УДК 621.787:539.319

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ШЛИЦЕВЫХ ДЕТАЛЯХ ПО ПЕРВОНАЧАЛЬНЫМ ДЕФОРМАЦИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

© 2016 В.С. Вакулюк, В.К. Шадрин, В.В. Алёшкин, Д.В. Анохин, Л.В. Денисов

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

Статья поступила в редакцию 30.03.2016

В исследовании изучена возможность применения первоначальных деформаций образцов-свидетелей для определения распределения остаточных напряжений в опасном сечении шлицевых деталей из сталей 12Х2Н4А и 30ХГСА после цементации. Расчёты проведены методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN. Показано, что расчётные распределения остаточных напряжений в опасном сечении шлицевых деталей отличаются от экспериментальных распределений по максимальным значениям не более, чем на 8%. Полученные расчётным методом распределения остаточных напряжений представляется возможным использовать для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых шлицевых деталей по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений.

Ключевые слова: шлицевая деталь, поверхностное упрочнение, образец-свидетель, первоначальные деформации, остаточные напряжения

Для оценки влияния поверхностного упрочнения на усталость необходимо знать распределение остаточных напряжений в поверхностном слое опасного сечения детали. Определение остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений является сложной трудоёмкой задачей, как в теоретическом, так и в практическом отношении. Наиболее точно влияние остаточных напряжений на предел выносливости деталей с концентраторами напряжений оценивается по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений [1-4].

$$\overline{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_{0}^{1} \frac{\sigma_{z}(\xi)}{\sqrt{1-\xi^{2}}} d\xi$$
(1)

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые ($\sigma_{\varphi}(\xi)$ – окружные для шлицевых деталей) остаточные напряжения в опасном сечении детали по толщине поверхностного слоя *y*, $\xi = \frac{y_{t_{xp}}}{t_{xp}}$ – расстояние от поверхности опасного сече-

ния детали до текущего слоя, выраженное долях $t_{\kappa p}$, $t_{\kappa p}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в опасном сечении упрочнённой детали при работе на пределе выносливости.

Использование критерия $\overline{\sigma}_{ocm}$ требует знания достаточно точного распределения остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя деталей в опасных сечениях, так как характер распределения остаточных напряжений оказывает существенное влияние на предел выносливости [4]. Из всего разнообразия методов определения остаточных напряжений только механические методы [5, 6] дают возможность получения распределения остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя. Недостатком механических методов является разрушение исследуемой детали при вырезке образцов, а также решение трудоёмкой задачи

определение связи перемещений (деформаций) образцов, при удалении слоёв и остаточными напряжениями.

Преодолеть эти трудности позволяет расчётноэкспериментальный метод определения остаточных напряжений в деталях с концентраторами по первоначальным деформациям образца-свидетеля, обработанного одновременно с деталями, с использованием конечно-элемент-ного моделирования и современных расчётных комплексов. Этот подход в настоящем исследовании реализован для шлицевых деталей, которые были изготовлены по стандартной технологии, применяемой в авиационном двигателестроении. Шлицы деталей имели эвольвентный профиль и изготавливались из сталей 12Х2Н4А и 30ХГСА.

Для практического определения приращения предела выносливости шлицевых деталей за счёт упрочнения необходимо было определить опасное сечение в зоне концентрации и распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя этого сечения. Для определения опасного сечения были выполнены расчёты методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN. Конечно-элементная модель (рис. 1) представляют собой плоское сечение шлицевой детали с наложением соответствующих граничных условий по перемещениям. При моделировании использовался плоский шестиузловой треугольный конечный элемент типа Shell [7].



Рис. 1. Конечно-элементная модель сечения шлицевого вала

Вакулюк Владимир Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов. E-mail: sopromat@ssau.ru

Шадрин Валентин Карпович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов. E-mail: shadrinvk@gmail.com

Алёшкин Вячеслав Владимирович, аспирант

Анохин Денис Вячеславович, аспирант

Денисов Лев Владленович, аспирант

По результатам расчётов были построены графики (рис. 2) зависимости окружных напряжений на поверхностях галтелей зуба (растянутой и сжатой) σ_{ϕ}^{noe} от угла θ , определяющего положение точки на поверхности галтельного перехода. Угол θ отсчитывался от точки перехода эвольвентной поверхности зуба в поверхность галтели с радиусом R=0,4 мм в сторону поверхности впадины. Расчёты показали, что для различных схем нагружения зуба опасное сечение во впадинах шлиц находится под углом $\theta = 20 \div 30$ градусов при любом виде нагружения.



