочие фаски вала и отверстия вблизи контактных поверхностей получают перенаклеп, вследствие чего обладают повышенной твердостью. Часть микронеровностей рельефа срезается, оставшаяся часть, претерпев перенапряжения при сборке, остается неизменной в собранном соединении.

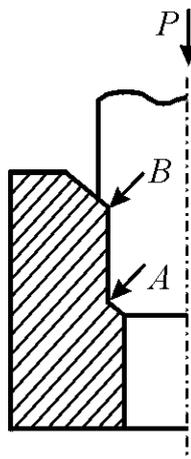


Рис. 1. Схема осевой запрессовки

Перемещение деталей при сборке сопровождается возникновением касательных напряжений, обусловленных внешним силовым воздействием и спецификой взаимодействия деталей соединения под нагрузкой.

При этом взаимодействие сопрягаемых поверхностей обусловлено различными видами фрикционных связей и является как следствием механического взаимодействия микронеровностей поверхностей, так и следствием молекулярного сцепления [8]. Окисные пленки на сопрягаемых поверхностях выполняют роль несовершенной смазки.

При осевом перемещении деталей соединения происходит возникновение и нарушение фрикционных связей.

Последствия этого процесса проявляются в виде сглаживания (смятия и среза) микронеровностей рельефа, образования очагов схватывания.

Следствием отклонения формы сопрягаемых поверхностей деталей, погрешности их совмещения и ряда других причин является отсутствие контакта на отдельных, иногда значительных участках сопрягаемых поверхностей деталей. Это вызывает значительное уменьшение фактической площади контакта.

Влияние на контактное взаимодействие поверхностей и силу трения оказывают адсорбированные и хемосорбированные присадки поверхностно-активных веществ в смазках. Они вызывают адсорбционный эффект понижения прочности (эффект Ребиндера), в значительной степени определяющий резкое изменение механических свойств поверхностного слоя материала, его деформацию.

Внешний адсорбционный эффект состоит в снижении поверхностной энергии вследствие адсорбции поверхностно-активных веществ. Снижение энергии выхода дислокаций на поверхность приводит к пластифицированию поверхностного слоя.

При сборке происходит наклеп тонкого поверхностного слоя материала, обусловленный интенсивным многократным контактным взаимодействием микронеровностей рельефа сопрягаемых поверхностей деталей. В области неинтенсивного контактного взаимодействия сопрягаемых поверхностей деталей возрастание микротвердости поверхностного слоя незначительно и составляет нескольких процентов. С увеличением натяга степень и глубина пластической деформации увеличиваются.

Наличие неоднородных по механическим характеристикам материалов и покрытий в зоне контактного взаимодействия, а также наличие в зазоре срезанных частиц металла способствует локальной концентрации напряжений и нестабильности величины удельной силы трения.

Результатами экспериментальных исследований подтверждается, что следствием разницы путей перемещения точек микрорельефа при сборке является неоднородное распределение областей контакта (фактической площади контакта) и интенсивности смятия неровностей по длине соединения.

В результате такого взаимодействия сопрягаемых поверхностей контакт между ними происходит по линии, но не равномерен; на отдельных участках прилегание деталей плотное, типа вмятин, на других оно отсутствует.

Пустоты сопрягаемых поверхностей заполняются частицами материала, отделившимися при запрессовке.

Уплотнение поверхностного слоя материала зависит от технологии обработки поверхностей. Различные методы обработки сопрягаемых поверхностей дают существенно отличающиеся параметры контактного взаимодействия сопрягаемых поверхностей как при запрессовке, так и при эксплуатации соединения.

При относительном перемещении деталей при запрессовке в результате среза микронеровностей и частичного сглаживания макроотклонений контакт сопрягаемых поверхностей, как правило, происходит по сглаженным участкам. В этом случае при проектировании соединений и оценке параметров контактирования целесообразно использовать вероятностные модели линейного контакта при учете преимущественного среза неровностей более мягкой поверхности.

