

Ковалкин Ю.П., Вакулюк В.С., Михалкина С.А., Мокшин Д.С.

## ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ СРЕДНЕИНТЕГРАЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

Влияние остаточных напряжений во впадинах зубчатых колёс на приращение предела выносливости  $\Delta\sigma_R$  проводилось по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  [1-3] по следующей формуле:

$$\Delta\sigma_R = \bar{\psi}_\sigma |\bar{\sigma}_{ост}|,$$

где  $\bar{\psi}_\sigma$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ . Критерий  $\bar{\sigma}_{ост}$  определялся по формуле [3]

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_\varphi(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi,$$

где  $\sigma_\varphi(\xi)$  – окружные остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором;  $\xi = \frac{a}{t_{кр}}$  – расстояние от дна впадины зубчатого колеса до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ . Через  $t_{кр}$  обозначена максимально возможная глубина нераспространяющейся усталостной трещины, возникающей при работе детали на пределе выносливости [1]

$$t_{кр} = 0,0216 \times h = 0,0216 \times 6,2 = 0,134 \text{ мм},$$

где  $h$  – размер опасного сечения зуба шестерни в месте образования и развития усталостной трещины (6,2 мм для шестерён с модулем  $m = 3$  мм и числом зубьев  $z = 25$ , материал – 12Х2Н4А). Для этих шестерён в работе [4] было рассчитано среднее значение  $\bar{\psi}_\sigma = 0,516$ .

Определение остаточных напряжений в поверхностном слое впадин шестерён связано с целым рядом трудностей – вырезка образца и решение сложной и трудоёмкой задачи по определению связи деформаций образца при вырезке и удалении слоёв во впадине и остаточными напряжениями [5,6]. Преодолеть эти трудности позволила разработка расчётно-экспериментального метода определения остаточных напряжений во впадинах шестерён по первоначальным деформациям плоского образца-свидетеля,

изготовленного из того же материала, что и шестерни, и обработанного вместе с ними. На рис. 1 и 2 приведены окружные  $\sigma_\varphi$  остаточные напряжения и деформационная кривая  $f(a)$  по толщине поверхностного слоя  $a$  в образце-свидетеле.

