

уравнению (5), исходя из условия равновесия, можно привести уравнение (6) к виду:

$$\varepsilon_{1-2}^{th} = \varepsilon_{1-2}^{el} \cdot \left(\frac{A_{1-2}}{A_{0-1}} + 1 \right) + \varepsilon_{1-2}^{pl}. \quad (7)$$

Билинейная кривая деформирования связывает величины ε_{1-2}^{el} и ε_{1-2}^{pl} следующим образом:

$$\varepsilon_{1-2}^{el} = \varepsilon_{1-2}^{pl} \cdot \frac{1}{\frac{E}{E^*} - 1} + \frac{\sigma_T}{E}, \quad (8)$$

где E^* — тангенс угла наклона второго участка кривой деформирования;

σ_T — предел текучести материала.

Тогда с учётом (7) имеем:

$$\alpha \Delta T = \left(\varepsilon_{1-2}^{pl} \cdot \frac{1}{\frac{E}{E^*} - 1} + \frac{\sigma_T}{E} \right) \cdot \left(\frac{A_{1-2}}{A_{0-1}} + 1 \right) + \varepsilon_{1-2}^{pl}. \quad (9)$$

$$\text{Обозначим } k = \frac{A_{1-2}}{A_{0-1}} + 1.$$

В итоге с учётом (5) получаем:

$$\Delta T = \frac{k}{\alpha E} \left[\sigma_{ост} \left(\frac{k}{\frac{E}{E^*} - 1} + 1 \right) + \sigma_T \right]. \quad (10)$$

Уравнение (10) показывает, какую температуру ΔT необходимо задать для наружной части цилиндра, чтобы после снятия этой температуры получить в нём требуемый уровень остаточных напряжений $\sigma_{ост}$.

Таким образом, изложенный подход позволяет определить в первом приближении уровень температурного воздействия, которое нужно приложить к детали, чтобы получить в ней требуемую величину остаточных напряжений.

УДК 621.787:539.319

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

©2016 В.П. Сазанов, А.П. Филатов, В.К. Шадрин, Н.Н. Микушев, Е.Ю. Исаев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

THE EXAMINATION OF HARDENING INFLUENCE ON THE ENDURANCE LIMIT OF PARTS HAVING A RECTANGULAR CROSS SECTION

Sazanov V.P., Filatov A.P., Shadrin V.K., Mikushev N.N., Isaev E.Yu. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

The comparison of endurance limits calculated by the average integral residual stresses criterion and experimental values of endurance limits of hardened specimens made of steel 45 having a rectangular cross section and a cut of semicircular profile has been shown that the difference doesn't exceed 7,2%.

Данное исследование является одной из апробаций применения разработанного расчётно-экспериментального метода, который основан на использовании современных расчётных комплексов, реализующих конечно-элементное моделирование (PATRAN/NASTRAN) [1], а также экспериментальных механических способов определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя. В работе была решена задача проверки практического применения используемых в вышеуказанном методе расчётных методик прогнозирования предела выносливости при упрочнении по-

верхности деталей на основании экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя образцов-свидетелей.

Расчётная часть исследований сравнивалась с результатами испытаний по определению предела выносливости при изгибе σ_{-1} образцов прямоугольного поперечного сечения [2] (рис. 1). Для данных испытаний были изготовлены образцы двух типоразмеров (табл. 1) из нормализованной стали 45 ($\sigma_s = 673$ МПа, $\sigma_{0,2} = 392$ МПа, $\delta = 20,3$ %, $\psi = 47,1$ %, $S_k = 1101$ МПа). Половина гладких

образцов после изготовления подвергалась гидродробеструйной обработке (ГДО). Затем на гладкие неупрочнённые и упрочнённые образцы профильной фрезой наносились надрезы полукруглого профиля (рис. 1) с радиусом $\rho_0 = 0,3$ мм.

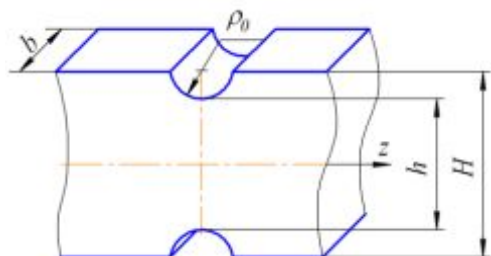


Рис. 1. Рабочая часть образца прямоугольного поперечного сечения для испытаний на усталость

Таблица 1 - Варианты размеров образцов прямоугольного поперечного сечения из стали 45

Вариант	H , мм	h , мм	b , мм	ρ_0 , мм
1	10	9,4	30	0,3
2	22	21,4	22	0,3

В качестве образцов-свидетелей в исследовании использовались гладкие упрочнённые образцы, остаточные напряжения в которых определялись методом полосок [3]. На разработанных конечно-элементных моделях были определены первоначальные деформации [4], зависимости которых по толщине упрочнённого слоя затем были перенесены на модели образцов с надрезами. По результатам расчёта на последних моделях были определены распределения остаточных напряжений в наименьшем (опасном) поперечном сечении образцов с полукруглыми надрезами. Среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ определялись на критической глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ [2, 5].

