

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

УДК 621.753.2/.24; 621.8
doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-11

Оценка возможности сборки длинномерных цилиндрических деталей

Н. Е. Курносов¹, В. В. Салмин², А. Г. Елистратова³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются условия сборки длинномерных деталей, соединяемых с натягом, широко применяемых в различных отраслях промышленности. Предметом исследования являются технология сборки и ограничения, накладываемые на процесс сборки при различных их видах. Цель работы – создание обоснованных рекомендаций по выбору параметров соединения и технологии его сборки, исключающих потерю устойчивости, с возможным использованием более совершенных технологических процессов и соединений. *Материалы и методы.* Предлагается оценка, позволяющая прогнозировать потерю устойчивости при сборке длинномерных деталей соединений с натягом. Исследование процессов сборки проводится с учетом критической силы по известному соотношению Эйлера с учетом способа установки и закрепления деталей при запрессовке. Уравнения упругой линии участков определяются с использованием дифференциальных уравнений для отдельных участков вала и отверстия. Изогнутую ось условного стержня описывает система дифференциальных уравнений. *Результаты.* Предложены оценка, позволяющая прогнозировать потерю устойчивости при сборке длинномерных деталей соединений с натягом, и рекомендации по устранению потери устойчивости деталей соединений. Приведен пример использования предлагаемой оценки. *Выводы.* Предложенная оценка позволяет выбрать параметры соединения и технологию сборки, исключающие потерю устойчивости. Предложены технические решения, позволяющие реализовать более совершенные технологические процессы сборки соединений.

Ключевые слова: соединение с натягом, длинномерные детали, сборка, прогнозирование устойчивости, схемы закрепления, пример, технологические решения

Для цитирования: Курносов Н. Е., Салмин В. В., Елистратова А. Г. Оценка возможности сборки длинномерных цилиндрических деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 115–127. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-11

Assessing the possibility of assembling long cylindrical parts

N.E. Kurnosov¹, V.V. Salmin², A.G. Elistratova³

© 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.

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia¹kurnosov-ne@mail.ru, ²salmin-penza@yandex.ru, ³elistratova.anny@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is the conditions of assembly of long parts connected with tension, widely used in various industries. The subject of the research is assembly technology, restrictions imposed on the assembly process in its various types. The purpose of the work is to develop well-founded recommendations for the selection of connection parameters and assembly technology, eliminating the loss of stability, with the possible use of more advanced technological processes and connections. *Materials and methods.* An assessment is proposed that allows predicting the loss of stability during assembly of long parts of tension joints. The study of assembly processes is carried out taking into account the critical force according to the known Euler relation, taking into account the method of installation and fastening of parts during pressing. The equations of the elastic line of sections are determined using differential equations for individual sections of the shaft and hole. The curved axis of the conditional rod is described by a system of differential equations. *Results.* An assessment is proposed that allows predicting the loss of stability during assembly of long parts of connections with tension, and recommendations for eliminating the loss of stability of connection parts. An example of using the proposed assessment is given. *Conclusions.* The proposed assessment allows selecting the parameters of the connection and the technology of its assembly, eliminating the loss of stability. Technical solutions are proposed that allow implementing more advanced technological processes of assembly of connections.

Keywords: tension joint, long parts, assembly, stability prediction, fastening schemes, example, technological solutions

For citation: Kurnosov N.E., Salmin V.V., Elistratova A.G. Assessing the possibility of assembling long cylindrical parts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):115–127. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-11

Длинномерные детали применяются в различных отраслях промышленности. В качестве примеров можно привести сборку труб с решетками теплообменников в химическом машиностроении, длинных валов редукторов с зубчатыми колесами, штоков с поршнями машин для литья под давлением, составных каландровых валов в бумагоделательных машинах, валков со специальным стальным сердечником в металлургическом машиностроении [1, 2].

К особенностям конструкции длинномерных соединений с натягом относятся:

1. Длинномерные соединения с натягом имеют большую длину по сравнению с диаметром, усложняющую процесс сборки.

2. Длинномерные детали часто имеют тонкие стенки, что делает их более восприимчивыми к деформации и повреждениям во время сборки.

К особенностям сборки относятся:

1. Потеря устойчивости деталей является причиной невозможности или существенного усложнения сборки соединений. В значительной степени проблема потери устойчивости относится к процессу проектирования схемы сборки и применяемой технологии.

