

УДК621.7

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ  
НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ С  
НАТЯГОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННЫХ  
СЕГМЕНТНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ  
ЗАКАЛКОЙ**

*Горев Н.Н., студент 5 курса инженерного факультета  
Каленова И.Н., студентка 2 курса инженерного факультета  
Научный руководитель – Морозов А.В., кандидат  
технических наук, доцент  
ФГБОУ ВПО «Ульяновская государственная  
сельскохозяйственная академия им. П.А. Столыпина»*

**Ключевые слова:** *соединения с натягом, электромеханическая закалка, микрорельеф, нагрузочная способность.*

*В данной работе предложен способ повышения нагрузочной способности соединений с натягом сегментной электромеханической закалкой сопрягаемых поверхностей фасонным бронзовым инструментом. Изложено теоретическое обоснование повышения нагрузочной способности соединений с применением данной технологии.*

С целью повышения нагрузочной способности соединений с натягом мы предлагаем выполнять сегментную электромеханическую закалку сопрягаемых поверхностей фасонным бронзовым инструментом [1] для создания участков регулярной микротвердости. В результате деформаций незакаленных участков при тепловой сборке соединения, увеличивается площадь контакта, в результате чего повышается нагрузочная способность соединения.

Модель по определению нагрузочной способности соединений с натягом строится при следующих допущениях: соединение вал- втулка собрана тепловым способом, давления в

стыке от посадочного натяга равномерно распределены по площади контакта, деформации вала и втулки находятся в упругой области и, следовательно, подчиняются решению Ляме [3].

Номинальное давление в контакте рассчитывается по формуле:

$$p = \frac{\frac{\Delta_{ном}}{d}}{\frac{1}{E_1} C_1 - \mu + \frac{1}{E_2} C_2 + \mu_2} \quad (1)$$

С учетом сближения контактирующих поверхностей,

$$p = \frac{\frac{\Delta_{ном} - 2\varepsilon}{d}}{\frac{1}{E_1} C_1 - \mu + \frac{1}{E_2} C_2 + \mu_2} \quad (2)$$

где  $\Delta_{ном}$  - номинальный натяг;  $\varepsilon$  - сближение контактирующих поверхностей за счет смятия или внедрения вершин микронеровностей в контр тело ;d-посадочный диаметр;  $E_1, E_2, E_3, \mu_2$  -соответственно модули упругости и коэффициенты Пуассона вала и втулки;  $C_1, C_2$ -коэффициенты Ляме, определяемые по формуле [3]:

$$C_1 = \frac{1 + \left(\frac{d_1}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_1}{d}\right)^2}, \quad C_2 = \frac{1 + \left(\frac{d}{d_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{d}{d_2}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $d_1, d_2$ -соответственно внутренний и наружный диаметры вала и втулки.

При прессовой сборке вследствие смятия вершин микронеровностей сближение рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = 1,2 R_{a1} + R_{a2}, \quad (4)$$

где  $R_{a1}, R_{a2}$ -высоты микронеровностей соответственно вала и втулки ,мкм.

Уменьшение расчетного натяга при тепловой сборке

можно определить с учетом топографии контактирующих поверхностей для этого необходимо применить метод последовательных приближений.

Сближение контактирующих поверхностей при упругих деформациях в зонах фактического касания в зависимости от приложенного контурного давления вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \left[ \frac{5 p_c R^{0.5} 1 - \mu^2 R_{\max}^v}{b E \nu \nu - 1 k_1} \right]^{\frac{2}{2\nu+1}} \approx \left[ \frac{3,13 p_c R^{0.5} 1 - \mu^2 R_{\max}^v}{E} \right]^{\frac{2}{2\nu+1}} \quad (5)$$

где  $p_c$ -контурное давление,  $R_{\max}$ -максимальная высота микронеровностей; $\nu$ -параметры начального участка кривой опорной поверхности.

Для контакта двух шероховатых тел произведем следующую замену:

$$R_{\max} = R_{\max 1} + R_{\max 2} , \quad (6)$$

$$\nu = \nu_1 + \nu_2$$

Где индексы 1 и 2 относятся к первой и второй поверхности.

