

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ С УЧЁТОМ ПЛАСТИЧНОСТИ

©2016 А.С. Злобин, Е.Е. Кочерова, Л.В. Денисов, А.А. Попков

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

MODELING OF RESIDUAL STRESSES IN CYLINDRICAL PARTS TAKING INTO ACCOUNT THE ELASTICITY

Zlobin A.S., Kocherova E.E., Denisov L.V., Popkov A.A. (Samara national research university,
Samara, Russian Federation)

The approach to residual stresses modeling in cylindrical parts is considered. Basic equations and assumptions are justified.

В исследовании рассмотрена задача моделирования некоторого преднагруженного состояния цилиндрической детали, которое бы соответствовало существующему в ней распределению остаточных напряжений. Пусть l_0 длина участка до возникновения в цилиндре остаточных напряжений. После некоторого внешнего воздействия в наружной части цилиндра (в диапазоне радиусов от r_1 до r_2) возникли осевые пластические деформации ε_{1-2}^{pl} этой части.

После снятия внешнего воздействия длина рассматриваемого участка стала равной l_2 . При этом, если бы наружная часть цилиндра не была связана с внутренней, то после снятия внешнего воздействия они имели бы длины l_1 и l_0 соответственно.

Таким образом, после снятия внешнего воздействия в цилиндре возникли пластические деформации ε_{1-2}^{pl} и вызванные ими упругие деформации наружной и внутренней частей ε_{1-2}^{el} и ε_{0-1}^{el} соответственно. Это приведёт к тому, что в наружной части возникнут остаточные напряжения $\sigma_{ост}$, а во внутренней — уравновешивающие их напряжения σ_{0-1} .

Тогда уравнение равновесия для рассматриваемого участка запишется следующим образом:

$$\sigma_{ост} A_{1-2} = \sigma_{0-1} A_{0-1}, \quad (1)$$

где $A_{0-1} = \pi r_1^2$ и $A_{1-2} = \pi (r_2^2 - r_1^2)$ — площади сечений внутренней и наружной частей цилиндра соответственной.

В то же время, исходя из условия совместности деформаций на незаделанном торце цилиндра, имеем:

$$\varepsilon_{1-2}^{pl} = \varepsilon_{0-1}^{el} + \varepsilon_{1-2}^{el}. \quad (2)$$

Уравнение (2) можно представить в виде:

$$\varepsilon_{1-2}^{pl} = \frac{\sigma_{0-1}}{E} + \frac{\sigma_{ост}}{E}. \quad (3)$$

С учётом уравнения (1) получим:

$$\varepsilon_{1-2}^{pl} = \frac{\sigma_{ост}}{E} \cdot \frac{A_{1-2}}{A_{0-1}} + \frac{\sigma_{ост}}{E}. \quad (4)$$

Отсюда получаем величину пластических деформаций, которую необходимо достичь в материале для получения заданного уровня остаточных напряжений $\sigma_{ост}$:

$$\varepsilon_{1-2}^{pl} = \frac{\sigma_{ост}}{E} \cdot \left(\frac{A_{1-2}}{A_{0-1}} + 1 \right). \quad (5)$$

В качестве внешнего воздействия, вызывающего пластические деформации ε_{1-2}^{pl} , целесообразно принять температурные деформации $\varepsilon_{1-2}^{th} = \alpha \Delta T$.

Здесь α — коэффициент линейного термического расширения материала; ΔT — изменение температуры наружной части цилиндра.

После нагрева наружной части цилиндра в нём возникнут температурные деформации, вызывающие упругие и пластические деформации:

$$\varepsilon_{1-2}^{th} = \varepsilon_{0-1}^{el} + \varepsilon_{1-2}^{el} + \varepsilon_{1-2}^{pl}. \quad (6)$$

Отметим, что значения упругих деформаций ε_{0-1}^{el} и ε_{1-2}^{el} в уравнении (6) будут отличаться от значений в уравнении (2), так как эти уравнения описывают различные этапы нагружения цилиндра. Аналогично

уравнению (5), исходя из условия равновесия, можно привести уравнение (6) к виду:

$$\varepsilon_{1-2}^{th} = \varepsilon_{1-2}^{el} \cdot \left(\frac{A_{1-2}}{A_{0-1}} + 1 \right) + \varepsilon_{1-2}^{pl}. \quad (7)$$

Билинейная кривая деформирования связывает величины ε_{1-2}^{el} и ε_{1-2}^{pl} следующим образом:

$$\varepsilon_{1-2}^{el} = \varepsilon_{1-2}^{pl} \cdot \frac{1}{\frac{E}{E^*} - 1} + \frac{\sigma_T}{E}, \quad (8)$$

где E^* — тангенс угла наклона второго участка кривой деформирования;

σ_T — предел текучести материала.

Тогда с учётом (7) имеем:

$$\alpha \Delta T = \left(\varepsilon_{1-2}^{pl} \cdot \frac{1}{\frac{E}{E^*} - 1} + \frac{\sigma_T}{E} \right) \cdot \left(\frac{A_{1-2}}{A_{0-1}} + 1 \right) + \varepsilon_{1-2}^{pl}. \quad (9)$$

$$\text{Обозначим } k = \frac{A_{1-2}}{A_{0-1}} + 1.$$

В итоге с учётом (5) получаем:

$$\Delta T = \frac{k}{\alpha E} \left[\sigma_{ост} \left(\frac{k}{\frac{E}{E^*} - 1} + 1 \right) + \sigma_T \right]. \quad (10)$$

Уравнение (10) показывает, какую температуру ΔT необходимо задать для наружной части цилиндра, чтобы после снятия этой температуры получить в нём требуемый уровень остаточных напряжений $\sigma_{ост}$.

Таким образом, изложенный подход позволяет определить в первом приближении уровень температурного воздействия, которое нужно приложить к детали, чтобы получить в ней требуемую величину остаточных напряжений.

УДК 621.787:539.319

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

©2016 В.П. Сазанов, А.П. Филатов, В.К. Шадрин, Н.Н. Микушев, Е.Ю. Исаев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

THE EXAMINATION OF HARDENING INFLUENCE ON THE ENDURANCE LIMIT OF PARTS HAVING A RECTANGULAR CROSS SECTION

Sazanov V.P., Filatov A.P., Shadrin V.K., Mikushev N.N., Isaev E.Yu. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

The comparison of endurance limits calculated by the average integral residual stresses criterion and experimental values of endurance limits of hardened specimens made of steel 45 having a rectangular cross section and a cut of semicircular profile has been shown that the difference doesn't exceed 7,2%.

Данное исследование является одной из апробаций применения разработанного расчётно-экспериментального метода, который основан на использовании современных расчётных комплексов, реализующих конечно-элементное моделирование (PATRAN/NASTRAN) [1], а также экспериментальных механических способов определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя. В работе была решена задача проверки практического применения используемых в вышеуказанном методе расчётных методик прогнозирования предела выносливости при упрочнении по-

верхности деталей на основании экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя образцов-свидетелей.

Расчётная часть исследований сравнивалась с результатами испытаний по определению предела выносливости при изгибе σ_{-1} образцов прямоугольного поперечного сечения [2] (рис. 1). Для данных испытаний были изготовлены образцы двух типоразмеров (табл. 1) из нормализованной стали 45 ($\sigma_s = 673$ МПа, $\sigma_{0,2} = 392$ МПа, $\delta = 20,3$ %, $\psi = 47,1$ %, $S_k = 1101$ МПа). Половина гладких