Контакт по образующей в сечении соединения показан на рис. 2. В работе [9] рассмотрено определение фактической площади контакта при сборке под воздействием прессы.

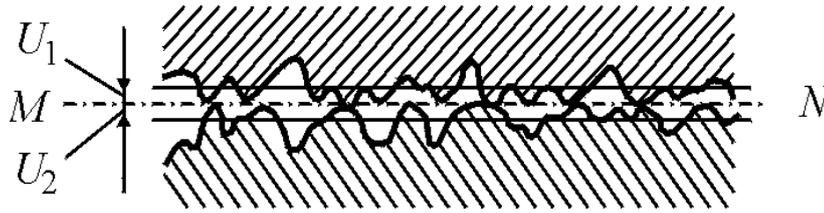


Рис. 2. Схема контакта сопряженных деталей по образующей

В результате было получено выражение

$$S_{\Phi} = \left[ 1 - \Phi \left( \frac{U_1}{\sigma_a} \right) \right]^2 \left[ 1 - \Phi \left( \frac{U_2 b}{\sigma_b} \right) \right]^2 2\pi r l,$$

где  $U_1, U_2$  – уровни сближения контактирующих поверхностей;  $\Phi$  – функция Лапласа;  $\sigma_a$  и  $\sigma_b$  – средние квадратические отклонения неровностей поверхностей в продольном направлении охватывающей и охватываемой деталей соответственно;  $l$  – длина соединения;  $r$  – радиус соединения;

$$U = R_{\max} - p_1 - \Delta R_{\max}, \quad (12)$$

здесь  $R_{\max}$  – наибольшая высота неровностей профиля;  $\Delta R_{\max}$  – величина среза и смятия микронеровностей в результате запрессовки, выраженная через  $R_{\max}$ ;  $p_1$  – параметр, определяющий положение средней линии в выбранной системе координат  $(P_0, t_p)$ .

Предлагаемая методика позволяет определить величину фактической площади контакта при осевой запрессовке при различных методах обработки поверхностей вала и отверстия. Такой подход к оценке контактного взаимодействия в соединениях с натягом раскрывает механизм образования пятен контакта, и, соответственно, формирования фактической площади контакта, что позволяет обосновать выбор параметров микрорельефа сопрягаемых поверхностей соединений с учетом технологии их обработки [10].

Общеизвестно, что при продольном методе сборки соединения со смазкой прочность соединения ниже, чем у аналогичного соединения без смазки в связи с уменьшением коэффициента трения.

Существует ряд теорий трения, объясняющих механизм возникновения силы трения и позволяющих оценить ее величину [3, 8, 11, 12].

В настоящее время признана двойственная природа трения как процесса, включающего объемное деформирование материала и преодоление межмолекулярных связей (мостиков сварки), возникающих в местах фактического контакта. Наиболее полно двойственный характер трения отражен в широко распространенной молекулярно-механической (адгезионно-деформационной) теории трения, развитой И. В. Крагельским.

Вычисление механической составляющей силы трения ведется на основе разработанных моделей как контактирующих поверхностей, так и отдельных неровностей. Вычисление молекулярной составляющей силы трения затрудняется тем, что свойства поверхностных слоев, характеризующих «третье тело» [11], существенно отличаются от свойств используемых материалов и изучены недостаточно. Экспериментальное определение величины молекулярной составляющей силы трения проводилось по различным методикам [11, 12]. Выявлен биномиальный закон молекулярного трения

$$\tau = \tau_0 + \lambda P_r, \quad (13)$$

где  $\lambda$  – пьезокоэффициент молекулярной составляющей трения.

Несмотря на значительный разброс, величина  $\tau$ , по данным ряда авторов [11–14], в некоторых случаях при сухом трении при высокой адгезии и наличии вторичной шероховатости близка к своему предельному значению. Это значение равно пластической постоянной (константа сдвига) более мягкого материала контактирующей пары  $K_{сд}$ . В этом случае значение силы трения находится как сумма механической и молекулярной составляющих.