2. Длинномерные детали могут неравномерно нагреваться или охлаждаться, что может привести к неравномерной силе натяга и ослаблению соединения; кроме того, существует риск термического повреждения, если температура или время нагрева не контролируются должным образом.

3. Для сборки длинномерных соединений с натягом часто требуется специальное оборудование, такое как длинные нагревательные печи и гидравлические прессы.

4. Сборка длинномерных соединений с натягом требует тщательного контроля качества, чтобы обеспечить прочность и надежность соединения.

В настоящее время отсутствуют методы, позволяющие на этапе проектирования прогнозировать потерю устойчивости при сборке соединений.

Отсутствие обоснованных рекомендаций по оценке устойчивости деталей соединений с натягом приводит к усложнению технологии сборки или к отказу от простого и надежного соединения с натягом и к применению ненапряженных соединений с дополнительным креплением, что приводит к увеличению стоимости изделия.

Рассмотрим условия потери устойчивости при сборке длинномерных деталей.

Сборка осуществляется несколькими методами:

- сборка под действием прессы;
- сборка без нагрева охватываемой детали или с нагревом;
- возможна технология сборки без использования прессы, только с нагревом охватываемой детали;
- сборка автофретированием (нагрузка детали давлением выше рабочего, что приводит к пластической деформации и появлению остаточных сжимающих напряжений) охватываемой или охватываемой детали.

Предлагается оценка, позволяющая прогнозировать потерю устойчивости при сборке длинномерных деталей соединений с натягом под действием прессы. Разработаны рекомендации по устранению потери устойчивости деталей соединений.

Потеря устойчивости деталей соединений с натягом происходит преимущественно в следующих случаях:

1. При сборке тонкостенных валов, что ориентировочно соответствует отношению

$$\frac{d - d_1}{d + d_1} < 0,2 ,$$

когда контактное давление в соединении превышает критическую величину, определяемую как [3]

$$P_{кр} = \frac{2E_1 (d - d_1)^3}{(1 - \mu_1)^2 (d + d_1)^3} ,$$

где d – диаметр соединения; d_1 – диаметр отверстия вала; E_1 , μ_1 – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала вала.

Расчет соединений с натягом с учетом устойчивости цилиндрических оболочек подробно рассматривается в работах [4, 5].

2. При запрессовке длинномерных деталей, когда сила трения в соединении может превысить критическую силу.

Рассмотрим запрессовку гладкого вала (рис. 1) во втулку. Значение критической силы можно определить по известному соотношению Эйлера:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 E_1 J_1}{\xi^2 (L-l)^2}, \quad (1)$$

где J_1 – момент инерции сечения вала,

$$J_1 = \frac{\pi}{64} (d^4 - d_1^4); \quad (2)$$

ξ – коэффициент приведения длины; L – длина вала; l – длина участка за-прессовки.

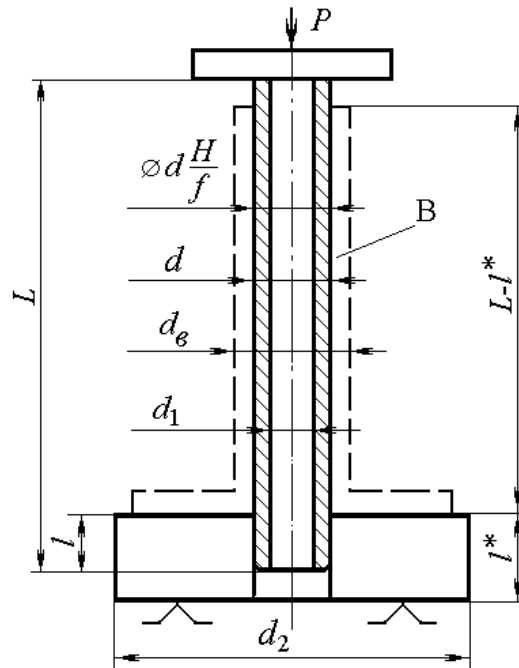


Рис. 1. Запрессовка гладкого вала во втулку

Сила трения в соединении с натягом

$$F_{тр} = \pi d l S_{\phi} \tau, \quad (3)$$

где S_{ϕ} – величина относительной фактической площади контакта в соединении; τ – удельная сила трения в соединении.

Зависимости для определения величины удельной силы трения τ приведены в работах [6, 7], относительной фактической площади S_{ϕ} – в настоящей работе.

