

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ РАДИАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННОМ ЦИЛИНДРЕ

© 2014 В.П. Сазанов, В.С. Вакулюк, С.А. Михалкина, Н.А. Сургутанов, Е.Е. Кочерова

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 28.04.2014

Изучено влияние радиальной первоначальной деформации на распределение остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом цилиндре. Используя конечно-элементное моделирование и расчётный комплекс PATRAN/NASTRAN, проведены расчёты для различных вариантов сочетания компонентов первоначальных деформаций. Показано, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений зависит только от осевых остаточных напряжений поверхностного слоя упрочнённой детали и, что переход от изотропного распределения первоначальных деформаций к анизотропному незначительно изменяет значения осевых остаточных напряжений, особенно при удалении от поверхности к оси цилиндра. Определено, что расчёт остаточных напряжений по изотропным первоначальным деформациям является расчётом в запас прочности.

Ключевые слова: остаточные напряжения, изотропные первоначальные деформации, конечно-элементное моделирование, упрочнение, предел выносливости, среднеинтегральные остаточные напряжения.

При определении остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях с целью упрощения обычно принято рассматривать плоское напряжённое состояние, при котором не учитывается их радиальная составляющая. Действительно, на поверхности радиальные напряжения равны нулю по определению, а по глубине, учитывая, что толщина упрочнённого слоя невелика, их значение мало 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 типа PATRAN/NASTRAN позволяет решать указанные задачи практически в любой постановке. Для оценки влияния величины и направления (знака) первоначальных радиальных деформаций на остаточное напряжённо-деформированное состояние рассмотрена задача по определению компонент остаточных напряжений для поверхностно упрочнённого цилиндра. Аналитическое решение таких задач приведено в работе Биргера И.А. [1], которое основано на ис-

пользовании уравнений теории упругости, записанных 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 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ – радиальные, окружные и осевые остаточные напряжения;

$\varepsilon_{0r}, \varepsilon_{0\theta}, \varepsilon_{0z}$ – радиальные, окружные и осевые первоначальные деформации; E – модуль продольной упругости материала; μ – коэффициент Пуассона.

Для расчёта методом конечно-элементного моделирования рассмотрен сплошной цилиндр, эскиз которого приведен на рис. 1.

В кольцевом поверхностном слое цилиндра толщиной $\delta = b - c$ возникли, в силу различных причин, остаточные первоначальные деформации $\varepsilon_{0r}, \varepsilon_{0\theta}, \varepsilon_{0z}$. Расчёты выполнены для следующих вариантов сочетания компонент первоначальных деформаций:

- 1) $\varepsilon_{0r} = \varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_{0z} = \varepsilon_0$ (вариант 1);
- 2) $\varepsilon_{0r} = -\varepsilon_0; \varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_{0z} = \varepsilon_0$ (вариант 2);
- 3) $\varepsilon_{0r} = -2\varepsilon_0; \varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_{0z} = \varepsilon_0$ (вариант 3).

Варианты 1 и 3 рассмотрены в работе Биргера И.А. [1], вариант 2 изучается для сравнения. Для расчёта были приняты следующие численные значения параметров: $b = 5\text{мм}; c = 4,5\text{мм}; E = 200000\text{ МПа}; \mu = 0,3; \varepsilon_0 = 0,001$.

Для решения задачи МКЭ был использован расчётный комплекс PATRAN/NASTRAN. Ко-

Сазанов Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов.

E-mail: sopromat@ssau.ru

Вакулюк Владимир Степанович кандидат технических наук, доцент, кафедра сопротивления материалов.

Михалкина Светлана Алексеевна, старший преподаватель, кафедра высшей математики.

Сургутанов Николай Андреевич, аспирант, кафедра сопротивления материалов.

Кочерова Евгения Евгеньевна, соискатель, кафедра сопротивления материалов.

