

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ, СОБРАННЫХ ТЕПЛОВЫМ МЕТОДОМ

1. Постановка проблемы

Прочность соединений с натягом, собранных тепловым методом с использованием различных покрытий охватываемой детали (вала) во многом определяется прочностными свойствами сформированного слоя [1]. В настоящее время большинство предлагаемых расчётов прочности скрепления деталей неподвижных цилиндрических соединений сводится к определению контактных давлений и касательных напряжений без промежуточного слоя [2]. Поэтому определение степени влияния имеющегося в соединении покрытия на прочность скрепления деталей является актуальной задачей и представляет практический интерес. Одним из главных параметров несущей способности соединений является усилие относительного сдвига деталей. Очевидно, что относительный сдвиг деталей происходит в результате разрушения сформированного в зоне их контакта промежуточного слоя. Поэтому, зная компоненты тензора напряжений промежуточного слоя, можно определить различные его прочностные характеристики, в частности усилие сдвига F_c .

2. Изложение основного материала

Рассмотрим схему теплового соединения втулки с валом, показанную на рис.1

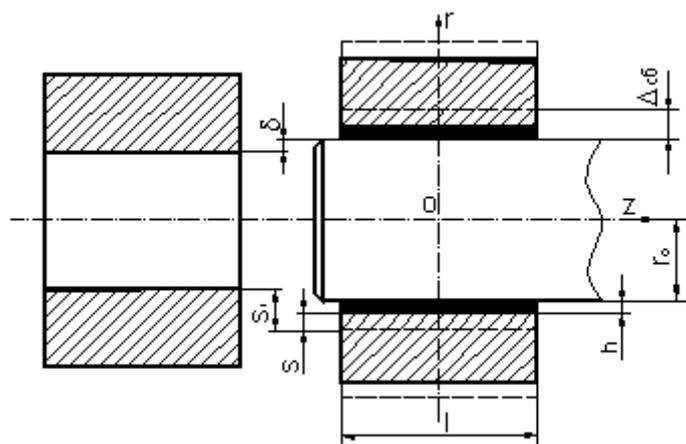


Рис. 1 – Схема соединения втулки с валом

Усилие скрепления деталей соединения, собранного тепловым способом с использованием покрытий зависит от геометрии деталей соединения, свойств сформированного слоя и его толщины h . Толщину слоя определим исходя из динамики формирования соединения. Предположим, что скорости расширения втулки в процессе нагрева и её сближения с поверхностью вала при остывании одинаковы и равны V_o . Путь, пройденный посадочной поверхностью втулки при расширении до необходимого сборочного зазора, обозначим через S_1 , а путь, пройденный этой же поверхностью при сближении с валом до окончательного формирования промежуточного слоя толщиной h , через S . Тогда:

$$S_1 = V_o \cdot t_1; \quad S = V_o \cdot t; \quad (1)$$

где t_1 – время расширения втулки;

t – время посадки её на вал.

Из геометрии соединения видно, что:

$$V_o \cdot t_1 = \delta + \Delta_{c\bar{o}}; \quad (2)$$

где δ – натяг соединения;

$\Delta_{c\bar{o}}$ – сборочный зазор.

Так как скорости расширения и посадки втулки равны, то:

$$S = (\delta + \Delta_{c\bar{o}}) \cdot q \quad (3)$$

где $q = t/t_1$ – коэффициент формирования соединения.

Образующийся между сопряжёнными поверхностями промежуточный сформированный слой толщины h будем считать постоянным по длине и радиусу соединения. Величину h/r_o назовём относительной толщиной слоя и обозначим через ε . Так как из рис. 1 $h = \Delta_{c\delta} - S$, то $h = \Delta_{c\delta} - (\delta + \Delta_{c\delta}) \cdot q$ тогда:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{c\delta}}{r_o} - \frac{\delta + \Delta_{c\delta}}{r_o} \cdot q \quad (4)$$

Для определения физических свойств слоя введём параметр, характеризующий жёсткость промежуточного слоя, находящегося между сопряжёнными поверхностями и воспринимающего давление остывающей втулки с усилием P , являющимся функцией от времени остывания t . Допустим, что при усилии P_1 слой толщиной h_1 имеет поверхность S_1 , а при изменении усилия до P_2 сжатый слой толщины h_2 имеет поверхность S_2 . Абсолютную величину отношений приращений $[\Delta P] = P_2 - P_1$ и $[\Delta S] = S_1 - S_2$ назовём коэффициентом жёсткости γ промежуточного слоя:

$$\gamma = \left[\frac{\Delta P}{\Delta S} \right] \quad (5)$$

Для рассматриваемого цилиндрического соединения имеем:

$$\gamma = \frac{\Delta P}{2\pi l(h_1 - h_2)} \quad (6)$$

Из анализа (6) следует, что коэффициент жёсткости γ является величиной векторной, так как усилие \vec{P} определяется величиной и направлением составляющих сил по осям r , z и φ . Поэтому $\vec{P} = \vec{P}_r + \vec{P}_z + \vec{P}_\varphi$.