Сила трения в соединении также может быть приближенно определена как

$$F_{тр} = \pi d l f. \quad (4)$$

Для исключения потери устойчивости необходимо выполнить условие

$$F_{\text{тр}} < P_{\text{кр}}. \quad (5)$$

После подстановки получим

$$l^3 - 2Ll^2 + L^2l - A = 0. \quad (6)$$

Здесь A определяется как

$$A = \frac{\pi^2 E_1 J_1}{64 \xi^2} \frac{1}{S_{\phi} \tau} \frac{d^4 - d_1^4}{d}, \quad (7)$$

или

$$A = \frac{\pi^2 E_1 J_1}{64 \xi^2} \frac{1}{fP} \frac{d^4 - d_1^4}{d}. \quad (8)$$

Как следует из выражения (5), вал теряет устойчивость при выполнении условия

$$L \geq B = \sqrt[3]{\frac{27}{4} A}. \quad (9)$$

Если $L = B$, то потеря устойчивости происходит при запрессовке на длину $l = \frac{1}{3}L$.

При $\sqrt[3]{\frac{27}{4} A} < L \leq \sqrt[3]{\frac{27}{2} A}$ потеря устойчивости происходит, здесь

$$l_1 = \frac{2}{3}L \left[1 - \cos \left(60^\circ - \frac{\arccos \left| 1 - \frac{27}{2} \frac{A}{L^3} \right|}{3} \right) \right], \quad (10)$$

$$l_2 = \frac{2}{3}L \left[1 - \cos \left(60^\circ + \frac{\arccos \left| 1 - \frac{27}{2} \frac{A}{L^3} \right|}{3} \right) \right]. \quad (11)$$

При

$$L \geq \sqrt{\frac{27}{2} A} \quad (12)$$

потеря устойчивости будет происходить в области

$$l_3 \leq l \leq l_2, \quad (13)$$

где

$$l_3 = \frac{2}{3}L \left[1 - \cos \left(\frac{\arccos \left| 1 - \frac{27}{2} \frac{A}{L^3} \right|}{3} \right) \right]. \quad (14)$$

На рис. 2 приведены полученные по выражениям (10), (11), (5) зависимости длины запрессовки от отношения L/d , при которых происходит потеря устойчивости.

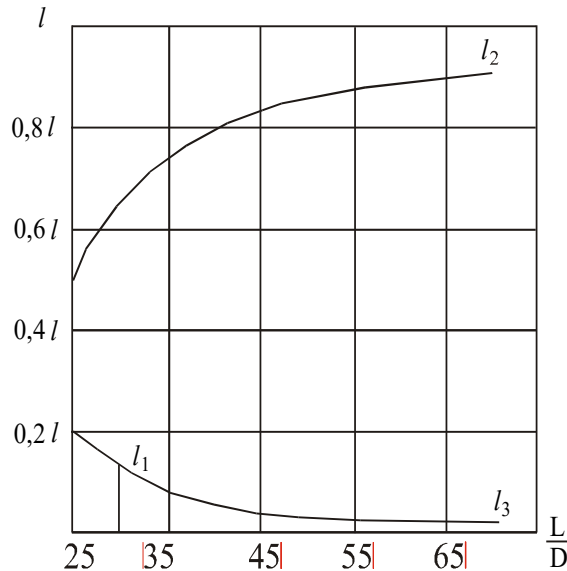


Рис. 2. Зависимость длины запрессовки, при которой происходит потеря устойчивости от отношения L/D . Материал вала и втулки – сталь 45 ($\sigma_T = 270$ МПа); охватываемая деталь с «бесконечно большой толщиной стенки», т.е. ($d_2/d > 4$); $P_{\max} = 0,58 \sigma_T$; $f = 0,2$ (соответствует запрессовке с машинным маслом); значение ξ принято равным 0,7

Длина вала, при которой не происходит устойчивости, должна удовлетворять условию

$$L < l + \sqrt{A/l}. \quad (15)$$

Одним из факторов, оказывающих влияние на устойчивость вала при запрессовке, является способ установки и закрепления деталей. Рассмотрим некоторые из них.

Горизонтальные перемещения вала и втулки исключены (рис. 3). Стол 1, на котором зафиксирована втулка 2, не имеет горизонтальных перемещений. Усилие сборки передается на вал 3 пуансоном прессы 4 через закрепительную втулку 5. В этом случае вал можно рассматривать как стержень с защемленными концами, для которого $\xi = 1/2$.

Горизонтальные перемещения вала и втулки не ограничиваются (рис. 4). В этом случае стол и втулка могут иметь горизонтальные перемещения, $\xi = 1$.