Рис. 2. Распределение напряжений σ_{φ}^{noe} вдоль поверхности впадин шлиц

Для определения распределения остаточных напряжений по толщине опасного сечения галтельных переходов были выполнены расчёты методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса NASTRAN / PATRAN по первоначальным деформациям образца-свидетеля [7, 8]. В качестве образца-свиде-теля использовалась гладкая цилиндрическая де-таль, прошедшая весь технологический цикл упрочнения вместе с исследуемой деталью. Конечно-элементная модель (рис. 3) представляла собой плоское сечение зуба шлицевой детали с наложением соответствующих граничных условий симметрии по перемещениям.



Рис. 3. Конечно-элементная модель сечения зуба шлицевого вала

На рис. 4-5 представлены результаты расчёта распределения окружных σ_{ϕ}^{ocm} остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя галтельного перехода при угле θ , равном 0, 10, 20 и 30 градусов для различных

вариантов изготовления шлиц и состояния их поверхности. Из приведенных на рис. 4-6 данных видно, что расчётные распределения остаточных напряжений незначительно (до 8% по максимальным значениям) отличаются от распределения остаточных напряжений, определённых экспериментально [9] методом удаления поверхностных слоёв впадин шлиц и измерения возникающих при этом перемещений. На рис. 4-6 экспериментально определённые распределения остаточных напряжений обозначены как исходные.



Рис. 4. Распределение окружных остаточных напряжений σ^{ocm}_φ по толщине поверхностного слоя галтельного перехода, материал 12Х2Н4А, фрезерование



Рис. 5. Распределение окружных остаточных напряжений σ_{ϕ}^{ccm} по толщине поверхностного слоя галтельного перехода, материал 12Х2Н4А, цементация



Рис. 6. Распределение окружных остаточных напряжений σ_{ϕ}^{ocm} по толщине поверхностного слоя галтельного перехода, материал 30ХГСА, цементация

Выводы: исследования показали, что используя расчётно-экспериментальный метод определения остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям образца-свидетеля можно получить распределение остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых шлицевых деталях. Эти распределения представляется возможным использовать для прогнозирования предела выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений, вычислямых по формуле (1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29-32.
- Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. №8. С. 22-26.
- Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. №12. С. 37-40.
- 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.

- Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 53. С. 32-42.
- Иванов, С.И. 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.
- Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. 2011. №3(27). Ч. З. С. 171-174.
- Павлов, В.Ф. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. 124 с.
- Вакулюк, В.С. Влияние технологии изготовления на остаточные напряжения и сопротивление усталости шлицевых деталей // Вестник СамГТУ. Сер. : тех. науки. 2013. №2 (38). С. 99-104.

THE DEFINITION OF RESIDUAL STRESSES IN SPLINED PARTS BY INITIAL DEFORMATIONS OF A REFERENCE SPECIMEN

© 2016 V.S. Vakulyuk, V.K. Shadrin, V.V. Alyoshkin, D.V. Anokhin, L.V. Denisov

Samara State Aerospace University named after acad. S.P. Korolyov

The possibility of reference specimens' initial deformations application for the definition of residual stresses in the dangerous section of splined parts made of 12X2H4A and 30XFCA steels after the cementation has been examined. The calculations have been made by the Finite Elements modeling method using PATRAN/NASTRAN program complex. It's been shown that the calculated residual stresses distributions in the dangerous section of splined parts differ from the experimental ones no more than for 8%. The residual stresses distributions carried out by the calculation method can be used for the endurance limit prediction for the surface hardened splined parts using the average integral residual stresses criterion.

Key words: splined part, surface hardening, reference specimen, initial deformations, residual stresses

Vladimir Vakulyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Materials Resistance Department.

E-mail: sopromat@ssau.ru Valentin Shadrin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Materials Resistance Department. E-mail: shadrinvk@gmail.com Vyacheslav Alyoshkin, Post-graduate Student Denis Anokhin, Post-graduate Student

Lev Denisov, Post-graduate Student