Рассмотрим пример оценки возможности сборки тонкостенных цилиндрических деталей с натягом для посадки  $\varnothing 400 \frac{H8}{z8}$  при сборке под действием прессы. Для деталей соединения:  $l = 0,3$  м;  $h_1 = h_2 = 0,004$  м;  $E_1 = E_2 = 2 \times 10^{11}$  Па,  $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$ ; предел текучести сопрягаемых материалов  $\sigma_{T1} = \sigma_{T2} = 32 \times 10^7$  Па;  $f = 0,2$ . Согласно ГОСТ 25347-82<sup>1</sup> для посадки  $\varnothing 400 \frac{H8}{z8}$ ,  $N_{\max} = 1,089 \cdot 10^{-3}$  м. Находим по данному натягу контактное давление в соединении [2]:

$$q = \frac{2N}{\frac{(2R - h_1)^2}{E_1 h_1} + \frac{(2R - h_2)^2}{E_2 h_2}} = 544 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

Для охватываемой детали проверяем условие (8):

$$q = 544 \cdot 10^4 \text{ Па} < 605 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

Условие выполнено. Для охватывающей детали проверяем соотношение (11), используя выражение (2):

$$F_{тр} = 410 \text{ кН}; F_{тр} < 3648 \text{ кН.}$$

Условие (11) выполнено, следовательно сборка соединения для рассматриваемого случая осуществима. Убедимся, что материал оболочек не выходит из упругой области. Наиболее напряженной в данном случае является охватываемая деталь. Напряжения определим как:

<sup>1</sup> ГОСТ 25347-82 (СТ СЭВ 144-88). Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки.

$$\sigma_1 = -\frac{F_{\text{тр}}}{2\pi R h_1} = -816 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad \sigma_2 = -\frac{qR}{h_2} = -2720 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Подсчитываем интенсивность напряжений:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1 \sigma_2} = -32 \cdot 10^7 \text{ Па}.$$

Интенсивность не выше предела текучести  $\sigma_{T1} = 32 \cdot 10^7 \text{ Па}$ .

Таким образом, по условию устойчивости при запрессовке тонкостенных цилиндрических деталей максимальное контактное давление необходимо снижать на 10–30 %.

В силу производственной и эксплуатационной необходимости иногда требуется не снижать величину контактного давления. В этом случае для уменьшения отрицательного влияния сил трения на величину критического контактного давления при сборке возможно использование ряда технологических решений, способствующих уменьшению силы трения. Например, смазки с добавками поверхностно-активных веществ (авторское свидетельство 1371836). Данные технические решения способствуют уменьшению контактного давления и, соответственно, силы трения при сборке.

Согласно авторскому свидетельству 1371836 на одну из сопрягаемых поверхностей наносят покрытие из легкоокисляющегося металла-модификатора, например натрия, толщиной в 5...20 раз меньше средней высоты неровностей от механической обработки на сопрягаемых поверхностях деталей. Осуществляют сборку деталей поперечным или продольным методом. При введении в зону контакта легкоокисляющегося металла-модификатора происходит его диффузия в материалы соединяемых деталей, способствующая измельчению структуры материала сопрягаемых поверхностей.

Это, в свою очередь, снижает силу трения.

Другое техническое решение направлено на сам процесс сборки, где используется направленное введение в зону контактирования деталей при сборке дополнительной ультразвуковой энергии. В этом случае происходит интенсивное разрушение окисных пленок и образование вследствие этого в зоне трения ювенильных поверхностей и физического контакта, одновременно в зависимости от направления колебаний в узлах схватывания возникают пропорциональные амплитуде колебаний циклические или сдвиговые напряжения и деформации, способствующие усталостному разрушению интерметаллических связей и уменьшению сил трения [15]. При одном и том же усилии ультразвуковые колебания позволяют получать большую абсолютную деформацию, чем при обычном нагружении, а эквивалентные деформации достигаются при значительно меньших усилиях деформирования.