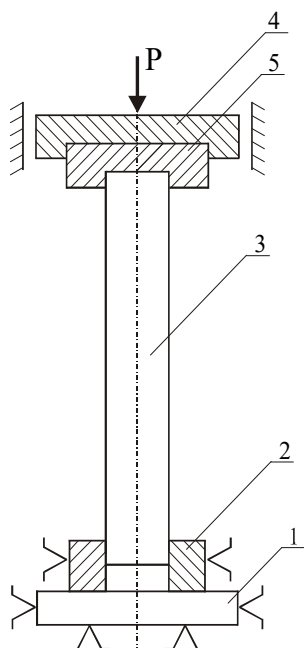


Рис. 3. Установки и закрепления деталей при запрессовке (вал и втулка со столом не имеют горизонтальных перемещений): 1 – стол; 2 – втулка; 3 – вал; 4 – пуансон прессы; 5 – закрепительная втулка

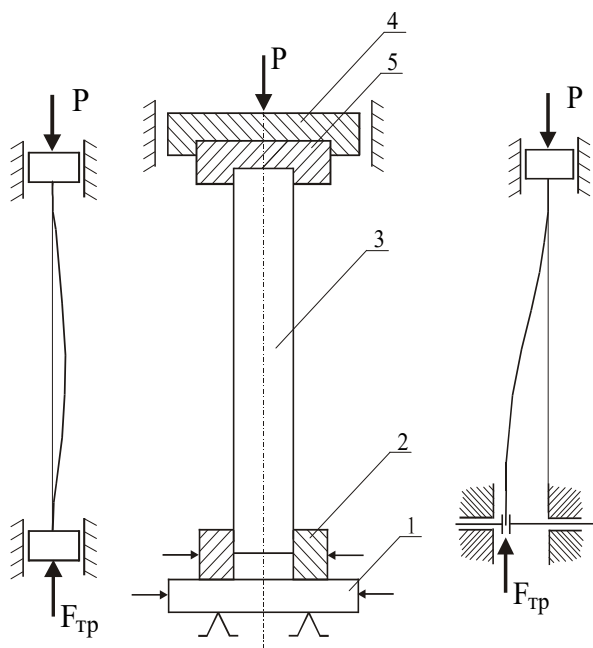


Рис. 4. Способ установки и закрепления деталей при запрессовке (стол и втулка могут иметь горизонтальные перемещения): 1 – стол; 2 – втулка; 3 – вал; 4 – пуансон прессы; 5 – закрепительная втулка

Горизонтальные перемещения стола и втулки исключены. Усилие сборки P передается непосредственно на конец вала. В этом случае трудно рассчитывать на надежное и равномерное прилегание торца вала к плоскости пуансона прессы и поэтому принимается схема с шарнирно-опертым концом (рис. 5). В этом случае $\xi = 0,7$.

Стол и втулка могут иметь горизонтальные перемещения. Усилие сборки прикладывается аналогично, как это рассмотрено выше (рис. 6). В этом случае получим схему с шарнирными концами, для которой $\xi = 0,7$.

Последняя схема наихудшая из всех. Поэтому сборку следует производить на прессе, у которого исключены горизонтальные перемещения стола и втулки. Сборочное усилие следует передавать через закрепительную втулку для исключения возможности поворота торцевого сечения вала.

При запрессовке ступенчатых валов и при необходимости учета длины втулки необходимо определить приведенную длину стержня. Для этого записываются дифференциальные уравнения для отдельных участков вала и отверстия, из которых определяются уравнения упругой линии участков. Постоянные интегрирования подбираются так, чтобы удовлетворялись граничные условия. Из полученной системы уравнений определяется приведенная длина.

Рассмотрим условия сборки гладкого вала с нежесткой длинной втулкой при большой длине запрессовки (рис. 7). Закрепление деталей соединения в данном случае можно свести к схеме с шарнирными опорами.

