

УДК 621.787:539.319

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В УПРОЧНЕННОМ СЛОЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСЧЕТНОГО КОМПЛЕКСА PATRAN/NASTRAN

В. П. САЗАНОВ¹, В. А. КИРПИЧЕВ², В. С. ВАКУЛЮК³, В. Ф. ПАВЛОВ⁴

¹sazanow@mail.ru, ²dean_fla@ssau.ru, ^{3,4}sopromat@ssau.ru

ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева
(национальный исследовательский университет)» (СГАУ)

Поступила в редакцию 5 июня 2015 г.

Аннотация. Приведена методика определения первоначальных деформаций в упрочненных цилиндрических деталях. Используя конечно-элементное моделирование и расчетный комплекс PATRAN/NASTRAN, проведен расчет по определению первоначальных деформаций упрочненной цилиндрической детали с наружным диаметром 15 мм и внутренним 10 мм из стали 12Х18Н10Т. Показано на примере расчета, что определение первоначальных деформаций выполняется за небольшое количество итераций. Выявлено, что толщина слоя с первоначальными деформациями в гладкой части цилиндрической детали несколько превышает глубину, на которой остаточные напряжения меняют свой знак с отрицательного на положительный.

Ключевые слова: остаточные напряжения; первоначальные деформации; конечно-элементное моделирование; упрочнение; предел выносливости.

ВВЕДЕНИЕ

В основе образования остаточных деформаций и соответствующих им остаточных напряжений после различных воздействий на материал детали лежат необратимые изменения линейных размеров (пластические деформации, структурные и фазовые превращения в материале, облучение и др.), называемые первоначальными деформациями. При этом деталь упруго деформируется и в ней образуется самоуравновешенное поле остаточных напряжений, в котором их максимальная величина не превышает предела текучести. В строгом понимании первоначальные деформации – это деформации, возникающие в детали, все элементарные объемы которой, не участвующие в процессе пластического или другого деформирования, абсолютно жестко закреплены. Из данного определения следует, что первоначальные деформации являются:

- абсолютной мерой результатов воздействия на деформируемые элементы объема твердого тела;

- начальными условиями при формировании самоуравновешенного поля остаточных напряжений, так как первоначальные деформации не удовлетворяют уравнениям совместности деформаций (Сен-Венана) для твердого тела.

На практике в явном виде первоначальные деформации не существуют, так как процесс разгрузки протекает одновременно с их формированием. Возникает сложная и нерешенная до сих пор в полном объеме задача теории упругости и пластичности с наложением силовых, температурных, структурно-фазовых и других факторов.

Известно, что задача по определению деформаций и напряжений после обработки поверхности, подобно температурной аналогии С. П. Тимошенко, приводится к первой основной задаче теории упругости с объемными силами и нормальными усилиями, распределенными по поверхности тела [1]. Приведенные в ряде работ [2–6] решения задач по определению остаточных напряжений по известным значениям первоначальных деформаций методами теории упругости не дают решений обратных задач

по их определению. Вместе с тем в практических методах определения первоначальных деформаций существует большая потребность, особенно при определении остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений, а также в случае прогнозирования предела выносливости после их упрочнения.

Ограниченность применения методов теории упругости заставляет искать на практике более простые, но достаточно точные приближенные и, самое главное, универсальные методы определения первоначальных деформаций в упрочненных деталях. Одним из таких является расчетно-экспериментальный метод с использованием результатов измерения остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя (на образце, вырезанном из детали, или на образце-свидетеле) и конечно-элементного моделирования с применением современных расчетных комплексов. При этом считается, что образец-свидетель, имеющий определенные геометрические размеры, проходит весь технологический цикл изготовления со штатной деталью. В используемом методе приняты следующие допущения, которые позволяют значительно упростить решение поставленной задачи:

- все точки поверхности деталей и образцов-свидетелей при одинаковых технологических процессах упрочнения получают одинаковые первоначальные деформации;
- первоначальные деформации сдвига малы и ими можно пренебречь.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

В работе представлена разработанная методика определения первоначальных деформаций путем моделирования остаточного напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов с использованием расчетного комплекса PATRAN/NASTRAN. Порядок выполнения расчетов излагается на примере поверхностно упрочненного полого цилиндрического образца из стали 12X18H10T с наружным диаметром $D = 15$ мм и внутренним $d = 10$ мм. Экспериментальная зависимость распределения осевых σ_z остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя a после гидробесструйной обработки (ГДО) приведена на рис. 1. Данная эпюра получена методом колец и полосок путем послойного удаления упрочненного металла с поверхности образцов, вырезанных из цилиндрической детали [7, 8]. Толщина упрочненного слоя составляла около 0,33 мм.