Также наложение ультразвуковых колебаний позволяет в 1,5–2 раза снизить сборочное усилие.

### Заключение

Параметрами соединения с натягом, определяющими устойчивость тонкостенных цилиндров деталей при запрессовке, являются фактическая площадь контакта и сила трения.

Управление величиной фактической площади контакта без снижения эксплуатационных характеристик возможно путем выбора методов обработки сопрягаемых поверхностей.

Эффективным способом является управление силой трения, где возможно использовать различные технологические решения, такие как введение в зону контакта поверхностно-активных веществ и наложение ультразвуковых колебаний.

### Список литературы

1. Палей М. А., Романов А. Б., Брагинский В. А. Допуски и посадки : справочник : в 2 ч. 8-е изд., перераб. и доп. СПб. : Политехника, 2001. Ч. 1. 576.
2. Берникер Е. И. Посадки с натягом в машиностроении : справочное пособие. М. : Машиностроение, 1966. 167 с.
3. Гречищев Е. С., Ильяшенко А. А. Соединения с натягом. М. : Машиностроение, 1981. 240 с.
4. Шишкин С. В. К расчету концентрации контактной нагрузки в соединениях с натягом тонкостенных деталей // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2019. Т. 22, № 3. С. 79–91.
5. Янченко И. И., Сивцов И. С., Пономарев В. К. Совершенствование технологии сборки неразъемных осесимметричных соединений // Пути снижения трудоемкости обработки полых осей асимметричных деталей : сб. тез. докладов отраслевой конференции. Ижевск, 1984. С. 20–23.
6. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Л. Расчеты на прочность деталей машин. М. : Машиностроение, 1979. 702 с.
7. Лурье А. И. Пространственные задачи теории упругости. М. : Гостехиздат, 1955. 491 с.
8. Крагельский И. А., Михин Н. М. Узлы трения машин : справочник. М. : Машиностроение, 1984. 280 с.
9. Курносоев Н. Е. О влиянии фактической площади контакта на прочность цилиндрических соединений с натягом // Вопросы технологии, точности и надежности в машиностроении : сб. науч. тр. Вып. 3. Пенза : Пенз. политехн. ин-т, 1974. С. 92–95.
10. Федулов В. М. Исследование методов расчета натяга в прессовых соединениях на основе управления технологическими условиями обработки поверхностей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2013. 16 с.
11. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М. : Машиностроение, 1977. 526 с.
12. Крагельский И. А., Крагельский И. А., Алисин В. В. Трение, изнашивание и смазка : справочник : в 2 кн. М. : Машиностроение, 1978. Кн. 1. 400 с.
13. Williamson J. B. P., Hunt R. T. The Real Area of Contact between Plastically Loaded Surfaces // *Mecanique, materiaux electricite. Numero special. L' Usure*, 1972. № 1. P. 22–25.
14. Курова М. С. Сдвиговая прочность металлического контакта // Механика и физика контактного взаимодействия : сб. науч. тр. Калинин : Изд-во КГУ, 1980. С. 86–89.
15. Шуваев В. Г. Применение ультразвука для обеспечения качества сборки // Известия МГТУ МАМИ. 2008. № 2. С. 342–346.

### References

1. Paley M.A., Romanov A.B., Braginskiy V.A. *Dopuski i posadki: spravochnik: v 2 ch. 8-e izd., pererab. i dop. = Tolerances and fits: reference: in 2 parts. The 8<sup>th</sup> edition, revised and supplemented.* Saint Petersburg: Politekhnik, 2001;1:576. (In Russ.)