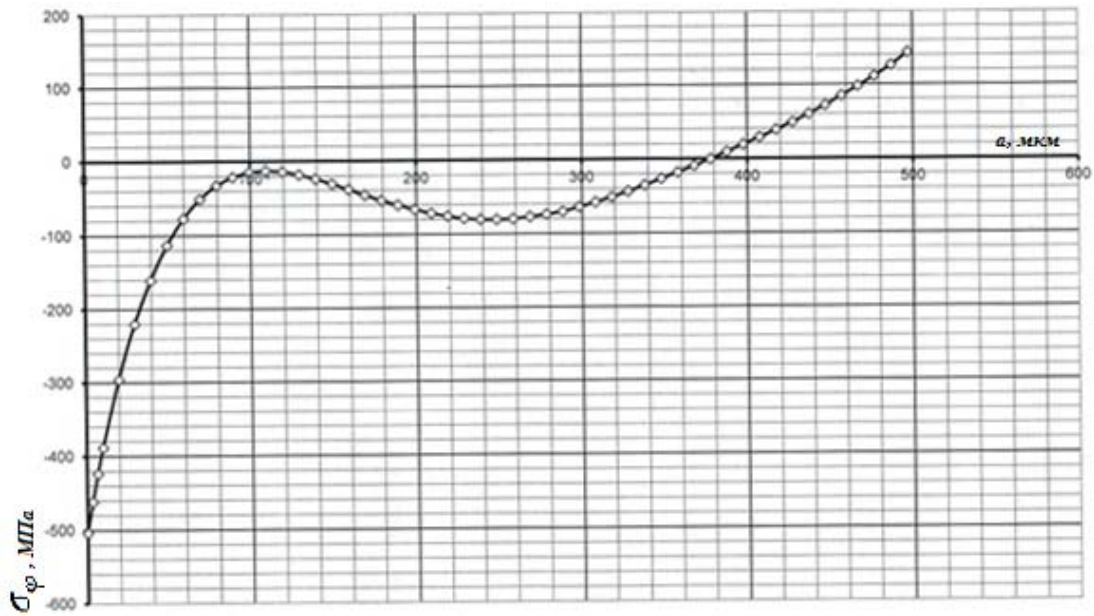


Рис. 1. Остаточные напряжения в образце-свидетеле

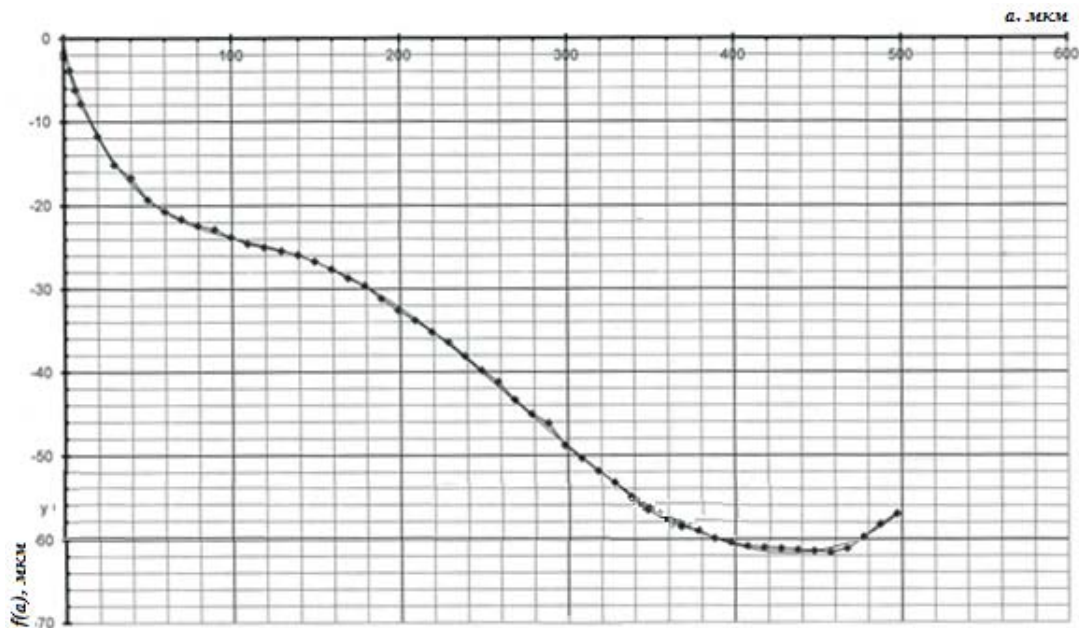


Рис. 2. Деформационная кривая образца-свидетеля

Методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN была установлена связь между остаточными напряжениями в образце-свидетеле и остаточными напряжениями в поверхностном слое впадин шестерён. На рис. 3 представлена конечно-элементная модель зуба шестерни.

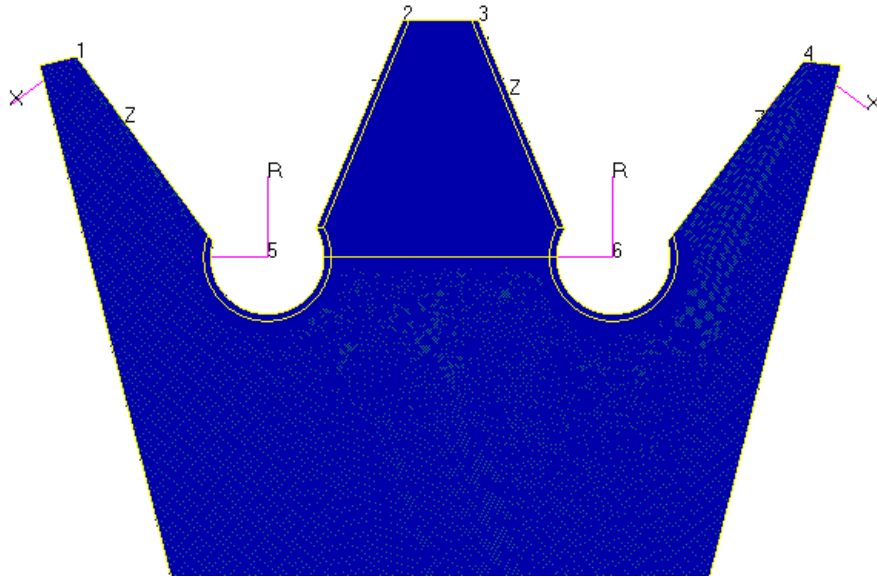


Рис. 3. Конечно-элементная модель зуба шестерни

Проведённые расчёты позволили построить эпюру остаточных напряжений в поверхностном слое впадин шестерён (рис. 4). Для зуба шестерни с  $m = 3$  мм,  $z = 25$ , значение критерия  $\bar{\sigma}_{ост} = -78$  МПа.

