

*Павлов В.Ф., Сазанов В.П., Семёнова О.Ю.,  
Колычев С.А., Анисимов С.А.*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЯХ**

В работе [1] И.А. Биргер предложил использовать первоначальные деформации при исследовании остаточного напряжённо-деформированного состояния (НДС) в деталях различной формы. Первоначальные деформации возникают в детали, в которой происходят необратимые изменения линейных размеров в результате пластических деформаций, фазовых превращений, а также термического, химико-термического, радиационного и других воздействий.

По изменениям линейных размеров свободной от связей детали определяются первоначальные деформации [1–3]. После появления первоначальных деформаций в детали возникают препятствующие нарушению условий сплошности силы, которые представляются в виде самоуравновешенного поля напряжений. Эти напряжения называются остаточными и им соответствуют деформации, которые определяются на практике экспериментально различными методами. Считается, что остаточные напряжения не превышают предела текучести материала детали, поэтому вызванная ими деформация является упругой. Положительные первоначальные деформации в детали наводят сжимающие остаточные напряжения, отрицательные – растягивающие.

Первоначальные деформации аналогичны предложенным С.П. Тимошенко начальным напряжениям [4]. При этом С.П. Тимо-

шенко доказал, что задача о начальных напряжениях аналогична задаче термоупругости в деформируемых деталях. В связи с этим начальные напряжения можно заменять соответствующими им температурными напряжениями. Современные методы определения в поверхностно упрочнённых деталях остаточных напряжений, которые используются при прогнозировании предела выносливости, потребовали разработки новых подходов к моделированию остаточного НДС. Существенный интерес представляет применение расчётных комплексов, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений (NASTRAN, ANSYS). Для проверки соответствия задачи о первоначальных деформациях задаче о термоупругости при использовании современных расчётных комплексов были проведены исследования, которые дали положительные результаты.

В настоящем исследовании приведено решение задачи по расчёту остаточных напряжений в поверхностном слое упрочнённой цилиндрической детали с первоначальной изотропной объёмной деформацией. Аналитическое решение такой задачи приведено в монографии Биргера И.А. [1], в которой использованы следующие уравнения теории упругости, записанные в цилиндрической системе координат:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)] + \varepsilon_{0r}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] + \varepsilon_{0\theta}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)] + \varepsilon_{0z}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$  – радиальные, окружные и осевые остаточные деформации;  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  – радиальные, окружные и осевые остаточные напряжения;  $\varepsilon_{0r}, \varepsilon_{0\theta}, \varepsilon_{0z}$  – радиальные, окружные и осевые первоначальные деформации;  $E$  – модуль продольной упругости материала детали;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Это решение выполнено для той части цилиндрической детали, в которой исключается влияние краевых зон. Эскиз цилиндрической детали приведён на рис. 1.

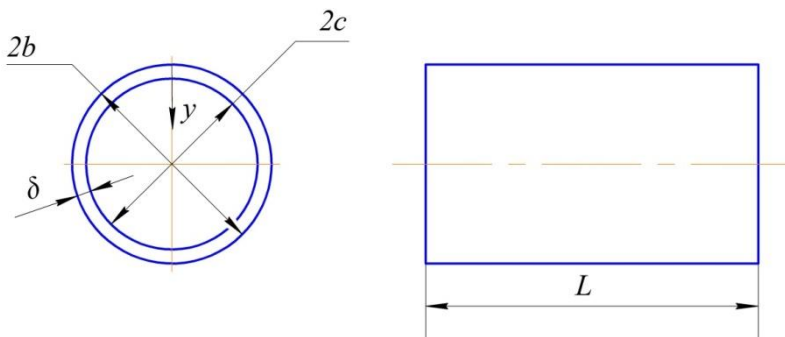


Рис. 1. Эскиз цилиндрической детали с первоначальными деформациями

В поверхностном кольцевом слое цилиндрической детали толщиной  $\delta = b - c$  создана остаточная первоначальная деформация:

$$\varepsilon_{0r} = \varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_{0z} = \varepsilon_0.$$