Подставляя в формулу (5) номинальное давление  $p$ , вычисленное по формуле (1) вместо контурного давления  $p_c$ , определяем в первом приближении  $\varepsilon$ .

Затем, подставив в формулу (2)  $\varepsilon$ , уточним величину контурного давления в контакте  $p_c$ . При необходимости указанные операции повторяются для достижения необходимой точности.

В тех случаях, когда вал выступает за торцы втулки, распределение давлений по длине сопряжения становится неравномерным, возрастая по мере приближения к торцам соединения. Неравномерность давлений обычно учитывается введением безразмерного коэффициента-  $X$ , который определяется по графикам в зависимости от  $\frac{d_1}{d}$  и  $\frac{l}{d}$ . В работе представленная графическая зависимость аппроксимирована выражением:

$$\chi = \left( 1 - \frac{1}{5,7 \frac{l}{d} + e^{2,5 \frac{l}{d}}} \right) \left( 1 - \frac{0,08}{\frac{l}{d}} \frac{d_1}{d_2} \right) \quad (8)$$

Таким образом, с учетом (5) давление в контакте можно определить по формуле:

$$p = \frac{\Delta_{ном} - 2\varepsilon}{\left( \frac{\chi}{E_1} C_1 - \mu + \frac{1}{E_2} C_2 + \mu_2 \right)} \quad (9)$$

Крутящий момент, передаваемый соединением, определяется по формуле:

$$M_{кр} = p\pi \frac{d^2}{2} lf, \quad (10)$$

где  $f$ - коэффициент сцепления, определяемый экспериментально.

Помимо расчета крутящего момента передаваемого соединением, проводят проверку прочности деталей по допускаемым напряжениям.

Напряжения на внутренней поверхности втулки радиусом  $d$  определяются по формуле:

$$\sigma_{20} \alpha = \frac{\left( \frac{d_2}{2} \right)^2 + \left( \frac{d}{2} \right)^2}{\left( \frac{d_2}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} \right)^2} p \alpha \quad (11)$$

$$\sigma_{20} \alpha = -p \alpha \quad (12)$$

Соединение будет находиться в упругом состоянии, если выполняется условие:

Для втулки:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_\tau^2 - \sigma_\tau \sigma_0^2 + \sigma_0^2} = p \alpha \frac{\sqrt{3\left(\frac{d_2}{2}\right)^4 + \left(\frac{d}{2}\right)^4}}{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \leq \sigma_T \quad (13)$$

Где  $\sigma_\tau$ ,  $\sigma_0$  - нормальные напряжения соответственно в радиальном направлении и по образующей цилиндра.

$$\text{При } \frac{d_2}{2} \geq 3d \quad p \alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_T$$

Для вала:

$$\sigma_i = p \alpha \leq \sigma_T \quad (14)$$

$$\text{При полом валу } \sigma_i = p_a \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^4 - 3\left(\frac{d_1}{2}\right)^4}}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2}$$

$$\text{При } d = d_1 \quad \sigma_i = p_a \frac{2\left(\frac{d}{2}\right)^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2}$$

Исследуем влияние сегментной электромеханической закалки на длину фактического контакта модифицированного соединения с натягом.

Согласно предложенному методу на посадочных поверхностях контактирующих тел выполнены электромеханической закалкой дорожки имеющие направление ,перпендикулярное вектору сдвигающей силы.

В результате сборки соединения на сопрягаемых поверхностях деталей образуются выступы и впадины, обусловленные деформацией незакаленных участков поверхности.

Рельеф поверхности образующийся при сборке - близок к гармонической функции. Поэтому для анализа отклонения

профиля контур сечения действительной поверхности можно характеризовать совокупностью гармонических составляющих отклонений профиля, определяемых спектрами фазовых углов и амплитуд, т.е. совокупностью отклонений с различными частотами. Для аналитического изображения действительного профиля(контур сечения),применяя полярную систему координат и рассматривая отклонения радиуса-вектора  $\Delta R$  как функцию полярного угла  $\varphi$ , можно представить отклонение контура поперечного сечения детали в виде ряда Фурье.

$$p \varphi = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{k=\infty} a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi, \quad (15)$$

Где  $a_k, b_k$ - коэффициенты ряда Фурье  $k$ -й гармоники;  $k$ - порядковый номер составляющей гармоники  $\frac{a_0}{2}$  - нулевой член разложения.

