

Вакулюк В. С., Сазанов В. П., Сургутанов Н. А., Кочерова Е. Е., Ненашев Д. А.

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСТАТОЧНОЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

При определении остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях обычно рассматривается плоское напряжённое состояние, при котором не учитывается радиальная составляющая. Действительно, на поверхности радиальные напряжения равны нулю по определению, а по толщине упрочнённого слоя они малы по сравнению с окружными и осевыми остаточными напряжениями. В случае, когда рассматривается объёмное напряжённое состояние, а также в целях упрощения решения первоначальная деформация считается изотропной.

Использование современных расчётных комплексов позволяет решать указанные задачи практически в любой постановке. Для оценки влияния величины и направления (знака) радиальных первоначальных деформаций на остаточное напряжённо-деформированное состояние была рассмотрена задача по определению компонентов остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом цилиндре диаметром 10 мм и толщиной упрочнённого слоя 0,5 мм. Аналитическое решение такой задачи приведено в работе Биргера И.А. [1].

В кольцевом поверхностном слое цилиндра толщиной 0,5 мм возникли, в силу различных причин, остаточные радиальные  $\varepsilon_{0r}$ , окружные  $\varepsilon_{0\theta}$  и осевые  $\varepsilon_{0z}$  первоначальные деформации. Расчёты были выполнены для следующих вариантов сочетания компонентов первоначальных деформаций:

$$\varepsilon_{0r} = \varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_{0z} = \varepsilon_0, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{0r} = -\varepsilon_0, \quad \varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_{0z} = \varepsilon_0, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{0r} = -2\varepsilon_0, \quad \varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_{0z} = \varepsilon_0. \quad (3)$$

Варианты 1 и 3 рассмотрены в работе Биргера И.А. [1], вариант 2 изучался для сравнения. Для расчёта были приняты следующие численные значения параметров: модуль продольной упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; первоначальная деформация  $\varepsilon_0 = 0,001$ .

Для решения задачи МКЭ был использован расчётный комплекс PATRAN /NASTRAN. Конечно-элементная модель в осесимметричной постановке представляла со-

бой четверть сечения цилиндра с наложением соответствующих граничных условий. Принятая длина расчётной области цилиндра исключала влияние краевых зон для сечения, в котором значения компонентов остаточных напряжений сравнивались с их значениями при аналитическом решении. При моделировании был использован треугольный шестиузловой осесимметричный конечный элемент типа 2D-Solid.

Результаты расчёта распределения остаточных напряжений по толщине поперечного сечения цилиндра в виде графиков приведены на рис. 1, где отсчёт оси  $y$  выполнялся от поверхности к оси цилиндра.

Из приведённых на рис. 1 распределений остаточных напряжений следует, что при смене знака и увеличении по абсолютной величине первоначальной радиальной деформации радиальные остаточные напряжения  $\sigma_r$  повышаются в поверхностном слое и внутренней полости цилиндра. Сжимающие окружные  $\sigma_\theta$  и осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения в поверхностном слое также возрастают. При этом первоначальные радиальные деформации наибольшее влияние оказывают на окружные сжимающие остаточные напряжения, действующие на поверхности цилиндра (рис. 1, б).

Следует обратить внимание на то, что при различных вариантах сочетания компонентов первоначальных деформаций растягивающие (реактивные) осевые  $\sigma_z$  и окружные  $\sigma_\theta$  (рис. 1, а и рис. 1, б) остаточные напряжения постоянны в поперечном сечении цилиндра, на что указывалось в работе [2]. Эта закономерность позволяет считать реактивные остаточные напряжения постоянными при их экспериментальном определении, исходя из уравнений равновесия.

Установлено [3], что приращение предела выносливости поверхностно упрочнённой детали, в основном, определяется сжимающими остаточными напряжениями, возникающими в тонком поверхностном слое. При прогнозировании приращения предела выносливости детали  $\Delta P_R(\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R)$  за счёт поверхностного упрочнения наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ocm}$  [4–6]. В этом случае величина  $\Delta P_R$  определяется по следующей формуле:

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_P \cdot |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (4)$$

где  $\bar{\psi}_P(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ocm}$ ,

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (5)$$

$\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали по толщине поверхностного слоя;  $\xi = y/t_{кр}$  – расстояние от поверхности детали до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ ;  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочнённой детали при работе на пределе выносливости.