Если за параметр функции \vec{P} выбрать изменение поверхности S в процессе деформации, то $\vec{P} = \vec{P}(S)$. Предел отношения

$$\frac{\Delta P}{\Delta S} \rightarrow \frac{dP}{dS}, \text{ если, } \Delta S \rightarrow 0 \text{ тогда имеем } \frac{dP}{dS} = \gamma \text{ и с учётом координат } r, z, \varphi$$

$$\frac{d\vec{P}}{dS} = \frac{d\vec{P}_r}{dr} + \frac{d\vec{P}_z}{dz} + \frac{d\vec{P}_\varphi}{d\varphi} \quad .3 \quad \frac{d\vec{P}}{dS} = \frac{d\vec{P}_r}{dr} + \frac{d\vec{P}_z}{dz} + \frac{d\vec{P}_\varphi}{d\varphi} \quad (7)$$

Если ввести единичные векторы в направлении r, z, φ соответственно $\vec{e}_r, \vec{e}_z, \vec{e}_\varphi$, то составляющие вектора γ в последнем уравнении можно записать следующим образом:

$$\frac{d\vec{P}_r}{dS} = E \vec{e}_r; \quad \frac{d\vec{P}_z}{dS} = \mu \vec{e}_z; \quad \frac{d\vec{P}_\varphi}{dS} = G \vec{e}_\varphi, \quad (8)$$

где E, μ, G – модули упругости материала сформированного слоя в направлении r, z, φ . Теперь абсолютная величина γ может быть определена как:

$$\gamma = \sqrt{E^2 + \mu^2 + G^2} \quad (9)$$

Для нахождения величины γ при фиксированных значениях

сформированного промежуточного слоя $\varepsilon = \frac{h}{r_0}$ используем энергетические характеристики процесса соединения. Обозначим энергию расширенной втулки W , которая расходуется на энергию деформирования слоя W_c и энергию тепловых потерь, W_n то есть

$$W = W_c + W_n \quad (10)$$

Пренебрегая энергией тепловых потерь W_n ввиду их малости, считаем, что энергия расширенной втулки полностью идёт на формирования слоя в соединении с натягом.

Расширяясь при нагреве на величину $\Delta_{c\sigma} + \delta$, втулкой выполняется работа, которую можно вычислить следующим образом. Очевидно, что изменение работы пропорционально изменению усилия dP

$$dW = (\Delta_{c\sigma} + \delta) dP \quad (11)$$

Для нахождения dP втулки воспользуемся следующими соображениями. Предполагая, что втулка, нагреваясь и остывая, эквивалентна некоторой

пружине, обозначим её жёсткость через C . Изменение внутренней поверхности втулки после нагревания обозначим через $\Delta S \rightarrow dS$. Далее считаем, что величина усилия, разжимающего и сжимающего втулку, пропорциональна изменению поверхности dS , то есть $dP = C \cdot dS$.

Рассматривая втулку как состоящую из суммы n колец, упругость

$$\sum_{i=1}^n C_i = C$$

каждого из которых соответствует жёсткости C_i , запишем

Воспользуемся формулой, которая выражает изменение диаметра i -го кольца толщины Δh_i в зависимости от модуля упругости материала втулки E , который одинаков для всех n колец

$$\Delta d_i = \frac{N \cdot d_i^2}{\Delta h_i \cdot E} \quad \text{или} \quad \Delta p_i = \frac{2N p_i^2}{\Delta h_i E}, \quad (12)$$

где N – давление, вызванное расширением i -го кольца;

p_i – радиус i -го кольца.