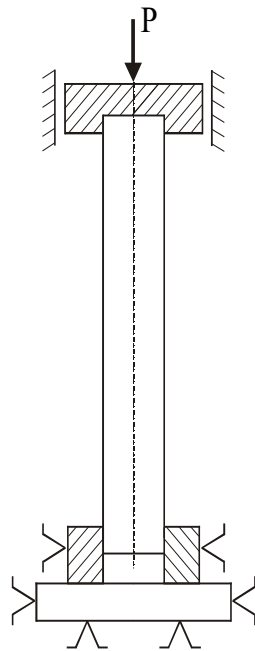


Рис. 5. Способ установки и закрепления деталей при запрессовке (свободный конец вала допускает угловые повороты): 1 – стол; 2 – втулка; 3 – вал; 4 – пуансон прессы; 5 – закрепительная втулка

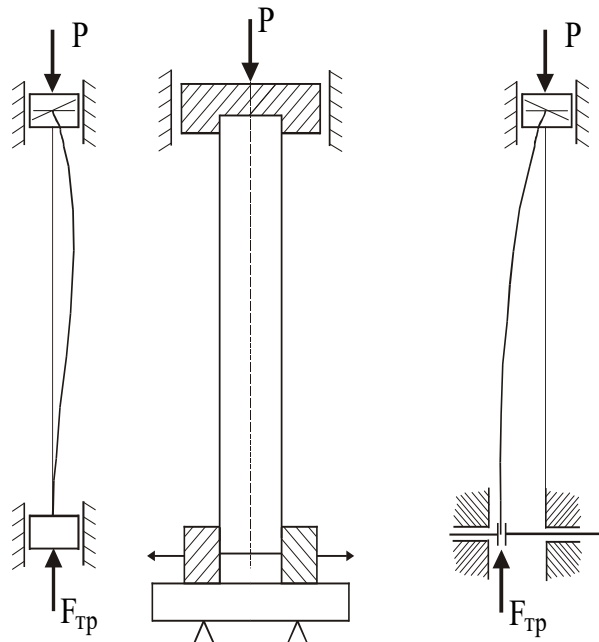


Рис. 6. Способ установки и закрепления деталей при запрессовке (свободный конец вала допускает угловые повороты, втулка может горизонтально перемещаться): 1 – стол; 2 – втулка; 3 – вал; 4 – пуансон прессы; 5 – закрепительная втулка

Изогнутую ось условного стержня описывает система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} y_1'' + k_1^2 y_1 = 0, \\ y_2'' + k_2^2 y_2 = 0, \\ y_3'' + k_3^2 y_3 = 0, \end{cases} \quad (16)$$

где

$$k_1^2 = \frac{P}{E_1 J_1}; \quad k_2 = a k_1; \quad k_3 = b k_1, \quad (17)$$

$$a = \sqrt{\frac{E_2 J_2}{E_1 J_1}}; \quad b = \sqrt{1 + \frac{E_2 J_2}{E_1 J_1}}. \quad (18)$$

Решая уравнение (7), получим

$$\begin{cases} y_1 = C_1 \sin(k_1 z) + C_2 \cos(k_1 z), \\ y_2 = C_3 \sin(k_2 z) + C_4 \cos(k_2 z), \\ y_3 = C_5 \sin(k_3 z) + C_6 \cos(k_3 z). \end{cases} \quad (19)$$

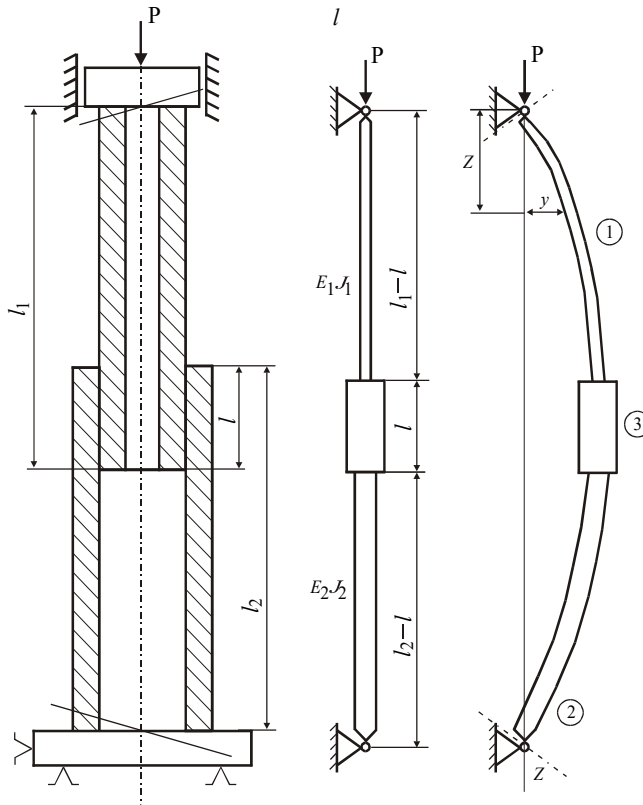


Рис. 7. Схема запрессовки длинномерного вала в нежесткую втулку

При $z=0$ прогиб $y_1=0$. Из этого условия получим $C_2=0$. Также должны выполняться условия: при $z=l_1-l$ перемещения $y_1=y_3$ и $y_1'=y_3'$; при $z=l_1$, $y_3=y_2$, $y_3'=y_2'$; при $z=l_1+l_2-l$ прогиб $y_2=0$. Зависимость k_1 от l определяется, если приравнять к нулю определитель полученной системы уравнений:

