

Из данных рис. 1 следует, что для образцов рассматриваемого размера с концентратором на начальном участке роста трещины наблюдаются два экстремума коэффициента интенсивности напряжений – максимальное и минимальное значения. Следует отметить, что в упрочнённом образце значительно выше разница (размах) между экстремальными значениями.

Остановка роста трещины возможна в том случае, когда минимальное значение  $K_I$  будет меньше его порогового значения  $K_{Ih}$ . Судя по характеру зависимостей такое возможно только в случае упрочнённого образца с концентратором напряжений. В неупрочнённых образцах с концентраторами нераспространяющиеся трещины усталости обнаружены не были [1]. Таким образом, полученные результаты расчёта достаточно точно подтверждаются результатами испытаний на усталость исследованных образцов.

#### Библиографический список

1. 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.

2. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. / М.: Машиностроение, 1982. –171 с.

3. Кирпичёв В.А., Сазанов В.П., Сургутанов Н.А., Шадрин В.К. О связи коэффициента интенсивности напряжений и нераспространяющейся трещины усталости. Материалы X Всероссийской научной конференции по механике деформируемого твёрдого тела (18-22 сентября 2017 г., Самара, Россия). / Самара: СамГТУ. – 2017. –Т. 2. –С. 23-26.

4. 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. 22-25.

5. 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.

УДК 621.787:539.319

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

©2018 В.П. Сазанов, Ю.Н. Сургутанова, А.А. Прохоров, О.М. Пилипив

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

### THE ENDURANCE LIMIT OF SURFACE HARDENED CYLINDRICAL PARTS MADE OF CONSTRUCTION STEELS PREDICTION

Sazanov V.P., Surgutanova Yu.N., Prohorov A.A., Pilipiv O.M. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*The results of the hardened parts made of construction steels endurance limit prediction after pneuma- and hydro shot-blastig are presented in the study. The results of the calculation have been compared with the results of the fatigue tests.*

Проведённые многочисленные эксперименты показывают, что наиболее точно связь между приращением предела выносливости упрочнённых деталей и остаточными напряжениями отражает критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ , предложенный в работе [1]. Данный крите-

рий рассчитывается на критической глубине нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$  и учитывает влияние на сопротивление усталости не только величины, но и характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали.

В настоящем исследовании критерий среднеинтегральных остаточных напряжений использован для оценки влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости сплошных и полых цилиндрических образцов с надрезами при изгибе в случае симметричного цикла нагружения. Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости детали  $\Delta\sigma_{-1}$  при изгибе в случае симметричного цикла с использованием критерия  $\bar{\sigma}_{ocm}$  [2, 3] производится по следующей зависимости:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (1)$$

где  $\bar{\psi}_{\sigma}$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию  $\bar{\sigma}_{ocm}$ .

В свою очередь коэффициент  $\bar{\psi}_{\sigma}$  вычисляется для случая изгиба по следующей формуле [4]:

$$\bar{\psi}_{\sigma} = 0.612 - 0.081\alpha_{\sigma}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{\sigma}$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Для сравнения с расчётными значениями параметров, в исследовании использованы результаты испытаний на усталость при изгибе в случае симметричного цикла нагружения сплошных и полых цилиндрических образцов различного диаметра из широко применяемых в машиностроении конструкционных сталей 20, 45, 40X и 30XГСА [4].

Круговые надрезы с радиусом  $R = 0,3$  мм были выполнены по технологии опережающего поверхностного пластического деформирования после упрочнения поверхности образцов (пневно-(ПДО) и гидродробеструйная обработка (ГДО)). С использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений были вычислены приращения предела выносливости упрочнённых образцов с надрезами. Установлено, что расчётные значения приращений предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла нагружения для образцов с надрезами отличаются от экспериментальных не более, чем на 11 %. Результаты расчёта и испытаний цилиндрических полых и сплошных образцов приведены в табл.1. Обозначения геометрических параметров в табл. 1 соответствуют рис. 1.

