

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ  
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

В исследовании изучалось влияние технологии изготовления корсетных образцов круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм из сплавов ВКС-5 и ЭП718 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	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
ВКС-5	1	закалка 900 <sup>0</sup> С; отпуск 600 <sup>0</sup> С - 1 час	760	- 136	–
	2	ионная цементация 950 <sup>0</sup> С - 1 час; отпуск 650 <sup>0</sup> С - 3 часа	900	- 389	0,553
	3	цементация 940 <sup>0</sup> С - 6 часов; отпуск 650 <sup>0</sup> С - 3 часа; закалка 900 <sup>0</sup> С; обработка холодом - 70 <sup>0</sup> С	1040	- 672	0,522
ЭП718	1	ложное борирование	340	- 82	–
	2	борирование	580	- 598	0,465

Испытания образцов на усталость при чистом изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине МВП-10000, база испытаний – 30·10<sup>6</sup> циклов нагружения, температура испытаний – 70<sup>0</sup> С. Результаты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  представлены в таблице 1. Можно видеть, что химико-термическая обработка образцов привела к существенному повышению сопротивления усталости. Часть образцов, испытанных на пределе выносливости при 30·10<sup>6</sup> циклов нагружения, была доведена до разрушения при бóльшей нагрузке. Во всех разрушенных образцах были обнаружены

нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина которых  $t_{кр}$  составляла 0,160 мм, что соответствует зависимости, установленной в работе [1].

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, установленной экспериментально для образцов и деталей с существенной концентрацией напряжений [1].

Меридиональные  $\sigma_\varphi$  остаточные напряжения определялись расчётно-экспериментальным методом по первоначальным деформациям образца-свидетеля [2]. В качестве образца-свидетеля использовалась гладкая цилиндрическая деталь диаметром 7,5 мм, прошедшая весь технологический цикл упрочнения совместно с исследуемым корсетным образцом. Исследовались остаточные напряжения в образцах как непосредственно после термической обработки, так и после испытаний на усталость.

Необходимо отметить, что остаточные напряжения в образцах, прошедших базу испытаний при напряжениях, равных пределу выносливости, практически не отличались от остаточных напряжения образцов, не подвергавшихся испытаниям на усталость. Следовательно, остаточные напряжения после использованных термической и химико-термической обработок в исследованных образцах весьма устойчивы к воздействию переменных напряжений. Эпюры меридиональных  $\sigma_\varphi$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  представлены на рисунке 1.

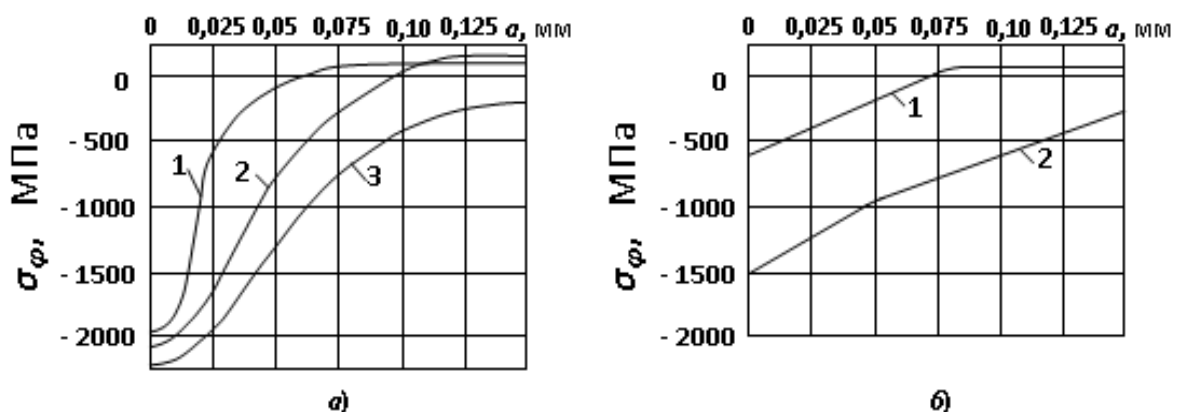


Рисунок 1 – Распределение меридиональных  $\sigma_\varphi$  остаточных напряжений в корсетных образцах из сплавов ВКС-5 (а) и ЭП718 (б); номера эпюр соответствуют номерам вариантов таблицы 1