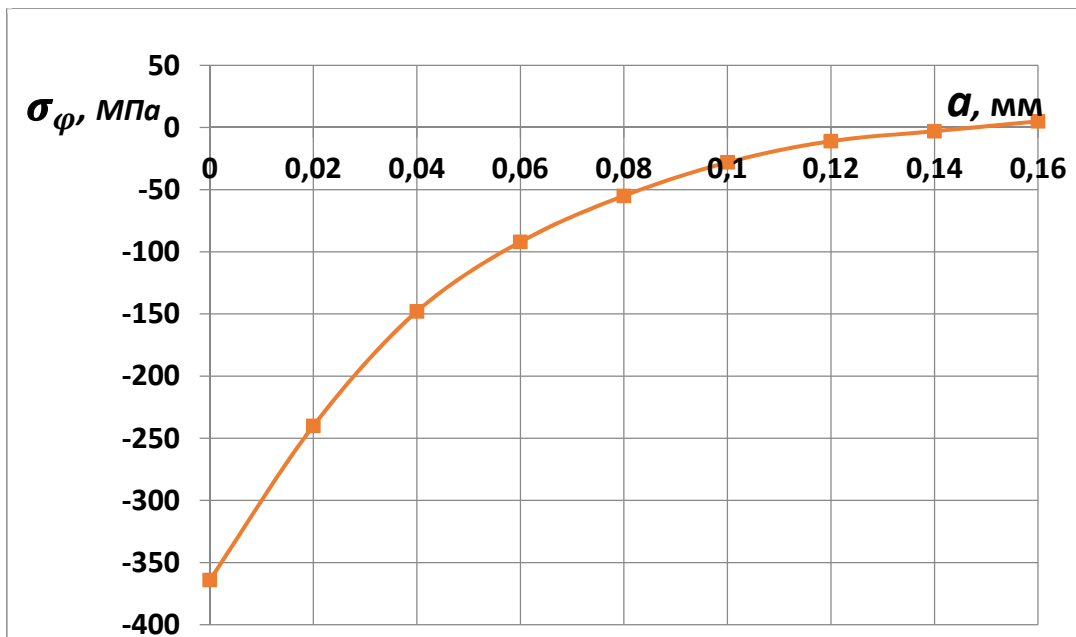


Рис. 4. Остаточные напряжения в поверхностном слое впадин шестерён

Таким образом, проведённое исследование показало возможность получения распределения остаточных напряжений в опасном сечении зубчатых колёс по остаточным напряжениям образца-свидетеля, что позволяет сохранить в целостности дорогостоящую деталь.

### Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНИЦ РАН. – 2012. – 125 с.

2. Вакулюк, В.С. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов с концентраторами напряжений [Текст] / В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв, В.Ф. Павлов, В.П. Сазанов // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. – №1(54). – С. 45-49.

3. 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.

4. Ковалкин, Ю.П. Влияние технологии изготовления на остаточные напряжения и сопротивление усталости зубчатых колёс [Текст] / Ю.П. Ковалкин, В.С. Вакулюк, В.К. Шадрин, Е.Е. Кочерова, К.Ф. Матвеева. – Известия СамНЦ РАН. – 2017. – Т. 19. – №1(2). – С. 239-242.

5. Иванов, С.И. Способ измерения остаточных напряжений в шестернях [Текст] / С.И. Иванов, Н.Г. Трофимов, М.П. Шатунов, В.М. Ермолаев, Ю.П. Ковалкин, Э.И. Фрейдин. – Авторское свидетельство №1439380, 1984 г.

6. Шатунов, М.П. Применение метода конечных элементов для определения остаточных напряжений во впадинах шестерён [Текст] / М.П. Шатунов, Ю.П. Ковалкин. – Рукопись деп. ВНИИТЭМР. – 1986. – № 301. – 27 с.