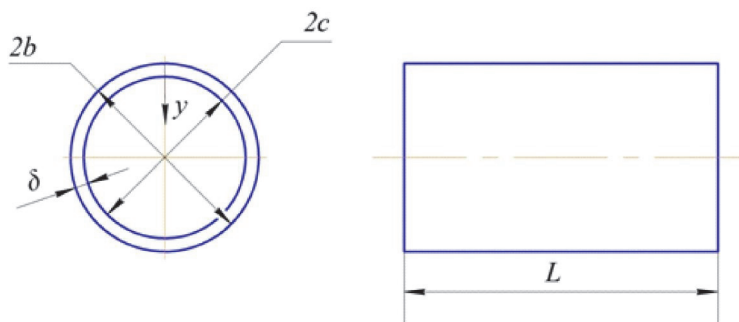


Рис. 1. Эскиз цилиндра с первоначальными деформациями поверхностного слоя

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

Первоначальная деформация $\varepsilon_0 = 0,001$ в поверхностном слое моделировалась как температурное расширение тела с использованием ортотропного материала. При этом коэффициент линейного расширения $\alpha = 0,00001 \frac{1}{град}$ принимался в окружном и осевом направлениях системы координат постоянным для всех расчётных случаев, а в радиальном направлении принималась ве-

личина α , которая обеспечивает заданные в соответствии с изучаемым вариантом значения ε_{0r} . Перепад температуры поверхностного слоя цилиндра относительно внутренней области принимался $\Delta T = 100^\circ C$.

Результаты расчёта распределения остаточных напряжений по толщине поперечного сечения цилиндра в виде графиков приведены на рис. 2 – 4. На графиках отсчёт оси y выполняется от поверхности к оси цилиндра (рис. 1).

Из приведённых на рис. 2 – 4 распределений остаточных напряжений следует, что при смене знака и увеличении по абсолютной величине первоначальной радиальной деформации радиальные остаточные напряжения σ_r повышаются в поверхностном слое и внутренней полости цилиндра. Сжимающие окружные σ_θ и осевые σ_z остаточные напряжения в поверхностном слое также возрастают. При этом первоначальные радиальные деформации наибольшее влияние

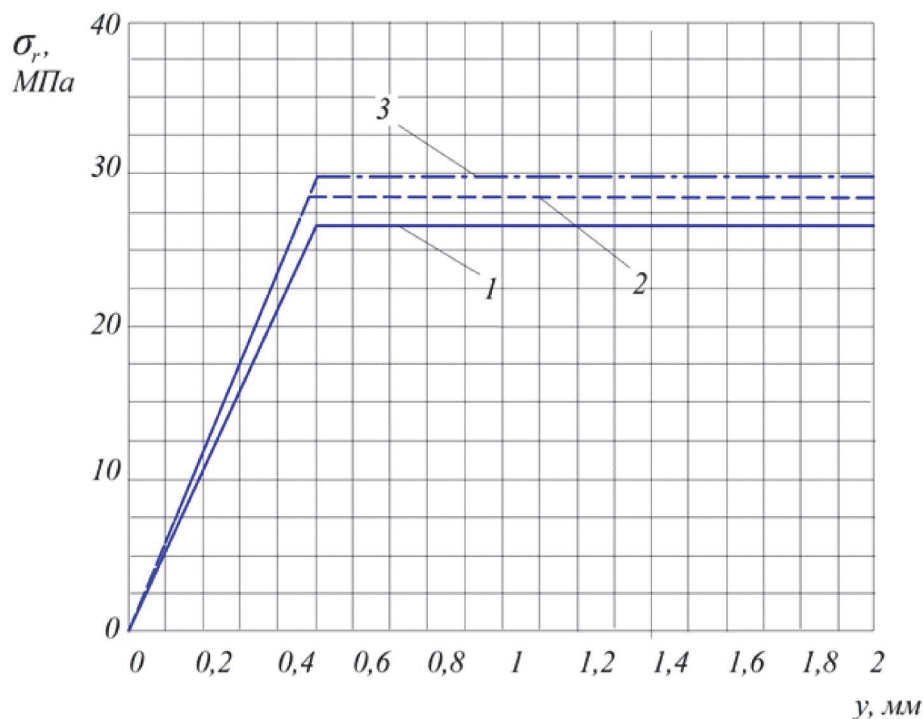


Рис. 2. Распределение радиальных σ_r остаточных напряжений в поперечном сечении цилиндра (номера графиков соответствуют вариантам распределения первоначальных деформаций)