При расчёте были использованы следующие числовые значения параметров:

$$b = 5 \text{ мм}; c = 4,5 \text{ мм}; E = 200000 \text{ МПа}; \mu = 0,3; \varepsilon_0 = 0,001.$$

Остаточные напряжения в цилиндрической детали во внутренней области цилиндра  $0 \leq r \leq c$  определялись по формулам

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{E\varepsilon_0}{2(1-\mu)} \left(1 - \frac{c^2}{b^2}\right), \quad (4)$$

$$\sigma_z = \frac{E\varepsilon_0}{(1-\mu)} \left(1 - \frac{c^2}{b^2}\right). \quad (5)$$

По результатам расчёта по формулам (4) и (5) были получены следующие значения остаточных напряжений:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = 27,1 \text{ МПа}, \sigma_z = 54,3 \text{ МПа}.$$

В поверхностном слое цилиндрической детали ( $c \leq r \leq b$ ) остаточные напряжения определялись по следующим формулам:

$$\sigma_r = \frac{E\varepsilon_0}{2(1-\mu)} \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{b^2} \right), \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{E\varepsilon_0}{2(1-\mu)} \left( \frac{1}{r^2} + \frac{1}{b^2} \right), \quad (7)$$

$$\sigma_z = -\frac{E\varepsilon_0}{(1-\mu)} \frac{c^2}{b^2}. \quad (8)$$

По результатам расчёта по формулам (6) – (8) были получены следующие величины остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндрической детали:  $\sigma_r = 27,1 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_\theta = -258,6 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_z = -231,4 \text{ МПа}$ .

При решении задачи численным методом использовался расчётный комплекс PATRAN/NASTRAN. Конечно-элементная модель в осесимметричной постановке представляет собой осевое сечение четверти цилиндрической детали с наложением соответствующих граничных условий. Принятая длина  $L = 30 \text{ мм}$  расчётной области цилиндрической детали исключала влияние краевых зон для поперечного сечения, в котором величины компонент остаточных напряжений сравниваются с их значениями при аналитическом решении. При моделировании был использован треугольный шестиузловой осесимметричный конечный элемент типа 2D-Solid. Величина первоначальной деформации  $\varepsilon_0 = 0,001$  в поверхностном слое моделировалась как температурное расширение детали, при этом коэффициент линейного расширения составлял  $\alpha = 0,00001 \frac{1}{\text{град}}$ , перепад температуры относительно внутренней области –  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ .

Результаты расчёта распределения остаточных напряжений по поперечному сечению цилиндрической детали аналитическим и численным методами представлены на рис. 2 – 4 в виде графиков. На графиках отсчёт оси  $y$  производился от поверхности к оси цилиндра (рис. 1).

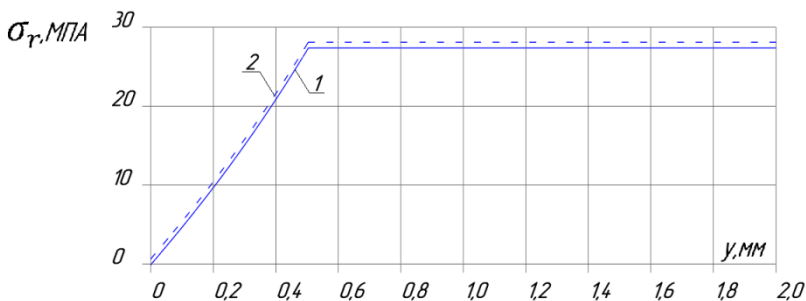


Рис. 2. Распределение радиальных  $\sigma_r$  остаточных напряжений по сечению цилиндрической детали: 1 – аналитическое решение, 2 – МКЭ