Результаты испытаний образцов прямоугольного поперечного сечения на усталость при изгибе в одной плоскости, значения среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициентов влияния упрочнения на предел выносливости $\bar{\psi}_\sigma$ представлены в табл. 2, где варианты размеров образцов соответствуют вариантам табл.1. Из данных табл. 2 видно, что с увеличением размера поперечного сечения в плоскости

изгиба предел выносливости σ_{-1} уменьшается, причём для упрочнённых образцов падение предела выносливости значительнее.

Таблица 2 - Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Вариант	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы					
		σ_{-1} , МПа	$\Delta \sigma_{-1}$, МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$t_{кр}$, мм	расчёт $\bar{\psi}_\sigma$	опыт $\bar{\psi}_\sigma$
1	150	192,5	42,5	-123	0,210	0,370	0,345
2	142,5	172,5	30,0	-81	0,480	0,373	0,371

Сравнение результатов расчёта и опыта по определению σ_{-1} упрочнённых образцов было выполнено по значениям коэффициентов влияния упрочнения на предел выносливости $\bar{\psi}_\sigma$. Как следует из табл. 2, различие расчётного и опытного определения $\bar{\psi}_\sigma$ составляет 7,2% для образцов варианта 1 и 0,5% для варианта 2, что является весьма удовлетворительным при прогнозировании предела выносливости за счёт упрочнения.

Можно видеть, что и в случае образцов прямоугольного поперечного сечения значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ близки к значению $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленному для поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов с такой же степенью концентрации напряжений [2].

Библиографический список

1. Сазанов В.П., Чирков А.В., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании. / Вестник СГАУ. 2011. №3(27). Ч. 3. С. 171-174.
2. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.
3. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. 232 с.
4. Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулюк В.С., Кирпичёв В.А. Расчёт остаточных на-

пряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. 124 с.

5. Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Про-

гнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений. / Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. С. 678-685.

УДК 621.787:539.319

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В УПРОЧНЁННОМ СЛОЕ ДЕТАЛИ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

©2016 В.П. Сазанов, О.Ю. Семёнова, В.В. Лунин, С.А. Колычев, А.В. Письмаров

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

THE DEFINITION OF INITIAL DEFORMATIONS IN THE PART HARDENED LAYER BY FINITE ELEMENTS MODELING METHOD

Sazanov V.P., Semenova O.Yu, Lunin V.V., Kolychev S.A., Pismarov A.V. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

For residual stress - strain state calculation of surface hardened parts the possibility of using reference specimens hardened simultaneously with the parts initial deformations has been based.

Известно [1], что первоначальные деформации лежат в основе образования остаточных деформаций и соответствующих им остаточных напряжений после различных воздействий на материал детали. Данные воздействия приводят к необратимым изменениям линейных размеров детали (пластические деформации, структурные и фазовые превращения в материале, облучение и др.). При этом деталь упруго деформируется и в ней образуется самоуравновешенное поле остаточных напряжений, в котором их максимальная величина соизмерима с пределом текучести наклепанного материала. В строгом понимании первоначальные деформации – это деформации, возникающие в детали, все элементарные объёмы которой, не участвующие в процессе пластического или другого деформирования, абсолютно жёстко закреплены. Из данного определения следует, что первоначальные деформации являются:

– абсолютной мерой результатов воздействия на деформируемые элементы объёма твёрдого тела;

– начальными условиями для расчёта остаточного напряжённо-деформированного состояния в твёрдом теле.

На практике в явном виде первоначальные деформации не существуют, так как процесс разгрузки протекает одновременно с их формированием. Возникает сложная и нерешённая до сих пор в полном объёме задача теории упругости и теории 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, приводит к первой основной задаче теории упругости с объёмными силами и нормальными усилиями, распределёнными по поверхности тела [1]. Приведённые в ряде работ [2-5] 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 упрочнённых деталях с концентраторами напряжений, а также при прогнозировании их предела выносливости.