

*А.В. Чирков, ассистент, В.П. Сазанов, ассистент,
О.Ю. Семёнова, аспирантка, А.В. Иванова, аспирантка,
(Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика
С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Россия)*

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ ПО ПЕРВОНАЧАЛЬНЫМ ДЕФОРМАЦИЯМ

Проведено моделирование остаточного напряжённо-деформированного состояния цилиндрической детали с круговым надрезом полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования методом первоначальных деформаций.

Для практики проектирования машиностроительных конструкций весьма важным вопросом определения их работоспособности является решение задачи о перераспределении остаточных напряжений в деталях после нанесения концентратора на поверхностно упрочнённый слой.

Решение указанной задачи для цилиндрической детали в настоящем исследовании предлагается выполнять в следующей последовательности:

– определение распределения остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя в гладкой детали;

– расчёт распределения остаточных напряжений в детали с концентратором в виде полукруглого надреза с использованием специализированных расчётных комплексов, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений.

Распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя гладкой детали находится экспериментально методом колец и полосок [1, 2]. Этот метод достаточно обоснован и отработан для применения в лабораторных условиях. Применение расчётных комплексов типа MSC.Nastran\MSC.Patran при определении остаточных напряжений в зоне концентратора после опережающего поверхностного пластического деформирования по первоначальным деформациям основано на сведениях задачи теории упругости к температурной задаче теории термоупругости [1, 3].

Приведём основные зависимости расчёта остаточных напряжений методом конечных элементов по изотропным первоначальным деформациям в упругой постановке. В общем случае материал, находящийся внутри элемента, может получать первоначальные деформации, обусловленные различными факторами. Если обозначим, пропорциональную первоначальным деформациям матрицу через $\{\varepsilon_0\}$, то напряжения $\{\sigma\}$ в соответствии с законом Гука

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}), \quad (1)$$

где $[D]$ – матрица упругости, содержащая характеристики материала,
 $\{\varepsilon\}$ – матрица полной деформации,

$$[D] = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

E – модуль продольной упругости материала,
 μ – коэффициент Пуассона.

В случае осесимметричной задачи, рассматриваемой в настоящем исследовании,

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta, \tau_{rz}], \quad (3)$$

$$[D] = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \gamma_{rz}], \quad (5)$$

$$\{\varepsilon_0\} = \varepsilon_{00} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} (1+\mu), \quad (6)$$

где ε_{00} – величина изотропной первоначальной деформации.

Связь между деформациями и перемещениями в этом случае имеет следующий вид:

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_r}{\partial r} \\ \frac{\partial U_z}{\partial z} \\ \frac{U_r}{r} \\ \frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Если в качестве первоначальных рассматривать температурные деформации, то

$$\{\varepsilon_0\} = \alpha T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} (1+\mu). \quad (8)$$

В связи с тем, что температурный коэффициент линейного расширения α есть величина постоянная, то при отсутствии действия внешних сил на свободное тело в области, удалённой от краевых зон, существует прямая зависимость между температурным полем и напряжениями. Причём в свободном теле температурные деформации, вызывающие напряжения, возникают только при неравномерном температурном поле.

Данные выводы являются важными с точки зрения использования современных расчётных комплексов, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений, для моделирования напряжённо-деформированного состояния деталей и образцов, которые имеют упрочнённый поверхностный слой с известным распределением остаточных напряжений по его толщине a . При решении таких задач зависимость $\sigma = \sigma(a)$ заменяется зависимостью $T = T(a)$ в виде математического выражения или в табличной форме. Положительные значения перепада температур соответствуют сжатию, отрицательные – растяжению.

Возможность использования материалов, изотропных по упругим свойствам, но с разными температурными коэффициентами линейного расширения по направлениям выбранной системы координат, позволяет моделировать любое заранее известное распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя.

Решение задачи для образцов и деталей различного поперечного сечения даже при одних и тех же виде и форме концентратора подвержено разному влиянию краевого эффекта,

жёсткости образца (детали). Моделирование поверхностного упрочнённого слоя обусловлено ещё и тем, что толщина упрочненного слоя a , на которой необходимо задать распределение остаточных напряжений, весьма мала и составляет 0,3-0,8 мм.

Для апробации методики определения перераспределения остаточных напряжений в цилиндрических деталях при нанесении надреза использовались реальные задачи, решённые по более ранним методикам аналитическим способом [4] и методом конечных элементов [5]. В данной работе в качестве примера приведено исследование остаточного напряжённо-деформированного состояния цилиндрического образца диаметром $D = 15$ мм из стали 45. Гладкий образец упрочнялся дробью, после упрочнения на него наносился концентратор в виде кругового надреза полукруглого профиля радиусом $R = 0,3$ мм. В результате нанесения надреза в образце происходит перераспределение остаточных напряжений. Методом колец и полосок [2], а также методом удаления части цилиндрической поверхности [6] была получена исходная эпюра осевых остаточных напряжений σ_z для гладких образцов, представленная на рис. 1.

В силу симметрии образца относительно оси, а также относительно середины надреза, в качестве расчётной модели представляется возможным использовать четверть осевого сечения образца и рассматривать задачу в плоской осесимметричной постановке.