$$0 = \begin{vmatrix} \sin[k_1(l_1-l)] & 0 & 0 & -\sin[bk_1(l_1-l)] & -\cos[bk_1(l_1-l)] \\ \cos[k_1(l_1-l)] & 0 & 0 & -b\cos[bk_1(l_1-l)] & -b\sin[bk_1(l_1-l)] \\ 0 & -\sin(bk_1l_1) & \cos(bk_1l_1) & \sin(bk_1l_1) & \cos(bk_1l_1) \\ 0 & -a\cos(ak_1l_1) & a\sin(ak_1l_1) & b\cos(bk_1l_1) & -b\sin(bk_1l_1) \\ 0 & \sin[ak_1(l_1+l_2-l)] & \cos[ak_1(l_1+l_2-l)] & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Зная зависимость $k_1 = f(l)$ и используя выражение (8), можно определить критическую силу. Дальнейшее исследование проводится аналогично вышеизложенному.

Сборка соединений с большой длиной сопряжения связана со определенными сложностями. Сборка таких соединений путем запрессовки осложняется возможной потерей устойчивости. Осуществление сборки на полную длину другими способами (нагрев втулки, охлаждение вала, комбинированный способ) затруднено вследствие большой длины сопряжения и связанными с этим значительными потерями тепла в процессе сборки. В этом случае

рекомендуется производить сборку в два этапа. На первом этапе осуществляется сборка на длину l , большую l_2 , с нагревом втулки, охлаждением вала или комбинированным способом. На втором этапе производится допрессовка, когда гарантируется устойчивость деталей соединения.

Сформулируем рекомендации по сборке соединений и последовательность оценки на устойчивость при запрессовке.

Проверяется выполнение условия (6). Если оно не выполняется, исследуется возможность изменения длины запрессовки с учетом соотношений (10), (11), (14). Если длину запрессовки изменить нельзя, рассматривается возможность увеличения диаметра соединения [8]. Также для выполнения условия (15) могут быть уменьшены контактное давление и коэффициент трения при запрессовке. Для уменьшения контактного давления при сборке может быть применено торцевое сжатие втулок, приводящее к увеличению диаметра отверстия и уменьшению натяга [9]. Эффективным средством, уменьшающим коэффициент трения при запрессовке в 1,5–2 раза, является смазка с добавками поверхностно-активных веществ [10, 11]. Также уменьшению коэффициента трения способствуют использование расплавов легкоплавких металлов и сплавов (галлий, сплав Вуда), наложение при запрессовке ультразвуковых колебаний [12]. Если эти рекомендации не позволяют обеспечить выполнение требуемых условий, для устранения неустойчивости можно рекомендовать сборку с использованием промежуточной втулки, повышающей жесткость основной втулки (см. рис. 1). Втулка изготавливается длиной $(L-l)$ и сопрягается с валом по посадке, например, $\varnothing d \left(\frac{H8}{f8} \right)$.

Внешний диаметр втулки с учетом коэффициента запаса определяется из условия (15):

$$d_v = 2L \sqrt{\frac{\xi^2 f P}{E_1}}. \quad (20)$$

Таким образом, рассмотренная оценка позволяет выбрать параметры соединения и технологию сборки, исключающие потерю устойчивости [13, 14]. Предложены технические решения, позволяющие реализовать более совершенные технологические процессы сборки соединений [10, 12, 15–17].

Список литературы

1. Дулотин В. А. Технология сборки автофретированием и несущая способность соединений с натягом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. Ижевск, 1993. 18 с.
2. Абрамов И. В., Фаттиев Ф. Ф., Дулотин В. А. [и др.]. Высокотензионные соединения с гарантированным натягом. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2002. 300 с.
3. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. М. : Наука, 1967. 397 с.
4. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Л. Расчеты на прочность деталей машин. М. : Машиностроение, 1979. 702 с.
5. Лурье А. И. Пространственные задачи теории упругости. М. : Гостехиздат, 1955. 491 с.
6. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М. : Машиностроение, 1977. 526 с.

