

Вакулюк В.С., Каранева О.В., Лунин В.В., Колычев С.А.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА  
НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ В КОРСЕТНЫХ ОБРАЗЦАХ  
ИЗ СПЛАВА ВКС-5 ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

В настоящем исследовании изучалось влияние технологии изготовления корсетных образцов круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7.5 мм из сплава ВКС-5 на предел выносливости через величину и распределение остаточных напряжений поверхностного слоя. После механической обработки (шлифования) образцы подвергались термической и химико-термической обработке по режимам, приведённым в таблице 1.

Таблица 1. Режимы обработки, результаты определения остаточных напряжений и предела выносливости корсетных образцов

Материал	№ п/п	Режимы обработки	$\sigma_{\text{ост}}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ , МПа	$\sqrt{r_{\sigma}}$
ВКС-5	1	Закалка 900°C; отпуск 600°C – 1 час	760	-136	–
	2	Ионная цементация 950°C – 1 час; отпуск 650°C – 3 часа	900	-389	0.553
	3	Цементация 940°C – 6 часов; отпуск 650°C – 3 часа; закалка 900°C; обработка холодом: – 70°C	1040	-672	0.522

Испытания образцов на усталость при чистом изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине МВП-10000, база испытаний –  $30 \cdot 10^6$  циклов нагружения, температура испытаний – 20°C. Результаты определения предела выносливости представлены в таблице 1. Можно видеть, что химико-термическая обработка образцов привела к существенному повышению сопротивления усталости. Часть образцов, испытанных на пределе выносливости при циклов нагружения, была доведена до разрушения при большей нагрузке. Во всех разрушенных образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина которых  $t_{cr}$  составляла 0.160 мм, что соответствует зависимости, установленной в [1]:

$$t_{cr} = 0,0216D, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр опасного сечения образца.

Следует обратить внимание на тот факт, что нераспространяющиеся трещины усталости обнаружены в корсетных образцах, то есть в образцах с весьма малой

концентрацией напряжений, а значение критической глубины этих трещин  $t_{кр}$  соответствует зависимости (1), установленной экспериментально для образцов и деталей с существенной концентрацией напряжений [1, 2].

Оценка влияния остаточных напряжений на приращение предела выносливости упрочнённых образцов проводилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{o,ин}$  [2], вычисляемых в опасном сечении по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. Можно видеть (таблица 1), что среднее значение коэффициента влияния остаточных напряжений на предел выносливости  $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,538$  соответствует значению коэффициента  $\bar{\psi}_{\sigma}$ , приведённому в работе [2] для гладких деталей.

Для определения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов были выполнены расчёты методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN. Моделирование остаточных напряжений в упрочнённом слое было выполнено методом термоупругости по первоначальным деформациям гладкого образца-свидетеля [3]. Распределение меридиональных  $\sigma_{\theta}$  остаточных напряжений по толщине  $a$  упрочнённого поверхностного слоя образцов-свидетелей приведено на рисунке 1.

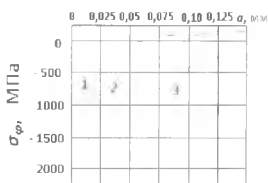


Рисунок 1 – Остаточные напряжения в образцах-свидетелях из сплава ВКС-5

Из данных рисунка 1 следует, что при исследованных видах термической и химико-герметической обработок в образцах действуют сжимающие остаточные напряжения с максимумом на поверхности, достигающим в образцах после цементации – 2200 МПа (эпюра 3).

На примере образцов из сплава ВКС-5 можно проследить за влиянием полноты эпюры сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости. После ионной цементации и обычной цементации наибольшие остаточные напряжения различаются незначительно: -2100 МПа и -2200 МПа, соответственно (эпюры 2 и 3). Однако после ионной цементации распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного

слоя является менее полным, чем после обычной цементации, – смена знака остаточных напряжений в первом случае (эпюра 2) происходит на глубине  $a=0,1$  мм, а во втором (эпюра 3) – на глубине  $a=0,23$  мм. В результате приращение предела выносливости образцов по сравнению с исходным состоянием (эпюра 1) после ионной цементации в 2 раза меньше, чем после обычной цементации: 140 МПа и 280 МПа, соответственно. Ниже, в качестве примера, приводятся результаты расчётов распределения меридиональных  $\sigma_r$  и осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  опасного (наименьшего) сечения корсетного и гладкого образцов для варианта 2 таблицы 1.

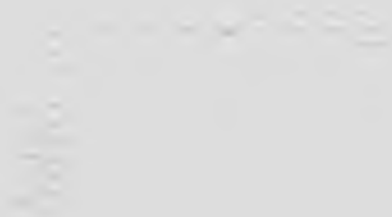


Рисунок 2 – Распределение остаточных напряжений по толщине опасного сечения корсетного и гладкого образцов

Анализ результатов расчёта показывает, что распределение осевых остаточных напряжений по толщине наименьшего сечения корсетных образцов для всех рассмотренных вариантов состояния упрочнённой поверхности практически совпадают с аналогичными зависимостями для гладких образцов (рисунок 2). Следовательно, концентрация остаточных напряжений для исследованных корсетных образцов практически отсутствует.

### Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение 1. Сплошные детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-26.
2. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхности упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирричѳ, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СИЦ РАН, 2012. – 124 с.
3. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – №3 (27). – Часть 3. – С. 171-174.