Конечно-элементная модель представляет собой четвертую часть цилиндрической детали с наложением соответствующих граничных условий закрепления и симметрии. При моделировании использовался треугольный шестиузловой конечный элемент типа 2D-Solid [9].

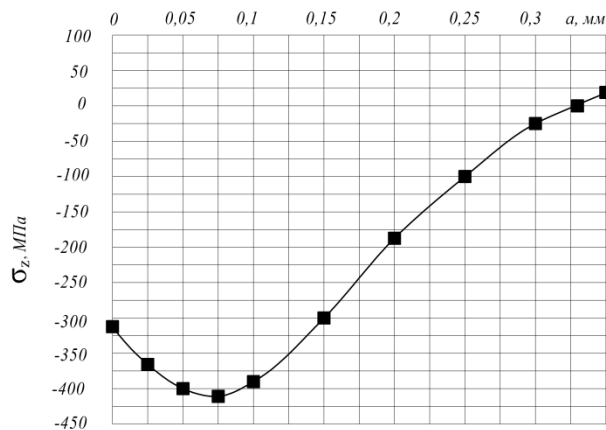


Рис. 1. Экспериментальная зависимость распределения осевых σ_z остаточных напряжений в упрочненном слое после ГДО

В теории упругости связь между деформациями и напряжениями в цилиндрической системе координат устанавливается следующими уравнениями:

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

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

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

где ε_r , ε_θ , ε_z – радиальные, окружные и осевые остаточные деформации; ε_{or} , $\varepsilon_{o\theta}$, ε_{oz} – радиальные, окружные и осевые первоначальные деформации; σ_r , σ_θ , σ_z – радиальные, окружные и осевые остаточные напряжения; E – модуль продольной упругости материала; μ – коэффициент Пуассона.

Будем рассматривать вариант, когда первоначальные деформации ε_{or} , $\varepsilon_{o\theta}$, ε_{oz} равны между собой, то есть являются изотропными (ГДО). После образования самоуравновешенного поля остаточных напряжений в упрочненном слое осевая остаточная деформация будет незначительно отличаться от первоначальной, так как его осевая жесткость очень мала по сравнению с осевой жесткостью остальной (растянутой) части цилиндра.

Для первой итерации по определению первоначальных деформаций численным методом воспользуемся следующим приемом. Будем считать, что реактивная (растянутая) часть цилиндрической детали является абсолютно жесткой. Тогда из уравнения (1)–(3) при принятом условии $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon_z = 0$ и, принимая $\sigma_r = 0$ ввиду его малой величины по сравнению с двумя другими компонентами, получим

$$\varepsilon_{\theta\theta} = -\frac{1}{E}(\sigma_\theta - \mu\sigma_z), \quad (4)$$

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{1}{E}(\sigma_z - \mu\sigma_\theta). \quad (5)$$

Так как первоначальные деформации принимаются изотропными, то при равенстве $\varepsilon_{\theta\theta} = \varepsilon_{zz}$ из выражений (4) и (5) получим:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta - \mu\sigma_z &= \sigma_z - \mu\sigma_\theta, \\ \sigma_\theta(1 + \mu) &= \sigma_z(1 + \mu). \end{aligned} \quad (6)$$

Из (6) получаем $\sigma_\theta = \sigma_z$. Если принять по аналогии с задачей термоупругости значения первоначальных деформаций

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \varepsilon_{zz} = \alpha\Delta T,$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения, ΔT – перепад температурного поля, то из выражения (5) получим

$$\begin{aligned} \alpha\Delta T &= -\frac{1 - \mu}{E\sigma_z}, \\ \Delta T &= -\frac{1 - \mu}{\alpha E}\sigma_z. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) следует, что в упрочненном слое материала цилиндрической детали

$$\Delta T(a) = -n\sigma_z(a), \quad (8)$$

где $n = \frac{1 - \mu}{\alpha E}$ – коэффициент пропорциональности.

