# DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-51-60

# УДК 621

В. А. ПОПКОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. А. В. АЛЬХИМОВИЧ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

# НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ШКИВА И ПОЛОГО ВАЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГОРЯЧЕЙ ПОСАДКИ

#### Аннотация

Представлены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов образования поля остаточных напряжений при горячей посадке шкива на полый вал.

#### Ключевые слова:

компьютерное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, горячая посадка шкива на полый вал.

#### Для цитирования:

Попковский, В. А. Напряженно-деформированное состояние шкива и полого вала при использовании горячей посадки / В. А. Попковский, А. В. Альхимович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 51–60.

## Введение

Одним из популярных технологических процессов, используемых для получения неразъемных соединений, является посадка деталей с натягом.

Такого рода соединения образуются в результате упругопластического деформирования деталей в процессе их сборки из-за разности сопрягаемых размеров. В основном данный подход получения неразъёмного соединения используется при сопряжении деталей по цилиндрическим поверхностям.

Сборка соединений с натягом осуществляется либо запрессовкой, либо нагревом охватывающей или охлаждением охватываемой детали (рис. 1).



Рис. 1. Типы сборки соединений с натягом

© Попковский В. А., Альхимович А. В., 2024

Проведенные в этой области исследования показали, что прочностные характеристики соединений, полученных посредством использования температурного деформирования, в 1,5 выше, при прочих равных условиях, чем соединений, собираемых запрессовкой. На посадочной поверхности сопрягаемых деталей в результате одной из таких операций возникает внутреннее давление p, которое за счет наличия сил трения противодействует внешним воздействиям осевой нагрузки P и крутящего момента  $M_{\rm kp}$  (рис. 2).



Рис. 2. Соединение деталей с натягом и действующие нагрузки

Значение минимального натяга *p*<sub>min</sub> может быть определено исходя из следующих соотношений:

– для обеспечения неразъёмности соединения от действия осевой нагрузки *Р* 

$$p_{\min} \geq \frac{P}{f \cdot \pi \cdot d \cdot \ell};$$

 при обеспечении противодействия максимальному крутящему моменту *М*<sub>кр</sub> это условие имеет вид

$$p_{\min} \geq \frac{2 \cdot M_{\kappa p}}{f \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \ell};$$

 для случая совместного нагружения обеими внешними воздействиями расчет следует выполнять по формуле

$$p_{\min} \geq \frac{\sqrt{\left(\frac{2 \cdot M_{\mathrm{kp}}}{d}\right)^2 + P^2}}{f \cdot \pi \cdot d \cdot \ell}$$

где f – коэффициент трения в соединении, величина которого зависит от материала сопрягаемых деталей, шероховатости их поверхностей, значения внутреннего натяга. Значения коэффициентов трения f при различных покрытиях на стальных деталях приведены в табл. 1 [1–3].

Остановимся более подробно на температурной посадке деталей с натягом. Температура, до которой необходимо нагреть охватывающую деталь при практическом использовании данного типа посадки с натягом, находится в интервале 100 °С...400 °С. Конкретное значение используемой температуры

Машиностроение

выбирается исходя из необходимой величины натяга, коэффициента температурного расширения материала изделия и посадочного диаметра кольцевой поверхности сопряжения. В случае сопряжения стальных деталей необходимая температура нагрева охватывающей детали может быть определена посредством использования следующей приближенной формулы:

Таол. 1. Значения коэффициентов трения	Табл.	1. Значения	коэффициентов трения
--	-------	-------------	----------------------

 $T^{\circ} = (1350 / D + 90) ^{\circ}C,$ 

где *D* – посадочный диаметр детали, мм.

В результате наличия натяга p между сопрягаемыми деталями в них возникают радиальные  $\sigma_r$  и окружные  $\sigma_{\theta}$  напряжения, эпюры распределения которых представлены на рис. 3.