В работе ряд Фурье с ограниченным числом членов представлен тригонометрическим полиномом :

$$p \varphi = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{k=p} c_k \cos k\varphi + \varphi_k, \quad (16)$$

где  $c_k$  - амплитуда  $k$ -й гармоники;  $\varphi_k$  - начальная фаза;  $p$ - порядковый номер высшей гармоники полинома.

Нулевой член разложения в общем случае является отклонением действительного размера от номинального и определяется по формуле:

$$\frac{c_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varphi d\varphi \quad (17)$$

Первый член разложения ряда Фурье  $c_1 \cos \varphi + \varphi_1$  характеризуется несовпадением действительного центра вращения от номинального. Члены ряда, начиная со второго и до  $k=p$  образуют спектр отклонений формы деталей в поперечном направлении. При этом второй член ряда Фурье

$c_2 \cos \varphi + \varphi_2$  выражает овальность, третий  $c_3 \cos \varphi + \varphi_3$  - огранку с трех - вершинным профилем и т.д. Последующие члены ряда, имеющие номер  $k \geq p$ , выражают волнистость.

Согласно предложенному методу повышения нагрузочной способности соединения с натягом рассмотрим случай, когда обеспечено равенство высотно- шаговых параметров выступов после сборки соединения. Следовательно обеспечено равенство амплитуд  $k$ -й гармоники-  $c_k$ , а также начальной фазы-  $\varphi_0$ . Тогда выражение (17) можно представить в виде:

$$p \varphi = \frac{d}{2} + \frac{h}{2} \cos n\varphi, \quad (18)$$

Где  $\varphi = 0 \dots 2\pi$  угол контакта;  $n$ - количество выступов на сопрягаемых поверхностях.

Это уравнение (19) тождественно как для вала, так и для втулки.

Длина модифицированной линии контакта составит:  $l = \int_0^{2\pi} \sqrt{p^2 \varphi^2 + p'^2 \varphi'^2} d\varphi,$  (19)

Где  $p \varphi$  - радиус модифицированной поверхности в полярных координатах;  $p' \varphi'$  - производная радиуса модифицированной поверхности в полярных координатах.

Следовательно, длина контакта увеличивается на величину:

$$k = \frac{\int_0^{2\pi} \sqrt{p^2 \varphi^2 + p'^2 \varphi'^2} d\varphi}{\frac{\pi i k}{\chi_1}} \quad (20)$$

$$\Delta_{\text{экс}} = \Delta_{\text{ном}} + \frac{l}{\pi} - d \quad (21)$$

Вследствие увеличения фактической площади контакта за счет создания регулярного рельефа контактирующих

поверхностей сопрягаемых деталей, повышения физико-механических свойств поверхностного слоя в электромеханического воздействия в модели нагрузочной способности необходимо введение коэффициентов удельной прочности  $w$ ,  $v$ .

#### **Библиографический список:**

5. Морозов А.В., Горев Н.Н. Патент на полезную модель «Дорн для выборочной электромеханической закалки цилиндрических отверстий деталей» № 123368 опубл. 27.12.2012 Бюл. № 36
6. Алёхин А. Г. Повышение нагрузочной способности соединения с натягом на основе лазерной закалки // Волгоград 2005г.
7. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник. - М.: Машиностроение, 1984.-280 с, ил.

#### **THEORETICAL BASIS INCREASED LOAD ABILITY OF COMPOUNDS WITH INTERFERENCE PREPROCESS SEGMENT ELECTROMECHANICAL HARDENING**

*Morozov A.V., Gorev N.N., Kalenova I.N.*

**Key words:** *connections with interference, electromechanical hardening, micro, ratings.*

*This paper presents a method for increasing the load capacity of compounds with interference segment electromechanical hardened mating surfaces shaped bronze tools. The theoretical justification for increasing the load capacity of compounds with the use of this technology.*