Из формулы (8) следует, что для упрочненного поверхностного слоя в гладкой части цилиндрической детали, значительно удаленного от краевых зон, зависимость перепада температурного поля при моделировании будет подобной (но с обратным знаком) зависимости осевых остаточных напряжений по толщине упрочненного слоя. При моделировании первоначальных деформаций в упрочненном поверхностном слое используется неравномерное температур-

ное поле в виде таблицы, причем количество точек аппроксимации кривой зависит от ее формы и обычно бывает от десяти и более. Эпюра осевых остаточных напряжений, представленная на рис. 1, разбивается на точки и в поле Fields вводятся значения осевых остаточных напряжений с обратным знаком (положительное значение температуры соответствует сжатию). Температурный коэффициент линейного расширения материала принимается для удобства равным $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$. При вводе исходных данных по нагружению в виде перепада температурного поля (Temperature) в качестве масштабного коэффициента (Load/BC Set Scale Faktor) целесообразно использовать величину $n = \frac{1 - \mu}{\alpha E}$.

Это означает, что величину невязок между полученной расчетной и имеющейся экспериментальной зависимостями $\sigma_z(a)$ будет удобно использовать при корректировке перепада температурного поля $\Delta T(a)$ в последующей итерации (без корректировки численного значения).

Полученная зависимость после первой итерации для рассматриваемого случая приведена на рис. 2 и несколько отличается от экспериментальной по значениям. Поэтому требуется выполнение следующей итерации по расчету.

После корректировки перепада температурного поля в модели на величину невязок между кривыми на рис. 2 проводится расчет для итерации № 2. Результаты этого расчета в рассматриваемом примере приведены на рис. 3.

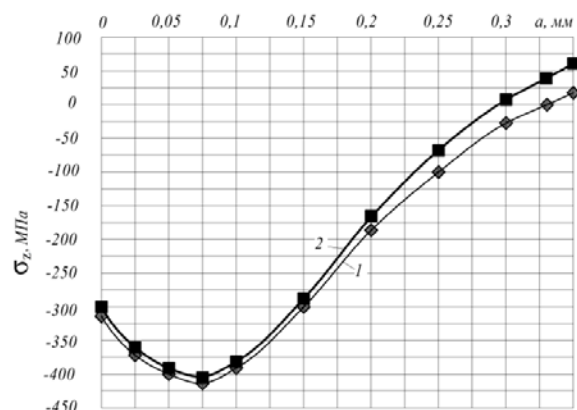


Рис. 2. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости распределения осевых σ_z остаточных напряжений в упрочненном слое: итерация № 1

Из данных рис. 3 видно, что расчетная и экспериментальная зависимости осевых остаточных напряжений совпали практически полностью. Это означает, что подобранное температурное поле обеспечивает искомые первоначальные деформации.

чальные деформации в упрочненном слое рассматриваемого цилиндрического образца. Для этого на практике проводится обычно 2–3 итерации. Расчетная зависимость распределения первоначальных деформаций в упрочненном слое образца приведена на рис. 4.

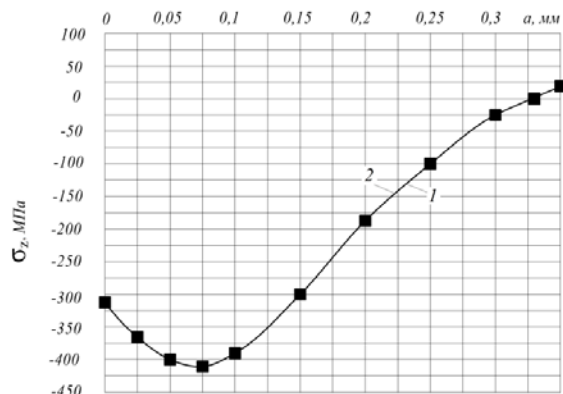


Рис. 3. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости распределения осевых σ_z остаточных напряжений в упрочненном слое: итерация № 2

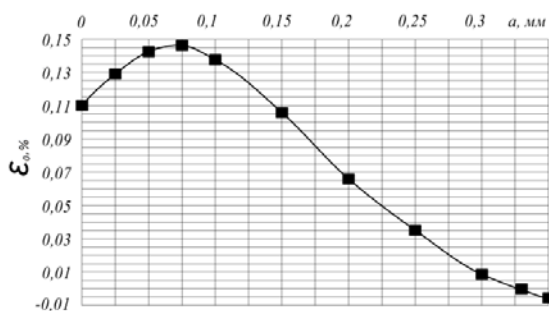


Рис. 4. Расчетная зависимость распределения первоначальных деформаций ϵ_0 в упрочненном слое

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Полученная зависимость первоначальных деформаций по толщине упрочненного слоя образца-свидетеля в дальнейшем используется в качестве деформационного нагружения в конечно-элементных моделях штатных деталей при определении остаточного напряженно-деформированного состояния в зонах концентрации напряжений (в опасных сечениях) и при определении изменений формы и размеров.