Умножая равенство (12) на ΔS получим:

$$\Delta p_i \cdot \Delta S = \frac{2N \cdot p_i^2 \cdot \Delta S}{\Delta h_i \cdot E} \quad \text{и} \quad \Delta S = \frac{2N \cdot p_i^2 \cdot \Delta S}{\Delta h_i \cdot E} \quad (13)$$

Очевидно, что $N \cdot \Delta S \sim dP = C_i \cdot dS \sim C_i \cdot \Delta S$, тогда:

$$\Delta p_i = \frac{2C_i \Delta S \cdot p_i^2}{\Delta h_i \cdot E} \quad (14)$$

Для i -го кольца толщиной Δh_i изменение коэффициента жёсткости можно записать в виде:

$$dC_i = \frac{\Delta h_i \cdot E \cdot dp}{2p^2} \quad (15)$$

Интегрируя в пределах от r_0 до r получим:

$$C_i = \frac{\Delta h_i \cdot E}{2} \int_{r_0}^r \frac{dp}{p^2} = \frac{\Delta h_i \cdot (r - r_0)}{2r_0 \cdot r} \quad .3 \quad \frac{\Delta h_i \cdot E}{2} \int_{r_0}^r \frac{dp}{p^2} = \frac{\Delta h_i \cdot (r - r_0)}{2r_0 \cdot r} \quad (16)$$

Суммируя последнее равенство по i , получим:

$$C = \frac{HE \cdot (r - r_0)}{2r_0 \cdot r} \quad .3 \quad \frac{HE \cdot (r - r_0)}{2r_0 \cdot r} \quad , \quad (17)$$

где H – толщина втулки;

r_0 – начальный внутренний радиус втулки. Жёсткость $C(r)$ может быть найдена для любого r .

Если начальный наружный радиус втулки $R_H = r$, то:

$$C = \frac{H^2 \cdot E}{r_0 \cdot R_H} \quad (18)$$

Энергию втулки W можно определить по формуле:

$$W = \frac{\Delta_{c\delta} + \delta}{r_0} \int_V C(r) dV \quad .3 \quad \frac{\Delta_{c\delta} + \delta}{r_0} \int_V C(r) dV \quad , \quad (19)$$

где $dV = r dr d\phi \cdot 3 \quad \phi \quad dz$. Подставляя в формулу (19) значение C из (17) получим:

$$W = \frac{\Delta_{c\delta} + \delta}{r_0} 2\pi l \int_{r_0}^{R_H} \frac{EH(r - r_0)}{r_0 \cdot r} r dr \quad .3 \quad \frac{\Delta_{c\delta} + \delta}{r_0} 2\pi l \int_{r_0}^{R_H} \frac{EH(r - r_0)}{r_0 \cdot r} r dr \quad (20)$$

Интегрируя окончательно имеем:

$$W = \frac{\pi l \cdot EH^3}{r_0^2} (\Delta_{c\delta} + \delta) \quad .3 \quad \frac{\pi l \cdot EH^3}{r_0^2} (\Delta_{c\delta} + \delta) \quad (21)$$

Энергия сжимаемого слоя W_c может быть определена по формуле:

$$W_c = \frac{2\pi l \int_{r_0}^{r_0+h} r \sigma_r dr}{3 \cdot 2\pi l \int_{r_0}^{r_0+h} r \sigma_r dr} \quad (22)$$

Подставляя значение σ_r в формулу (22), а затем интегрируя и пренебрегая величинами порядка ε^2 и выше, получим:

$$W_c = 2\pi l \gamma \frac{V_o \cdot t 2(1 + \varepsilon)}{r_o^2 (2 + \varepsilon)} \cdot 3 \gamma \frac{V_o \cdot t 2(1 + \varepsilon)}{r_o^2 (2 + \varepsilon)} \quad (23)$$

Так как $W = W_c$, а $\varepsilon = \frac{h}{r_o}$, то коэффициент жёсткости λ будет:

$$\lambda = \frac{EH^3 (\Delta_{сб} + \delta)(2r_o + h)}{8 \cdot r_o (r_o - \delta)^2 (\Delta - h)(r_o + h)} \quad (24)$$

На графике (рис. 2) показана зависимость между коэффициентами жёсткости и толщиной сформированного слоя в соединении вал–втулка с посадочным диаметром 40мм и наружным диаметром 80 мм для различных натягов. Возрастание значения λ с увеличением толщины сформированного слоя во всём диапазоне натягов свидетельствует о более высоких физико-механических свойствах используемого покрытия.