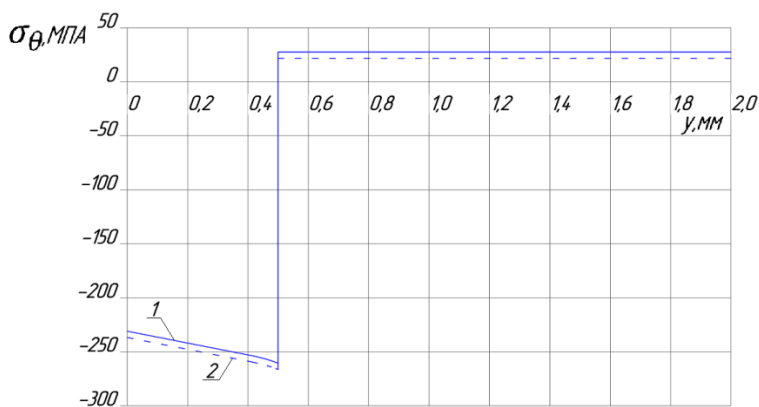


Рис. 3. Распределение окружных  $\sigma_\theta$  остаточных напряжений по сечению цилиндрической детали: 1 – аналитическое решение, 2 – МКЭ

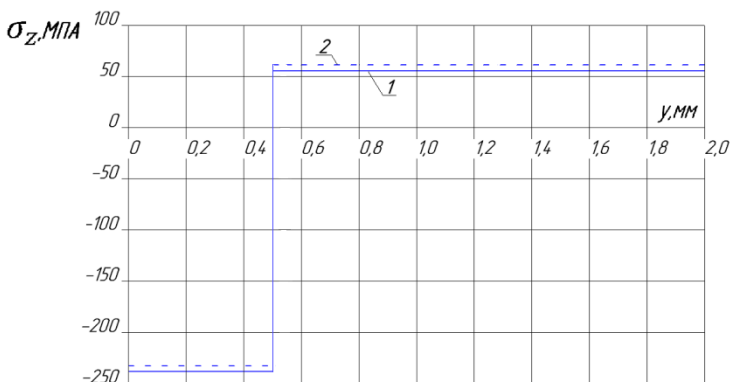


Рис. 4. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по сечению цилиндрической детали: 1 – аналитическое решение, 2 – МКЭ

Из представленных на рис. 2 – 4 распределений остаточных напряжений можно видеть, что аналитический и численный методы расчёта дают практически одинаковые результаты, в связи с чем метод термоупругости с использованием первоначальных деформаций [5] может быть применён для моделирования остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях.

### Вывод

В исследовании установлено, что применение метода термоупругости с использованием конечно-элементного моделирования и расчётных комплексов типа PATRAN/ NASTRAN позволяет определять распределение остаточных напряжений в деталях сложной геометрической формы, упрочнённых различными методами поверхностного пластического деформирования [5].

### Библиографический список

1. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – Москва: Машгиз, 1963. – 232 с.

2. Биргер, И.А. Определение остаточных напряжений в образцах сложной формы / И.А. Биргер // Заводская лаборатория. – 1970. – №1. – С. 81–83.

3. Биргер, И.А. Проблемы остаточных напряжений / И.А. Биргер // Остаточные напряжения и методы их регулирования: труды Всесоюзного симпозиума. – Москва: ИПМ АН СССР, 1982. – С. 5-17.

4. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – Москва: Наука, 1979. – 341 с.

5. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

*УДК 621.787:539.319*

*Сазанов В. П., Шадрин В. К., Декань А. А.,  
Туманов Д. В., Попов А. Д.*

## **О РАЦИОНАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЕ УПРОЧНЕНИЯ ПЛОСКОГО СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА**

Во все времена повышение ресурса и надёжности работы деталей машин являются важнейшими задачами при их проектировании, производстве и эксплуатации. В частности, значительное повышение сопротивления многоцикловой усталости позволяет получить различные виды поверхностного упрочнения, особенно у деталей с концентраторами напряжений. Одним из таких видов является химико-термическая обработка, которая позволяет получить большую твёрдость в поверхностном слое с сохранением вязкой сердцевины, что обеспечивает высокую износостойкость и одновременно