Для случая, когда первоначальные деформации $\epsilon_{ог}$, $\epsilon_{о0}$, $\epsilon_{оз}$ имеют разные значения, в модели используется ортотропный материал с различными значениями температурного коэффициента линейного расширения по направле-

ниям осей системы координат обычно в пропорциях относительно осевого направления. Для получения результата требуемой точности количество итераций с расчетами несколько больше, чем в первом случае, когда первоначальные деформации изотропные.

На основании полученных результатов следует важный вывод, что в гладкой зоне цилиндрической детали толщина упрочненного слоя с первоначальными деформациями несколько больше, чем глубина, на которой осевые остаточные напряжения меняют свой знак с отрицательного на положительный.

Принятое допущение о том, что все точки поверхности деталей и образцов-свидетелей при одинаковых технологических процессах упрочнения получают одинаковые первоначальные деформации, достаточно точно подтверждается результатами проведенных экспериментальных и расчетных исследований [11–15]. На рис. 5 [4] представлены зависимости осевых остаточных напряжений по толщине упрочненного слоя сплошных цилиндрических образцов различного диаметра из различных материалов (алюминиевый сплав Д16Т и сталь 45).

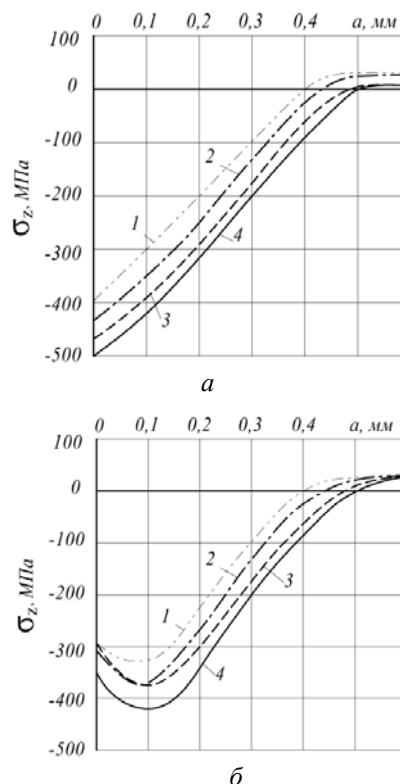


Рис. 5. Осевые σ_z остаточные напряжения в гладких образцах после ГДО:
а – сплав Д16Т: 1 – $D = 10$ мм, 2 – $D = 15$ мм, 3 – $D = 25$ мм, 4 – $D = 40$ мм;
б – сталь 45: 1 – $D = 10$ мм, 2 – $D = 15$ мм, 3 – $D = 25$ мм, 4 – $D = 50$ мм

Образцы проходили один и тот же технологический цикл поверхностного упрочнения. Из представленных на рис. 5 данных следует, что уровень остаточных напряжений тем выше, чем больше диаметр детали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для определения распределения остаточных напряжений расчетным методом в упрочненных цилиндрических деталях различного диаметра, представляется возможным использовать первоначальные деформации в образцах-свидетелях, обработанных одновременно с деталями.

2. Расчетным методом установлено, что толщина упрочненного поверхностного слоя превышает глубину смены знака остаточных напряжений.

3. С увеличением размеров поперечного сечения деталей при одной и той же упрочняющей обработке толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями увеличивается.