Покрытие	Cđ	Cu	Zn	Ni	Cr	Без покрытия			
покрытие	Cu	Cu	211	141	CI	Сборка прессованием	Нагревом или охлаждением		
f	<u>0,45</u>	0,48	0,54	<u>0,72</u>	0,85	0,1	0,15		
	0,51	0,63	0,70	0,54	0,46				
Примечание – В числителе даны значения коэффициентов трения в соединении, полученном									

*Примечание* – В числителе даны значения коэффициентов трения в соединении, полученном сборкой под прессом, а в знаменателе – при сборке с охлаждением вала



Рис. 3. Эпюры распределения напряжений в соединении цилиндрических деталей с натягом

Приведенное распределение напряжений (см. рис. 3) было получено в [4] в предположении, что в сопрягаемых деталях реализуется осесимметричное плоское напряженное состояние и действующие напряжения не превышают предела текучести от.

В реальных изделиях такого рода напряженно-деформированное состояние существенно отличается от осесимметричного плоского напряженного. Особенно это касается областей, в которых может проявляться концевой эффект. Значительное влияние на характер распределения остаточных напряжений могут оказывать также упругопластическое деформирование сопрягаемых материалов и нестационарное объемное температурное поле в процессе охлаждения при горячей посадке деталей.

Предметом проводимых в последующем исследований являлся анализ поля остаточных напряжений, возникающих при горячей посадке шкива на полый вал (рис. 4).



Рис. 4. Сборка деталей «шкив – полый вал», рассматриваемая для анализа поля остаточных напряжений при горячей посадке

Анализ напряженно-деформированного рассматриваемого изделия осуществлялся посредством использования метода конечных элементов, хорошо зарекомендовавшего себя при решении сложных прикладных задач, алгоритм которого реализован в компьютерной системе SolidWorks Simulation.

Рассмотрение данного процесса в первом приближении базировалось на использовании следующих допущений:

 теплофизические свойства материала являются независимыми параметрами от температуры;  материал шкива и полого вала одинаков – сталь Ст3;

шкив равномерно нагрет перед посадкой до температуры 100 °С;

 в момент посадки наружный диаметр полого вала и внутренний диаметр шкива одинаковы;

 остывание шкива осуществляется равномерно по объему без теплопередачи полому валу;

– алгоритм анализа напряженнодеформированного состояния сборки базируется на линейной постановке задачи (считается справедливым закон Гука).

Используя указанные допущения, была разработана конечно-элементная модель горячей посадки шкива на вал (рис. 5).

В результате проведения численного анализа было установлено распределение напряжений Von Mises (рис. 6).



Рис. 5. Конечно-элементная модель горячей посадки шкива на вал



Рис. 6. Эпюра распределения остаточных напряжений Von Mises

Машиностроение

Следует отметить, что напряжения Von Mises – это интегральный показатель, который учитывает все шесть компонент напряжений.

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left[ \left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z\right)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_x\right)^2 + 6 \cdot \left(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2\right) \right]}$$

Эпюра напряжений Von Mises позволяет в целом оценивать уровень нагруженности материала изделия во всех точках его объема. На рис. 6 показана эпюра распределения напряжений Von Mises по площади сечения соединения «полый вал - ступица», совпадающего с осью вращения. Как и предполагалось, наиболее нагруженными областями явились зоны, выделенные кружками (см. рис. 6), места резкого изменения жесткостных характеристик в радиальном направлении. Кроме того, судя по значениям максимальных напряжений (см. рис. 6), можно говорить о том, что материал соединения претерпевает упругопластическое деформирование.

Следует отметить, что в соответствии с используемой глобальной системой координат (см. рис. 6) нормальные напряжения, действующие в направлении оси X, в данном сечении одновременно являются радиальными напряжениями для цилиндрического соединения, т. е.  $\sigma_x = \sigma_r$ , а напряжения, действующие в направлении оси Y, совпадают с окружными напряжениями, т. е.  $\sigma_y = \sigma_{\theta}$ .

На рис. 7 и 8 приведены соответственно эпюры распределения радиальных  $\sigma_r$  и окружных  $\sigma_{\theta}$  напряжений по площади сечения.



Рис. 7. Эпюра распределения радиальных остаточных напряжений по площади сечения



Рис. 8. Эпюра распределения окружных остаточных напряжений по площади сечения

Для сопоставления полученных результатов распределения напряжений по радиусу с данными аналитических расчетов [4] (см. рис. 3) воспользуемся опцией Зондирование компьютерной системы SolidWorks Simulation. На рис. 9 и 10 приведены точки зондирования и соответствующие графики изменения компонент остаточных нормальных напряжений по толщине соединения.