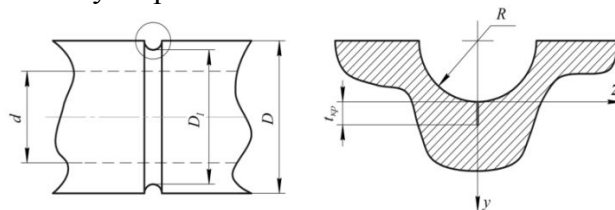


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом

Таблица 1–Результаты расчётного и экспериментального определения предела выносливости упрочнённых образцов с надрезами из конструкционных сталей

	$D$ , мм	$d$ , мм	$D_1$ , мм	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\alpha_{\sigma}$	$\bar{\psi}_{\sigma}$	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$ , МПа	Расхождение, %
Сталь 20 (ПДО)	10	0	9.4	0.203	-122	2.7	0.393	48.0	45.0	6
	25	0	24.4	0.527	-89	2.9	0.377	33.6	30.0	11
	25	15	24.4	0.453	-91	3.0	0.369	33.5	32.5	3
Сталь 45 (ГДО)	15	5	14.4	0.303	-159	2.8	0.385	61.2	57.5	6
	25	15	24.4	0.453	-131	3.0	0.369	48.3	45.0	7
	50	40	49.4	0.733	-87	3.1	0.361	31.4	30.0	4
40X (ГДО)	25	0	24,4	0,527	-109	2,9	0,377	41,1	42,5	3
	25	10	24,4	0,504	-110	2,9	0,377	41,4	42,5	3
	25	19	24,4	0,380	-117	3,0	0,369	43,2	40	8
30XГСА (ГДО)	10	0	9,4	0,203	-208	2,7	0,382	90	82	9

Полученные результаты подтверждают обоснованность использования критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ocm}$  и разработанного на его основе метода «образцов-свидетелей» для прогнози-

рования предела выносливости упрочнённых деталей.

#### Библиографический список

1.Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при

изгибе в условиях концентрации напряжений. / Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.

2. 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. 22-25.

3. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточ-

ных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали. / Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37-40.

4. 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.

УДК 621.787:539.319

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЦЕМЕНТАЦИИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ ВКС-5

©2018 О.Ю. Семёнова, Д.С. Мокшин, Е.А. Денискина, В.В. Сазанов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

## THE ESTIMATION OF THE CEMENTATION INFLUENCE ON THE FATIGUE RESISTANCE OF SPECIMENS MADE OF STEEL ВКС-5

Semyonova O.Yu., Mokshin D.S., Deniskina E.A., Sazanov V.V. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*The influence of the cementation on the endurance limit of corset specimens made of steel ВКС-5 has been examined. The average integral residual stresses criterion has been used for an estimation of a hardening influence on the endurance limit increment.*

В проведённом исследовании использованы результаты испытаний на усталость корсетных образцов и результаты экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя гладких образцов-свидетелей (цилиндрические втулки). Необходимый объём расчётов для анализа и сравнения с результатами испытаний проведён методом конечно-элементного моделирования.

Корсетные образцы круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм были изготовлены из конструкционной легированной стали 16ХЗНВФМБ (ВКС-5). Образцы после шлифования подвергались цементации на различных режимах. После цементации у корсетных образцов шлифованием обрабатывалась только коническая часть образцов, поэтому в рабочей (корсетной) части остаточное напряжённое состояние оставалось неизменным.

Распределения осевых остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов (цилиндри-

ческие втулки) получены экспериментальным методом с использованием расчётных зависимостей работы [1]. Режимы термической и химико-термической обработки корсетных и гладких образцов приведены в табл. 1.

Прогнозирование приращения предела выносливости  $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$  поверхностно упрочнённых образцов выполнено по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  [2]

$$(\Delta\sigma_{-1})_{расч} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (1)$$

где  $\bar{\psi}_{\sigma}$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$ .

Коэффициент  $\bar{\psi}_{\sigma}$  определялся по эмпирической зависимости, установленной в работе [3]

$$\bar{\psi}_{\sigma} = 0,612 - 0,081\alpha_{\sigma}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{\sigma}$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений.