

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭПЮРЫ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ

Опыт эксплуатации конструкций в различных областях техники и результаты многочисленных экспериментов показывают, что остаточные напряжения существенно влияют на надёжность и долговечность деталей. В связи с этим задача учёта остаточных напряжений при прогнозировании ресурсных показателей деталей является весьма актуальной.

Ресурсные показатели, как правило, определяются исходя из анализа напряжённо-деформированного состояния (НДС) детали, рассчитанного для рабочих условий. Однако остаточные напряжения существуют в детали при отсутствии внешних воздействий (например, как следствие процесса изготовления). Это приводит к тому, что рассчитанное без учёта остаточных напряжений НДС детали отличается от реально возникающего в рабочих условиях. В этой связи возникает задача моделирования некоторого преднапряженного (преднапряжённого) состояния детали, которое бы соответствовало существующему в ней распределению остаточных напряжений.

Рассмотрим цилиндрическую деталь, заделанную с одного конца (рисунок 1). Будем считать, что незаделанный торец цилиндра не деформируется, то есть все точки поверхности торца перемещаются в осевом направлении на одну и ту же величину (условие совместности деформаций). Рассматриваемый с учётом указанных ограничений случай представляет собой задачу о конечном участке бесконечно длинного цилиндра.

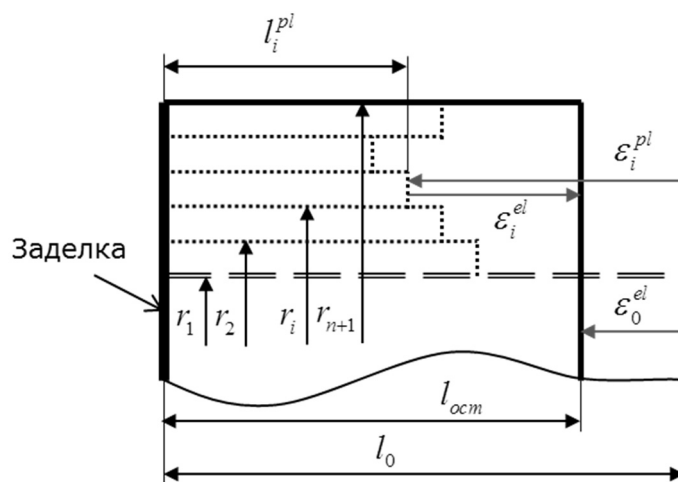


Рисунок 1 – Деформированное состояние цилиндрической детали с остаточными напряжениями

Пусть рассматриваемый участок имел длину l_0 до возникновения в цилиндре остаточных напряжений. И после некоторого внешнего воздействия в наружной части цилиндра (в диапазоне радиусов от r_1 до r_n) возникли осевые пластические деформации $\varepsilon^{pl} = \varepsilon^{pl}(r)$ этой части. После снятия внешнего воздействия длина рассматриваемого участка стала равной l_{ocm} . При этом, если бы наружная часть цилиндра не была связана с внутренней, то после снятия внешнего воздействия они имели бы длины $l^{pl} = l^{pl}(r)$ и l_0 соответственно.

Следовательно, после снятия внешнего воздействия в цилиндре возникли пластические деформации $\varepsilon^{pl} = \varepsilon^{pl}(r)$ и вызванные ими упругие деформации наружной и внутренней частей $\varepsilon^{el} = \varepsilon^{el}(r)$ и ε_0^{el} соответственно. Это приведёт к тому, что в наружной части возникнут остаточные напряжения $\sigma_{ocm} = \sigma_{ocm}(r)$, а во внутренней – уравновешивающие их напряжения σ_0 . Тогда уравнение равновесия для рассматриваемого участка запишется следующим образом:

$$\int_{r_1}^{r_n} \sigma_{ocm}(r) dr \cdot A_{1-n} = -\sigma_0 A_0, \quad (1)$$

где $A_0 = \pi r_1^2$ и $A_{1-n} = \pi(r_{n+1}^2 - r_1^2)$ – площади сечений внутренней и наружной частей цилиндра соответственно.

Условно разделим наружную часть на n слоёв кольцевого сечения: $r_1 - r_2, \dots, r_n - r_{n+1}$. Будем считать, что остаточные напряжения имеют постоянную величину в пределах каждого слоя. Тогда уравнение (1) можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{ocm\ i} A_i = -\sigma_0 A_0, \quad (2)$$

где $\sigma_{ocm\ i}$ – остаточные напряжения в i -м слое; $A_i = \pi(r_{i+1}^2 - r_i^2)$ – площадь сечения i -го слоя.

В то же время, исходя из условия совместности деформаций на незаделанном торце цилиндра, для любого i -го слоя имеем:

$$\varepsilon_i^{pl} = \varepsilon_0^{el} - \varepsilon_i^{el}. \quad (3)$$

Уравнение (3) можно представить в виде:

$$\varepsilon_i^{pl} = \frac{\sigma_0}{E} - \frac{\sigma_{ocm\ i}}{E}. \quad (4)$$

Следовательно, с учётом уравнения (1), определена величина пластических деформаций ε_i^{pl} , которую необходимо достичь в материале i -го слоя для получения заданного уровня остаточных напряжений $\sigma_{ост i}$.

В качестве внешнего воздействия, вызывающего пластические деформации ε_i^{pl} , целесообразно принять нагружение неравномерным в радиальном направлении температурным полем [1]. Тогда температурные деформации $\varepsilon_i^{th} = -\alpha\Delta T_i$. Здесь α – коэффициент линейного термического расширения материала; ΔT_i – изменение температуры i -го слоя наружной части цилиндра. После нагружения температурным полем наружной части цилиндра в нём возникнут деформации упругого и пластического характера (рисунок 2):

$$\varepsilon_i^{th} = \varepsilon_0^{el} - \varepsilon_i^{el} - \varepsilon_i^{pl} \quad (5)$$

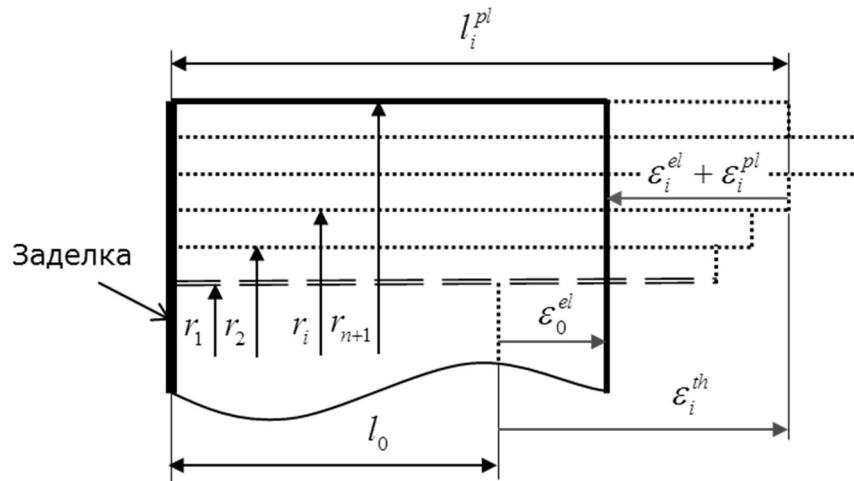


Рисунок 2 – Деформированное состояние цилиндрической детали при температурном воздействии

Отметим, что значения упругих деформаций ε_0^{el} и ε_i^{el} в уравнении (5) будут отличаться от значений в уравнении (3), так как эти уравнения описывают различные этапы нагружения цилиндра. Билинейная кривая деформирования связывает величины ε_i^{el} и ε_i^{pl} следующим образом:

$$\varepsilon_i^{el} = \varepsilon_i^{pl} \cdot \frac{1}{\frac{E}{E^*} - 1} + \frac{\sigma_T}{E}, \quad (6)$$

где E^* – тангенс угла наклона второго участка кривой деформирования; σ_T – предел текучести материала.

Тогда с учётом уравнения (5) имеем:

$$\Delta T_i = -\frac{1}{\alpha} \left(\varepsilon_0^{el} - \varepsilon_i^{pl} \left(\frac{1}{\frac{E}{E^*} - 1} + 1 \right) - \frac{\sigma_T}{E} \right). \quad (7)$$

Здесь величина ε_i^{pl} определяется в соответствии с уравнением (4). Величину ε_0^{el} можно найти по формуле:

$$\varepsilon_0^{el} = \frac{1}{A_0} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^{el} A_i. \quad (8)$$

Рассмотренный выше случай имеет несколько допущений:

- принято, что при температурном воздействии материал деформируется только в осевом направлении (ортотропное поведение материала);
- принято, что как в упругой, так и в пластической зоне деформирования коэффициент Пуассона равен нулю.

Реальное поведение материала не соответствует принятым допущениям, однако здесь решается задача моделирования требуемого уровня остаточных напряжений (на первых двух шагах). Как только эта задача решена, то для третьего шага задаётся реальный коэффициент Пуассона и рабочие нагрузки, после чего рассчитывается НДС. Кроме этого, программные системы конечно-элементного анализа, такие как ANSYS, не позволяют задать нулевой коэффициент Пуассона в области пластического деформирования. При использовании описанного подхода это приводит к возникновению объёмного НДС, вследствие чего конечный уровень остаточных напряжений отличается от ожидаемого. Для достижения заданного уровня приходится выполнять несколько итераций по подбору величины температурного воздействия.

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.

Библиографический список

1. Сазанов, В.П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN [Текст] / В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – № 2 (68). – С. 35-40.