2. Berniker E.I. *Posadki s natyagom v mashinostroenii: spravochnoe posobie = Interference fits in mechanical engineering: a reference manual*. Moscow: Mashinostroenie, 1966:167. (In Russ.)
3. Grechishchev E.S., Il'yashenko A.A. *Soedineniya s natyagom = Tension connections*. Moscow: Mashinostroenie, 1981:240. (In Russ.)
4. Shishkin S.V. On the calculation of the concentration of contact load in tension joints of thin-walled parts. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviatsii = Scientific bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 2019;22(3):79–91. (In Russ.)
5. Yanchenko I.I., Sivtsov I.S., Ponomarev V.K. Improving the technology of assembling permanent axisymmetric joints. *Puti snizheniya trudoemkosti obrabotki polykh osey asimmetrichnykh detaley: sb. tez. dokladov otraslevoy konferentsii = Ways to reduce the labor intensity of processing hollow axes of asymmetric parts: proceedings of reports from the industry conference*. Izhevsk, 1984:20–23. (In Russ.)
6. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.L. *Raschety na prochnost' detaley mashin = Strength calculations of machine parts*. Moscow: Mashinostroenie, 1979:702. (In Russ.)
7. Lur'e A.I. *Prostranstvennyye zadachi teorii uprugosti = Spatial problems of elasticity theory*. Moscow: Gostekhizdat, 1955:491. (In Russ.)
8. Kragel'skiy I.A., Mikhin N.M. *Uzly treniya mashin: spravochnik = Machine friction units: reference book*. Moscow: Mashinostroenie, 1984:280. (In Russ.)
9. Kurnosov N.E. On the influence of the actual contact area on the strength of cylindrical joints with tension. *Voprosy tekhnologii, tochnosti i nadezhnosti v mashinostroenii: sb. nauch. tr. Vyp. 3 = Issues of technology, precision and reliability in mechanical engineering: collected papers. Issue 3*. Penza: Penz. politekhn. in-t, 1974:92–95. (In Russ.)
10. Fedulov V.M. *Research of methods for calculating tension in press joints based on control of technological conditions of surface treatment*. PhD abstract. Rybinsk, 2013:16. (In Russ.)
11. Kragel'skiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos = Fundamentals of Friction and Wear Calculations*. Moscow: Mashinostroenie, 1977:526. (In Russ.)
12. Kragel'skiy I.A., Kragel'skiy I.A., Alisin V.V. *Trenie, iznashivanie i smazka: spravochnik: v 2 kn. = Friction, wear and lubrication: textbook: in 2 books*. Moscow: Mashinostroenie, 1978;1:400. (In Russ.)
13. Williamson J.B.P., Hunt R.T. The Real Area of Contact between Plastically Loaded Surfaces. *Mecanique, materiaux electricite. Numero special. L' Usure*, 1972;(1):22–25.
14. Kurova M.S. Shear strength of metallic contact. *Mekhanika i fizika kontaktnogo vzaimodeystviya: sb. nauch. tr. = Mechanics and physics of contact interaction: collected papers*. Kalinin: Izd-vo KGU, 1980:86–89. (In Russ.)
15. Shuvaev V.G. Using ultrasound to ensure assembly quality. *Izvestiya MGTU MAMI = Proceedings of Moscow State University of Mechanical*. 2008;(2):342–346. (In Russ.)

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### **Николай Ефимович Курносов**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры транспортных  
машин, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: kurnosov-ne@mail.ru

##### **Nikolay E. Kurnosov**

Doctor of engineering sciences, professor,  
professor of the sub-department  
of transport machines, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

***Владимир Васильевич Салмин***

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой транспортных  
машин, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: salmin-penza@yandex.ru

***Vladimir V. Salmin***

Doctor of engineering sciences, professor,  
head of the sub-department  
of transport machines, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

***Анна Григорьевна Елистратова***

старший преподаватель кафедры  
транспортных машин, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: elistratova.anny@yandex.ru

***Anna G. Elistratova***

Senior lecturer of the sub-department  
of transport machines, 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 14.02.2024**

**Поступила после рецензирования и доработки / Revised 13.03.2024**

**Принята к публикации / Accepted 20.04.2024**