Было проведено исследование задания видов нагружения, результаты которого представлены на рис. 2 и в табл. 1. Из данных табл. 1 видно, что применение степенной функции нецелесообразно, так как это увеличивает время расчёта, а точность повышается незначительно по сравнению с другими функциями задания эпюры. Ступенчатая функция даёт значения остаточных напряжений со скачками, что вполне объяснимо, так как значения напряжений пропорциональны деформациям. Однако, для моделирования плавной эпюры остаточных напряжений использование ступенчатой функции нежелательно в связи с тем, что для получения более ровного графика необходимо уменьшать шаг значений глубины залегания остаточных напряжений, что, в свою очередь, ведёт к уменьшению размера элемента, и, следовательно, к большим затратам вычислительной мощности, то есть времени расчёта. Использование кусочной функции с линейной аппроксимацией на участках даёт практически совпадающие с предыдущими расчётами результаты, как на поверхности дна надреза, так и по толщине поверхностного слоя a . Следовательно, по точности и времени расчёта эта функция является наиболее оптимальной для данной задачи, поэтому в дальнейшем использовалась именно она.

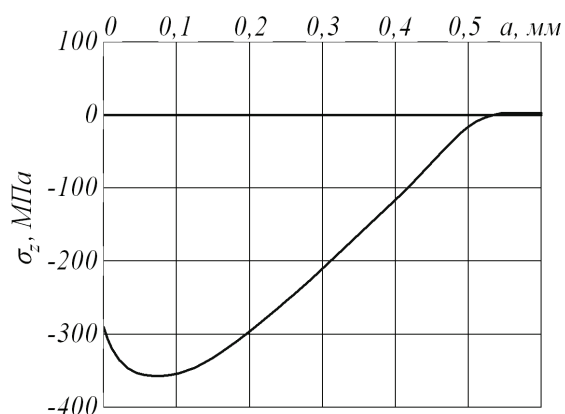


Рис. 1. Исходная эпюра осевых остаточных напряжений σ_z , полученная для гладких образцов

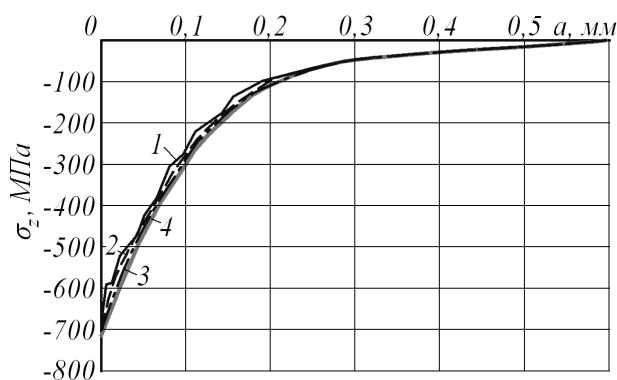


Рис. 2. Эпюры суммарных остаточных напряжений σ_z по толщине поверхностного слоя a в области дна надреза, полученные при различных функциях задания нагружения: 1 – ступенчатая, 2 – кусочная, с линейной аппроксимацией на участках, 3 – степенная, 4 – полученная по более ранним методикам

Таблица 2 – Сравнение различных функций задания распределения остаточных напряжений

| Параметр | Функции задания исходной эпюры | | | Полученные по более ранним методикам [8] |
|--|--------------------------------|-----------------------------------|-----------|--|
| | ступенчатая | кусочная с линейной интерполяцией | степенная | |
| напряжение на дне надреза σ_z , МПа | -680 | -700 | -709 | -712 |
| глубина смены знака напряжений, мм | 0,589 | 0,592 | 0,593 | 0,595 |

поэтому в дальнейшем использовалась именно она.

После уточнения эпюры было получено значение осевых остаточных напряжений на дне надреза $\sigma_z = -704$ МПа, что хорошо согласуется с полученным в работе [5] значением -712 МПа. Глубина смены знака остаточных напряжений составляет $a = 0,593$ мм, что опять согласуется с $a = 0,595$ мм работы [5].

Выводы

1. С использованием метода конечных элементов и обобщённых критериев распределения остаточных напряжений впервые решена задача по определению остаточных напряжений в цилиндрических образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования по первоначальным деформациям для образцов и деталей различного диаметра, что даёт возможность точного прогнозирования приращения предела выносливости.

2. На базе широкого теоретического исследования математической модели перераспределения остаточных напряжений, вызванных опережающим поверхностным пластическим деформированием в деталях и образцах различного диаметра по первоначальным деформациям, найдены оптимальные параметры расчёта суммарных остаточных напряжений, которые дают возможность существенно сократить время расчётов в системе MSC.Nastran\MSC.Patran.

Список литературы

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
2. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып.53. – С. 32-42.
3. Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулюк В.С. и др. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям // моногр. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.
4. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Куйбышев, КуАИ. – 1974. – Вып.1. – С. 88-96.
5. Павлов В.Ф., Куртичёв В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
6. Иванов С.И., Григорьева И.В. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып.48. – С. 179-183.