7. Крагельский И. А., Алисин В. В. Трение, изнашивание и смазка : справочник : в 2 кн. М. : Машиностроение, 1978. Кн. 1. 400 с.
8. Курносов Н. Е., Эрленекоев С. В., Еремиев В. А. Выбор оптимальной длины и диаметра соединений с натягом малых размеров, выполненных из ферромагнитных сплавов // Известия вузов. Машиностроение. 1984. № 5. С. 26–30.
9. А.с. 1189636 СССР, МКИ 4 В 23 Р 11/02, 19/02. Способ сборки с натягом соединения деталей типа вал-втулка и устройство для его осуществления / Э. В. Рыжов, Н. Е. Курносов, И. И. Воячек, В. В. Тихонов, А. В. Сверчков (СССР). № 376119/25-27 ; заявл. 05.07.1984 ; опубли. 07.11.1985, Бюл. № 41.
10. А.с. 825229 СССР, МКИ В 21 Д 3/00. Способ калибровки / А. С. Скворцов, Г. Ф. Тютиков, Н. Е. Курносов, В. Б. Моисеев, Г. А. Семелидис, В. Н. Фадеев (СССР). Опубли. 04.05.1981, Бюл. № 16.
11. А.с. 1371836 СССР, МКИ 4 В 23 Р 11/02. Способ неподвижного соединения деталей / В. М. Голощапов, Н. Е. Курносов, И. И. Воячек, А. А. Кирпичников, В. Н. Белов, А. В. Кораблев (СССР). № 3989295/31-27 ; заявл. 16.12.1985 ; опубли. 07.02.1988, Бюл. № 5.
12. А.с. 634906 СССР, МКИ В 23 Р 11/02. Способ соединения деталей с натягом / Н. Е. Курносов, В. И. Сазоненко, В. Б. Моисеев, М. М. Свицкий, Г. Ф. Тютиков (СССР). № 25053304/25-27 ; заявл. 04.07.1977 ; опубли. 30.11.1978, Бюл. № 44.
13. Курносов Н. Е., Кирпичников А. А. Применение поверхностно-активных веществ при сборке нежестких деталей с натягом // Механизация и автоматизация сборочных и монтажных работ в приборостроении : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1983. С. 9–10.
14. Курносов Н. Е., Еремиев В. А., Зубков А. Б. Расчет соединения поршневой головки шатуна с запрессованной втулкой // Двигателестроение. 1987. № 3. С. 18–21.
15. А.с. 867592 СССР, МКИ В 23 Р 11/02; F 16 В 4/00. Способ соединения деталей с натягом термическим методом / А. Н. Мартынов, И. И. Воячек, В. С. Григорьев, Н. Е. Курносов (СССР). № 2829129/25-27 ; заявл. 12.10.1979 ; опубли. 30.09.1981, Бюл. № 36.
16. А.с. 1060388 СССР, МКИ 3 В 23 Р 11/02. Способ соединения с натягом деталей типа вал-втулка / А. Н. Мартынов, В. С. Григорьев, И. И. Воячек, Н. Е. Курносов, А. А. Кирпичников (СССР). № 3388426/25-27 ; заявл. 25.01.1982 ; опубли. 15.12.1983, Бюл. № 46.
17. А.с. 1159751 СССР, МКИ 4 В 23 Р 11/02. Способ тепловой сборки с натягом охватываемой и охватывающей деталей / Н. Е. Курносов, И. И. Воячек, С. В. Эрленекоев, Н. М. Москвитин (СССР). № 3547639/25-27 ; заявл. 24.11.1982 ; опубли. 07.06.1985, Бюл. № 21.

References

1. Dulotin V.A. *Autofrettage assembly technology and load-bearing capacity of tension joints*. PhD abstract: 05.02.08. Izhevsk, 1993:18. (In Russ.)
2. Abramov I.V., Fattiev F.F., Dulotin V.A. et al. *Vysokonapryazhennye soedineniya s garantirovannym natyagom = High-tension connections with guaranteed tension*. Izhevsk: Izd-vo IzhGTU, 2002:300. (In Russ.)
3. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov = Strength of materials*. Moscow: Nauka, 1967:397. (In Russ.)
4. 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.)
5. Lur'e A.I. *Prostranstvennye zadachi teorii uprugosti = Spatial problems of elasticity theory*. Moscow: Gostekhizdat, 1955:491. (In Russ.)
6. 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.)