4. При одинаковых первоначальных деформациях поверхностного слоя уровень сжимающих остаточных напряжений увеличивается с увеличением жесткости детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с. [[I. A. Birger, *Residual stresses*, (in Russian). Moscow: Mashgiz, 1963.]]
2. Павлов В. Ф., Столяров А. К., Вакулюк В. С., Кирпичев В. А. Расчет остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. Самара: СНЦ РАН, 2008. 124 с. [[V. F. Pavlov, et al., *Residual stresses calculation in parts with stress concentrators on initial deformations*, (in Russian). Samara, 2008.]]
3. Иванов С. И., Павлов В. Ф., Минин Б. В., Кирпичев В. А., Кочеров Е. П., Головкин В. В. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей. Самара: СНЦ РАН, 2015. 171 с. [[S. I. Ivanov, et al., *Residual stresses and fatigue resistance of high-strength threaded parts*, (in Russian). Samara, 2015.]]
4. Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. Самара: СНЦ РАН, 2012. 125 с. [[V. F. Pavlov, et al., *Surface hardened parts fatigue resistance prediction by residual stresses*, (in Russian). Samara, 2012.]]
5. Вакулюк В. С. Исследование влияния толщины упрочненного слоя на остаточные напряжения во впадине концентратора методом первоначальных деформаций // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки. 2010. № 1 (20). С. 222–225. [[V. S. Vakulyuk, "Hardened layer thickness influence on residual stresses in the concentrator cavity by initial deformations method investigation," (in Russian), in *Vestnik SamGTU*, no. 1 (20), pp. 222-225, 2010.]]
6. Саушкин М. Н., Радченко В. П., Павлов В. Ф. Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии поверхностного упрочнения // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52, № 2. С. 173–182. [[M. N. Saushkin, et al., "Residual stresses fields' and plastic deformations calculation method in cylindrical specimens taking into account surface hardening anisotropy," (in Russian), in *Applied mathematics and technical physics*, vol. 52, no. 2, pp. 173-182, 2011.]]
7. Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. Вып. 53. Куйбышев: КуАИ, 1971. С. 32–42. [[S. I. Ivanov, "On determination of residual stresses in cylinder by rings-and-stripes method," (in Russian), in *Residual stresses*, iss. 53, pp. 32-42, Kuibyshev: KuAI, 1971.]]
8. Иванов С. И., Митряев К. Ф. Об изучении остаточного напряженного состояния детали путем исследования образцов // Остаточные напряжения. Вып. 53. Куйбышев: КуАИ, 1971. С. 115–121. [[S. I. Ivanov, K. F. Mitryaev, "On studying of part's residual strained state by specimens' investigation," (in Russian), in *Residual stresses*, iss. 53, pp. 115-121, Kuibyshev: KuAI, 1971.]]
9. Сазанов В. П., Чирков А. В., Самойлов В. А., Ларионова Ю. С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник СГАУ. 2011. № 3 (27). Ч. 3. С. 171–174. [[V. P. Sazanov, et al., "Residual stresses redistribution modeling in surface hardened cylindrical specimens under outstripping superficial plastic deforming," (in Russian), in *Vestnik SGAU*, part 3, pp. 171-174, 2011.]]
10. Сазанов В. П. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных цилиндрических деталей из стали 20 по первоначальным деформациям образцов-свидетеля // Вестник СГАУ. 2014. № 1 (43). С. 150–158. [[V. P. Sazanov, "Surface hardened cylindrical parts made of steel 20 endurance limit prediction by initial deformations of the reference specimen," (in Russian), in *Vestnik SGAU*, no. 1 (43), pp. 150-158, 2014.]]
11. Вакулюк В. С., Сазанов В. П., Павлов В. Ф., Шадрин В. К. Оценка влияния гидродробеструйной обработки на многоцикловую усталость цилиндрических деталей из сплава Д16Т по первоначальным деформациям образцов-свидетеля // Вестник СамГТУ. Сер.: Техн. науки. 2014. № 2 (42). С. 87–93. [[V. S. Vakulyuk, et al., "The evaluation of the hydro blasting influence on the multicycle fatigue of cylindrical parts made of Д16Т alloy by the reference specimen initial deformations," (in Russian), in *Vestnik SamGTU*, Technical sciences, no. 2 (42), pp. 87-93, 2014.]]
12. Павлов В. Ф., Вакулюк В. С., Сазанов В. П., Иванов В. Б., Микушев Н. Н. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных сплошных цилиндрических образцов из стали 45 по остаточным напряжениям образца-свидетеля // Известия вузов. Поволжский регион. 2014. № 3. С. 149–162. [[V. F. Pavlov, et al., "The prediction of surface hardened solid cylindrical specimens made of steel 45 endurance limit by the residual stresses of a reference specimen," (in Russian), in *Izvestiya vusov. Volga region*, no. 3, pp. 149-162, 2014.]]
13. Сазанов В. П., Вакулюк В. С., Михалкина С. А., Сургутанов Н. А., Кочерова Е. Е. Исследование влияния первоначальных радиальных деформаций на распределение остаточных напряжений в поверхностно упрочненном ци-

линдре // Известия СНЦ РАН. 2014. Т. 16, № 4. С. 163–167. [[V. P. Sazanov, *et al.*, “The investigation of the initial radial deformations influence on the residual stresses distribution in a surface hardened cylinder,” (in Russian), in *News of Samara Scientific Centre*, vol. 16, no. 4, pp. 163-167, 2014.]]