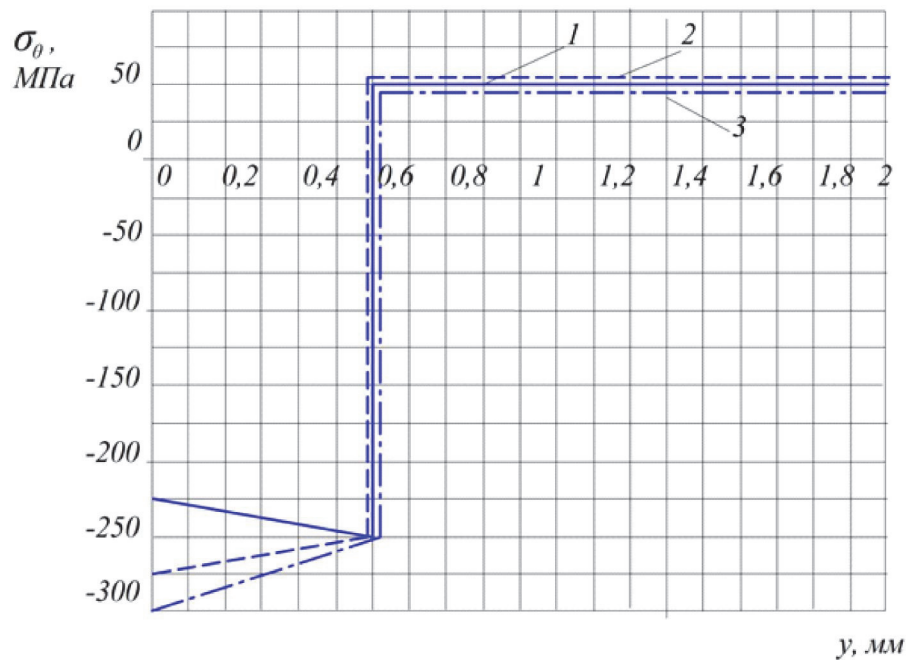


Рис. 3. Распределение окружных σ_{θ} остаточных напряжений в поперечном сечении цилиндра (номера графиков соответствуют вариантам распределения первоначальных деформаций)