Сопоставление данных, полученных посредством использования аналитического подхода [4] (см. рис. 3), и результатов численного анализа (см. рис. 9 и 10) говорит о достаточно хорошем согласовании соответствующих графиков и таким образом подтверждает верность созданной конечноэлементной модели.

С другой стороны, проведенный численный анализ показал, что наряду с радиальными и окружными напряжениями (см. рис. 9 и 10) в зоне контакта системы «полый вал – ступица», в результате горячей посадки, имеют место значительные осевые остаточные нормальные напряжения (рис. 11). Данное обстоятельство позволяет заключить, что напряженно-деформированное состояние в общем случае горячей посадки существенно отличается от плоского напряженного состояния и, по сути, явосесимметричным объемным ляется напряженным состоянием. Это необходимо учитывать при анализе закономерностей образования поля остаточных напряжений, образуемых в результате горячей посадки.



Рис. 9. График изменения радиальных остаточных напряжений по толщине соединения



Рис. 10. График изменения окружных остаточных напряжений по толщине соединения

Машиностроение



Рис. 11. Места зондирования и график изменения осевых остаточных напряжений, образуемых в результате горячей посадки в зоне контакта системы «полый вал – ступица»

## Выводы

По результатам проведенного численного имитационного моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Разработана 3D-модель неразъемного соединения системы «полый вал – ступица».

2. Создана конечно-элементная модель горячей посадки ступицы на полый вал, позволяющая в первом приближении провести анализ напряженнодеформированного состояния получаемого соединения в линейной постановке зависимости напряжения – деформации.

3. Сопоставительный анализ полу-

ченного поля остаточных напряжений с известными данными аналитических расчетов [4] показал достаточно хорошее совпадение характера его распределения, что подтверждает правомочность использования предлагаемой конечноэлементной модели.

4. Данные аналитических расчетов базировались на предположении об упругом деформировании материала и на том, что в рассматриваемом соединении реализуется плоское напряженное состояние. Вместе с тем проведенный численный анализ показал, что даже при предварительном нагреве ступицы до температуры 100 °C в соединении

возникают упруго-пластические деформации и поле остаточных напряжений существенно отличается от плоского напряженного состояния.

5. Проведенные исследования позволили сформулировать следующие требования к созданию усовершенствованной модели образования неразъемного соединения при горячей посадке системы «полый вал – ступица»:

 модель должна учитывать возможность упругопластического деформирования материала деталей соединения;

в модели должно рассматриваться нестационарное температурное поле процесса охлаждения ступицы на воздухе и теплопередачи от нее в полый вал;

 в модели должна быть предусмотрена возможность учета зависимости теплофизических свойств материалов соединения от температуры.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Орлов, П. И.** Основы конструирования: справочно-методическое пособие: в 2 кн. / П. И. Орлов; под ред. П. Н. Учаева. – 3-е изд., испр. – Москва: Машиностроение, 1988. – Кн. 2. – 544 с.: ил.

2. **Иванов, М. Н.** Детали машин: учебник для академического бакалавриата / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – 15-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2015. – 408 с.: ил.

3. Удалов, А. В. Контактные давления в прессовых соединениях вала и ступицы / А. В. Удалов, А. А. Удалов // Математический вестн. Вятского гос. ун-та. – 2017. – № 4.

4. **Писаренко, Г. С.** Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.

Статья сдана в редакцию 25 апреля 2024 года

Контакты:

viktorpopkovski@mail.ru (Попковский Виктор Александрович); llexa8787898@gmail.ru (Альхимович Алексей Викторович).

# V. A. POPKOVSKY, A. V. ALKHIMOVICH

# STRESS-STRAIN STATE OF A PULLEY AND HOLLOW SHAFT WHEN USING HOT FITTING

#### Abstract

The results of computer simulation of the formation of a residual stress field during hot fitting of a pulley on a hollow shaft by using the finite element method are presented.

Keywords:

computer modeling, finite element method, stress-strain state, hot fitting of a pulley on a hollow shaft. **For citation**:

Popkovsky, V. A. Stress-strain state of a pulley and hollow shaft when using hot fitting / V. A. Popkovsky, A. V. Alkhimovich // Belarusian-Russian University Bulletin. -2024.  $-N_{2}$  3 (84). -P. 51–60.