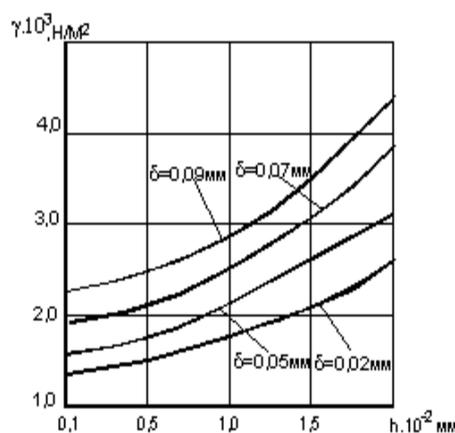


Рис. 2 – График зависимости коэффициента жёсткости от толщины сформированного слоя

Анализ графика показывает, что с увеличением давления на промежуточный слой в соединении его прочностные свойства возрастают.

Зная прочностную характеристику слоя γ и напряжения σ_{rz} , которые находятся интегрированием дифференциальных уравнений равновесия осесимметричного напряжённого состояния с учётом линейных соотношений между деформациями и напряжениями в локальной области, можем найти усилие сдвига F_c по формуле:

$$F_c = \frac{\pi.l^2\gamma.\delta(2 + \varepsilon)}{28\varepsilon} [2(1 + \varepsilon)^2 - (2 - \varepsilon)] \quad (25)$$

Для подтверждения полученной зависимости проведена серия экспериментальных исследований по тепловой сборке соединений с натягом с использованием в качестве покрытий различных сочетаний композиционных смесей. С этой целью были собраны несколько партий соединений диаметром посадочной поверхности 40 мм и длиной посадки 60 мм в диапазоне натягов от 0,015 до 0,090 мм. Валы и втулки с наружным диаметром 80 мм изготавливались из нормализованной стали Ст.45 с исходной шероховатостью 1,25 и 2,5. Сборка осуществлялась путём свободного введения вала с нанесённым тонким слоем вязкой композиционной смеси в нагретую до температуры 260 – 280 °С втулку.

После сборки и выдержки в течение нескольких суток проводились испытания прочности соединений путём выпрессовки вала с фиксацией усилия срыва и записью диаграмм.

Выводы Испытания показали вполне удовлетворительное совпадение усилий срыва, полученных расчётным путём и экспериментально. Незначительное расхождение наблюдалось для композиционных покрытий, включающих порошки мягких и пластичных металлов только в области повышенных натягов с приближением коэффициента жёсткости слоя γ к единице. Однако в связи с тем, что расчётные значения усилия сдвига в этом

случае несколько ниже экспериментальных, то полученная зависимость применима для любого диапазона натягов, так как всегда обеспечивает некоторый запас прочности.

Список использованных источников

1. Кравцов М. К. Промежуточные среды в соединениях с натягом : монография / М. К. Кравцов, А. А. Святуха, В. В. Чернов. – Х. : Штрих. 2001. – 200 с.

2. Расчёты на прочность в машиностроении : в 3-х т. / С. Д. Пономарёв, В. А. Бидерман, К. К. Лихарёв [и др.]. – М. : Машгиз, 1956 –

Т. 2. – 1958. – 884 с.

Т. 3. – 1959. – 974 с.

Святуха А.А. «Влияние свойств покрытий на прочность соединений с натягом, собранных тепловым методом».

В работе рассматривается принцип определения прочностных характеристик сформированного промежуточного слоя между сопряжёнными поверхностями соединений с натягом, собранных тепловым способом. Приведена методика расчёта прочности скрепления деталей соединений с натягом, собранных с использованием покрытий.

Ключевые слова: сборка, соединения, прочность, тепловой, покрытия, расчёт, свойства, метод.

Святуха А.Я. «Вплив властивостей покриттів на міцність з'єднань з натягом, зібраних тепловим методом».

У роботі розглядається принцип визначення характеристик міцності сформованого проміжного шару між спряженими поверхнями з'єднань з натягом, зібраних тепловим способом. Наведена методика розрахунку міцності скріплення деталей з'єднань з натягом, які зібрані з використанням покриттів.

Ключові слова: складання, з'єднання, міцність, тепловий, покриття,

розрахунок, властивість, метод.

Sviatukha A.A. «The influence of properties of coverings on durability of connections with a tightness, collected by a thermal method».

In this work we offer to consider about the principle of definition of durability's characteristics of a deformed intermediate layer between the interfaced surfaces of connections with a tightness, collected by a thermal method. The technique of calculation of durability of a fastening of details of connections with a tightness, collected by using the coverings is given in this work.

Key words: assembly, connections, durability, thermal, coverings, calculation, properties, a method.

Стаття надійшла до редакції 25 травня 2010 р.