7. Kragel'skiy I.A., Alisin V.V. *Trenie, iznashivanie i smazka: spravochnik: v 2-kh kn. = Friction, wear and lubrication: handbook: in 2 books.* Moscow: Mashinostroenie, 1978; Bk.1:400. (In Russ.)
8. Kurnosov N.E., Erlenekov S.V., Eremin V.A. Selection of the optimal length and diameter of small-sized interference joints made of ferromagnetic alloys. *Izvestiya vuzov: Mashinostroenie = University proceedings. Mechanical engineering.* 1984;(5):26–30. (In Russ.)
9. A.s. 1189636 SSSR, MKI 4 V 23 R 11/02, 19/02. *Sposob sborki s natyagom soedineniya detaley tipa val-vtulka i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya = Method of assembly with tension of connection of parts of the shaft-sleeve type and device for its implementation.* E.V. Ryzhov, N.E. Kurnosov, I.I. Voyachek, V.V. Tikhonov, A.V. Sverchikov (SSSR). № 376119/25-27; appl. 05.07.1984; publ. 07.11.1985, Bull. № 41. (In Russ.)
10. A.s. 825229 SSSR, MKI V 21 D 3/00. *Sposob kalibrovki = Calibration method.* A.S. Skvortsov, G.F. Tyutikov, N.E. Kurnosov, V.B. Moiseev, G.A. Semelidis, V.N. Fadeev (SSSR). Publ. 04.05.1981, Bull. № 16. (In Russ.)
11. A.s. 1371836 SSSR, MKI 4 V 23 R 11/02. *Sposob nepodvizhnogo soedineniya detaley = Method of fixed connection of parts.* V.M. Goloshchapov, N.E. Kurnosov, I.I. Voyachek, A.A. Kirpichnikov, V.N. Belov, A.V. Korablev (SSSR). № 3989295/31-27; appl. 16.12.1985; publ. 07.02.1988, Bull. № 5. (In Russ.)
12. A.s. 634906 SSSR, MKI V 23 R 11/02. *Sposob soedineniya detaley s natyagom = Method of joining parts with tension.* N.E. Kurnosov, V.I. Sazonenko, V.B. Moiseev, M.M. Svirskiy, G.F. Tyutikov (SSSR). № 25053304/25-27; appl. 04.07.1977; publ. 30.11.1978, Bull. № 44. (In Russ.)
13. Kurnosov N.E., Kirpichnikov A.A. Application of surfactants in assembly of flexible parts with interference fit. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya sborochnykh i montazhnykh rabot v priborostroenii: sb. nauch. tr. = Mechanization and automation of assembly and installation works in instrument making: collected papers.* Saratov: Izd-vo Saratovsk. un-ta, 1983:9–10. (In Russ.)
14. Kurnosov N.E., Eremin V.A., Zubkov A.B. Calculation of the connection of the piston head of the connecting rod with a pressed bushing. *Dvigatelsestroenie = Engine building.* 1987;(3):18–21. (In Russ.)
15. A.s. 867592 SSSR, MKI V 23 R 11/02; F 16 V 4/00. *Sposob soedineniya detaley s natyagom termicheskim metodom = Method of joining parts with tension using thermal method.* A.N. Martynov, I.I. Voyachek, V.S. Grigor'ev, N.E. Kurnosov (SSSR). № 2829129/25-27; appl. 12.10.1979; publ. 30.09.1981, Bull. № 36. (In Russ.)
16. A.s. 1060388 SSSR, MKI 3 V 23 R 11/02. *Sposob soedineniya s natyagom detaley tipa valvtulka = Method of connecting with tension parts of the valve-sleeve type.* A.N. Martynov, V.S. Grigor'ev, I.I. Voyachek, N.E. Kurnosov, A.A. Kirpichnikov (CCCR). № 3388426/25-27; appl. 25.01.1982; publ. 15.12.1983, Bull. № 46. (In Russ.)
17. A.s. 1159751 SSSR, MKI 4 V 23 R 11/02. *Sposob teplovoy sborki s natyagom okhvatyvayemy i okhvatyvayushchey detaley = Method of thermal assembly with tension of male and female parts.* N.E. Kurnosov, I.I. Voyachek, S.V. Erlenekov, N.M. Moskvitin (SSSR). № 3547639/25-27; appl. 24.11.1982; publ. 07.06.1985, Bull. № 21. (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 23.04.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 28.05.2024

Принята к публикации / Accepted 11.09.2024