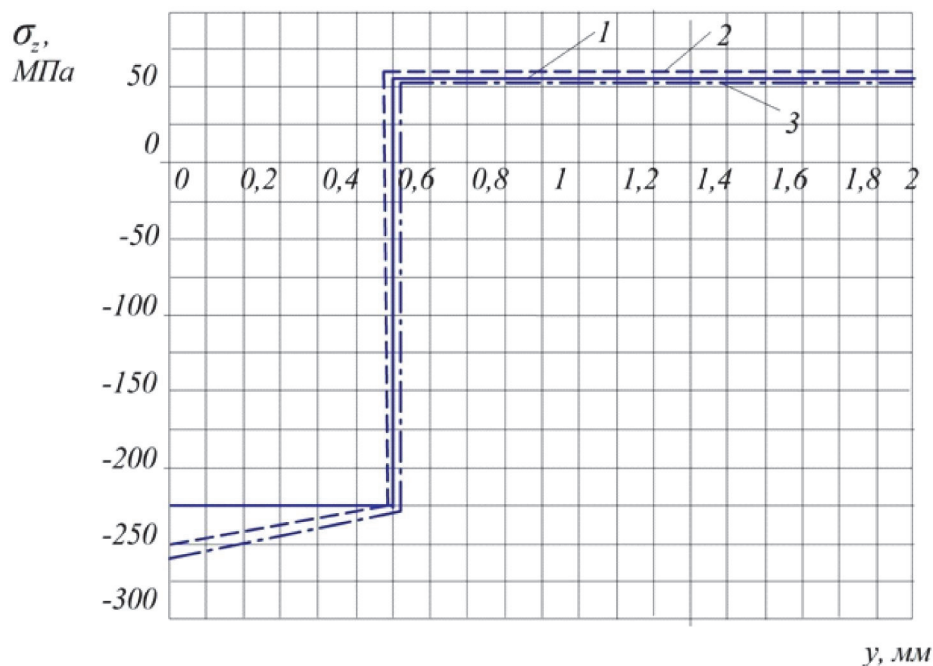


Рис. 4. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в поперечном сечении цилиндра (номера графиков соответствуют вариантам распределения первоначальных деформаций)

оказывают на окружные сжимающие остаточные напряжения, действующие на поверхности цилиндра (рис. 3).

Следует обратить внимание на то, что при различных вариантах сочетания компонент первоначальных деформаций растягивающие (реактивные) окружные σ_{θ} и осевые σ_z (рис. 3 и 4) 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, что приращение предела выносливости поверхностно упрочнённой детали, в основном, определяется сжимающими остаточными напряжениями, возникающими в тонком поверхностном слое. При прогнозировании при-

ращения предела выносливости детали $\Delta P_R (\Delta \sigma_R, \Delta \tau_R)$ за счёт поверхностного упрочнения наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [4–6]. В этом случае величина ΔP_R определяется по следующей формуле:

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

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

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

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

Необходимые для расчёта приращения предела выносливости по формуле (4) поверхностно упрочнённой детали значения коэффициента влияния $\bar{\psi}_P$ и критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кп}$ 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. 4, видно, что переход от изотропного распределения первоначальных деформаций (вариант 1) к анизотропному (вариант 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 рис. 4 и формулы (4) можно сделать вывод, что расчёт остаточных напряжений по варианту изотропных первоначальных деформаций (вариант 1) является расчётом в запас прочности упрочнённой детали.

ВЫВОДЫ

1. С увеличением по абсолютной величине радиальной первоначальной деформации увеличиваются по абсолютной величине все компоненты остаточного напряжённого состояния: радиальные, окружные и осевые остаточные напряжения.

2. Растягивающие (реактивные) окружные и осевые остаточные напряжения постоянны в поперечном сечении детали.

3. Расчёт остаточных напряжений по изотропным первоначальным деформациям является расчётом в запас прочности упрочнённой детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

RADIAL INITIAL DEFORMATIONS INFLUENCE ON RESIDUAL STRESSES DISTRIBUTION IN A SURFACE HARDENED CYLINDER

© 2014 V.P. Sazanov, V.S. Vakulyuk, S.A. Mikhalkina, N.A. Sourgutunov, E.E. Kocherova

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

Radial initial deformation influence on residual stresses distribution in a surface hardened cylinder has been examined. Using Finite Elements modeling and PATRAN/NASTRAN program complex calculations for various combinations of initial deformations components have been made. It's been shown that the average integral residual stresses criterion depends only on axial residual stresses of hardened part surface layer. It's been established that the axial residual stresses changes are small under transition from the initial deformations isotropic distribution to the anisotropic one. These changes decrease when moving from the surface to the cylinder axis. It's also been established that residual stresses calculation using isotropic initial deformations is the calculation in the reliability margin.

Keywords: residual stresses, isotropic initial deformations, finite Elements modeling, hardening, endurance limit, average integral residual stresses.

Vyacheslav Sazanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Strength of Materials Department.

E-mail: sopromat@ssau.ru

Vladimir Vakulyuk, Candidate of Technical Sciences, Associate professor at the Strength of Materials Department.

Svetlana Mikhalkina, Senior Lecturer at the Higher Mathematics Department.

Nicolay Sourgutunov, Graduate Student at the Strength of Materials Department.

Eugenia Kocherova, Applicant at the Strength of Materials Department.