Из данных рисунка 1 следует, что при всех исследованных видах термической и химико-термической обработок в образцах действуют сжимающие остаточные напряжения с максимумом на поверхности, достигающим в образцах из ВКС-5 после цементации - 2200 МПа (рисунок 1, *a*; 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 (рисунок 1, *a*; эпюры 2 и 3). Однако после ионной цементации распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя является менее полным, чем после обычной цементации; смена знака напряжений в первом случае (рисунок 1, *a*; эпюра 2) происходит на глубине  $a = 0,1$  мм, а во втором (рисунок 1, *a*; эпюра 3) – на глубине  $a = 0,23$  мм. В результате приращение предела выносливости образцов по сравнению с исходным состоянием (рисунок 1, *a*; эпюра 1) после ионной цементации в 2 раза меньше, чем после обычной цементации: 140 МПа и 280 МПа соответственно. О влиянии характера распределения остаточных напряжений на сопротивление усталости указывалось ранее в работе [3].

Для корсетных образцов из сплава ЭП718 борирование по сравнению с ложным борированием приводит к наведению в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений с максимумом на поверхности, достигающим -1500 МПа, и глубиной залегания 0,25 мм (рисунок 1, *b*). В результате предел выносливости образцов после настоящего борирования увеличился на 240 МПа.

Изучалось влияние температуры испытаний на усталость на величину и распределение остаточных напряжений в образцах из сплава ВНС-17. На рис. 2 приведены средние остаточные напряжения корсетных образцов, подвергавшихся испытаниям на усталость при нормальной и повышенной температурах.

В образцах, испытанных при повышенной температуре, наблюдается более высокий уровень сжимающих остаточных напряжений на поверхности (~1950 МПа), чем у образцов, испытанных при нормальной температуре (~1450 МПа). В дальнейшем, при увеличении расстояния от поверхности в образцах, подвергавшихся испытаниям при  $T=500^{\circ}$  С, на глубине ~60 мкм сжимающие остаточные напряжения переходят в растягивающие (максимум ~400 МПа на глубине 100 мкм), а в образцах, испытанных при  $T=20^{\circ}$  С, сжимающие остаточные напряжения сохраняются до глубины 150 мкм и имеют более полное распределение.

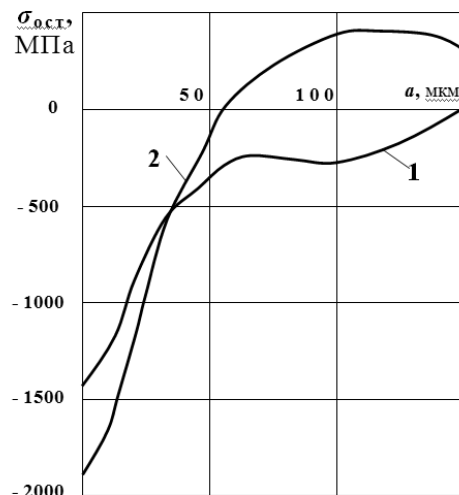


Рисунок 2 – Остаточные напряжения в корсетных образцах из сплава ВНС-17 после двойного азотирования с последующим отпуском. Закалка  $860^{\circ}\text{C}$  – 40 мин, отпуск  $640^{\circ}\text{C}$  – 4 часа, отпуск  $580^{\circ}\text{C}$  – 10 часов, азотирование  $630^{\circ}\text{C}$  – 20 часов, отпуск  $600^{\circ}\text{C}$  – 2 часа: 1– $T_{\text{исп}}=20^{\circ}\text{C}$ , 2– $T_{\text{исп}}=500^{\circ}\text{C}$

Анализ результатов расчёта показал, что распределение осевых остаточных напряжений по глубине наименьшего сечения корсетных образцов для всех рассмотренных вариантов состояния упрочнённой поверхности практически совпадают с аналогичными зависимостями для гладких образцов. 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 I. Сплошные детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-25.
2. Павлов, В.Ф. Расчет остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям [Текст] / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.
3. Павлов, В.Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1987. – №7. – С. 3-6.