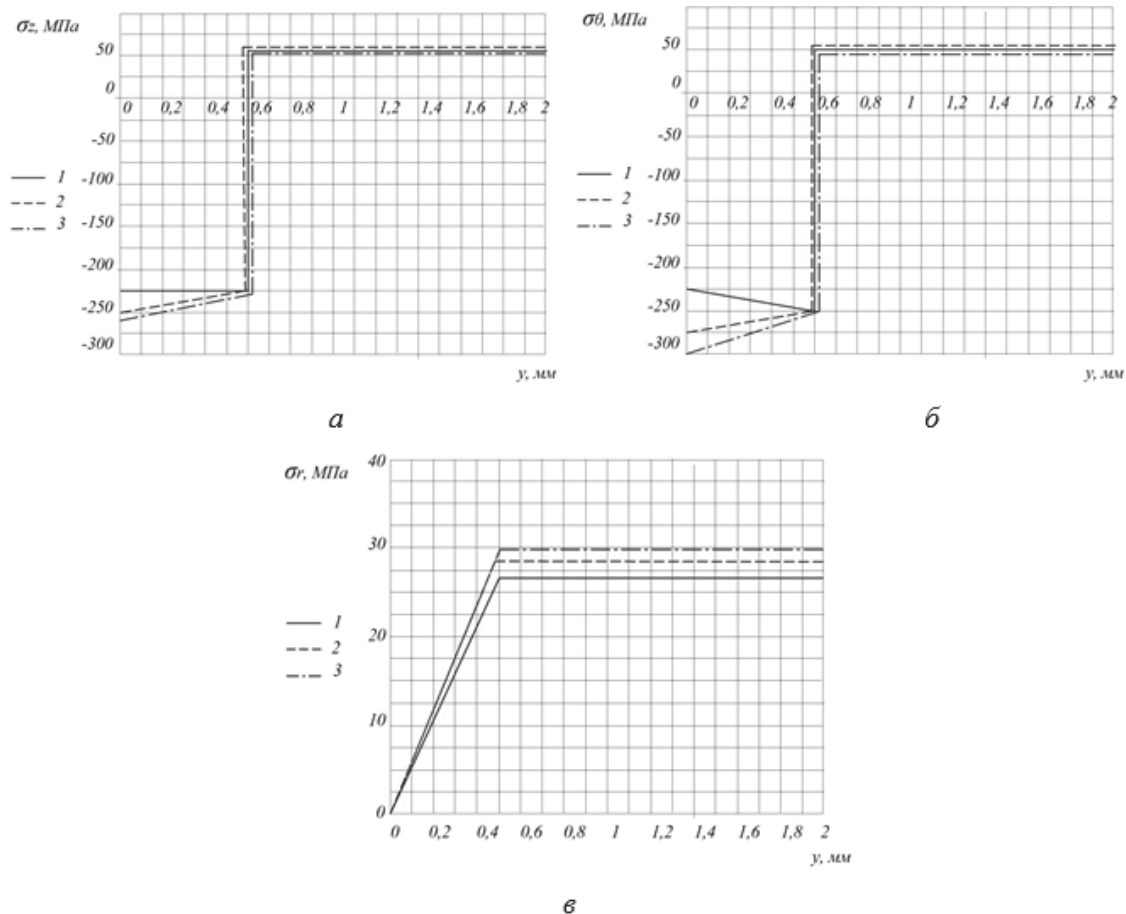


Рисунок 1 – Распределение осевых  $\sigma_z$  (а), окружных  $\sigma_\theta$  (б) и радиальных  $\sigma_r$  (в) остаточных напряжений в поперечном сечении цилиндра (номера графиков соответствуют вариантам распределения первоначальных деформаций)

Необходимые для расчёта приращения предела выносливости по формуле (4) поверхностно упрочнённой детали значения коэффициента влияния  $\bar{\psi}_p$  и критической глубины нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$  можно вычислить по методикам, изложенным в работах [5, 7]. При определении критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  использовалось аналитическое решение задачи теории упругости о перераспределении остаточных напряжений гладкой детали при нанесении на неё надреза полуэллиптического профиля [8]. Из формулы (5) следует, что критерий  $\bar{\sigma}_{ост}$  зависит только от осевых  $\sigma_z(\xi)$  остаточных напряжений поверхностного слоя упрочнённой детали. На основании анализа распределения осевых остаточных напряжений, приведённых на рис. 1, а,

видно, что переход от изотропного распределения первоначальных деформаций (вариант 1) к анизотропному (варианты 2 и 3) незначительно изменяет значения осевых сжимающих остаточных напряжений, особенно при удалении от поверхности к оси детали. В соответствии с формулой (5) критерий  $\bar{\sigma}_{ост}$ , учитывающий характер распределения осевых остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя упрочнённой детали, будет изменяться ещё меньше. В связи с этим из анализа данных рисунка 1 и формулы (4) можно сделать вывод, что расчёт остаточных напряжений по варианту изотропных первоначальных деформаций (вариант 1) является расчётом в запас прочности упрочнённой детали.

#### Библиографический список

- 1 Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст]/ И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
- 2 Павлов, В.Ф. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям: монография [Текст] / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв. – Самара : Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.
- 3 Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.
- 4 Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
- 5 Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям: монография [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
- 6 Радченко, В.П. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести [Текст] / В.П. Радченко, О.С. Афанасьева // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2009. – №2(19). – С. 264-268.
- 7 Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений [Текст] / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ, 2011. – Т. 15. – №4(44). – С. 81-85.
- 8 Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом [Текст] / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов// Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Межвузовский сборник. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып.3. – С. 88-95.