14. Вакулюк В. С., Сазанов В. П., Шадрин В. К., Микушев Н. Н., Злобин А. С. Применение метода термоупругости при конечно-элементном моделировании напряженного состояния в поверхностно упрочненных деталях // Известия СНЦ РАН. 2014. Т. 16, № 4. С. 168–174. [[V. S. Vakulyuk, *et al.*, “Thermoelasticity method applying by Finite Elements Modeling of strained state in surface hardened parts,” (in Russian), in *News of Samara Scientific Centre*, vol. 16, no. 4, pp. 168-174, 2014.]]

15. Саушкин М. Н., Сазанов В. П., Вакулюк В. С. Исследование влияния упрочняющей обработки на предел выносливости цилиндрических образцов из конструкционных сталей по остаточным напряжениям образца-свидетеля // Вестник ПНИПУ. Механика. 2014. № 4. С. 178–196. [[M. N. Saushkin, *et al.*, “The investigation of the hardening machining influence on the endurance limit of cylindrical specimens made of structural steels by the residual stresses of a reference specimen,” (in Russian), in *News of PNRPU, Mechanics*, pp. 178-196, 2014.]]

ОБ АВТОРАХ

САЗАНОВ Вячеслав Петрович, доц. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (КуАИ, 1978). Канд. техн. наук (СГАУ, 2010). Иссл. в обл. мех. остаточных напряжений.

КИРПИЧЕВ Виктор Алексеевич, проф. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (Куйбышевск. авиац. ин-т (КуАИ), 1980). Д-р техн. наук по динам., прочн. машин, приборов и аппаратуры (СГАУ, 2009). Иссл. в обл. мех. остаточных напряжений.

ВАКУЛЮК Владимир Степанович, доц. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (КуАИ, 1974). Дис. д-ра техн. наук по динам., прочн. машин, приборов и аппаратуры (СГАУ, 2015). Иссл. в обл. мех. остаточных напряжений.

ПАВЛОВ Валентин Федорович, проф. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (Куйбышевск. авиац. ин-т (КуАИ), 1967). Д-р техн. наук (КуАИ, 1988). Иссл. в обл. мех. остаточных напряжений.

METADATA

Title: The definition of initial deformations in the cylindrical parts surface layer by Finite Elements Modeling method using PATRAN/NASTRAN program complex.

Authors: V. P. Sazanov, V. A. Kirpichev, V. S. Vakulyuk, V. F. Pavlov.

Affiliation:

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

Email: sazanow@mail.ru; dean_fla@ssau.ru; sopromat@ssau.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU, vol. 19, no. 2 (68), pp. 35-40, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The method of the initial deformations definition in hardened cylindrical parts has been adduced. Using the Finite Elements Modeling method and PATRAN/NASTRAN program complex the calculation of hardened cylindrical part made of 12X18H10T steel with 15 mm external diameter and 10 mm internal one initial deformations definition has been carried out. It has been shown on the calculation example that the initial deformations definition has been done by the small number of iterations. It's been carried out that the thickness of the layer with the initial deformations in the smooth part of the cylindrical detail slightly exceeds the depth where the residual stresses change their sign from negative to positive.

Key words: residual stresses; initial deformations; Finite Elements Modeling; hardening; endurance limit.

About authors:

SAZANOV, Vyacheslav Petrovich, Associate Prof., Dept. of Strength of Materials. Dipl. Eng.- mech. (Kuibyshev Aviation Institute, 1978). Cand. of Tech. Sci. (Samara State Aerospace University, 2010).

KIRPICHEV, Victor Alexeevich, Prof., Dept. of Strength of Materials. Dipl. Eng.- mech. (Kuibyshev Aviation Institute, 1980). Cand. of Tech. Sci. (Moscow Aviation Technological Institute, 1990), Dr. of Tech. Sci. (Samara State Aerospace University, 2009).

VAKULYUK, Vladimir Stepanovich, Associate Prof., Dept. of Strength of Materials. Dipl. Eng.- mech. (Kuibyshev Aviation Institute, 1974). Cand. of Tech. Sci. (Moscow State Institute of Civil Aviation, 1983).

PAVLOV, Valentin Fedorovich, Prof., Dept. of Strength of Materials. Dipl. Eng.- mech. (Kuibyshev Aviation Institute, 1967). Cand. of Tech. Sci. (Kuibyshev Aviation Institute, 1975), Dr. of Tech. Sci. (Kuibyshev Aviation Institute, 1988).