

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ КОРСЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ*

В.Ф. Павлов, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв, В.И. Лапин

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Исследовано влияние термической и химико-термической обработки корсетных образцов из сплавов ВКС-5 и ЭП718 на предел выносливости. Установлено, что для прогнозирования предела выносливости корсетных образцов с небольшой степенью концентрации напряжений представляется возможным использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

Ключевые слова: корсетные образцы, химико-термическая обработка, предел выносливости, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

В работе изучалось влияние сжимающих остаточных напряжений, наведённых различными видами термической и химико-термической обработки, на предел выносливости корсетных образцов.

Для определения остаточных напряжений в корсетных образцах с указанными на рис. 1 размерами методом конечных элементов была решена задача теории упругости по определению меридиональных σ_φ (осевых σ_z в наименьшем сечении образца) остаточных напряжений, ответственных за изменение предела выносливости [1]. Нагружение образца меридиональными σ_φ , окружными σ_θ и радиальными σ_r остаточными напряжениями, эквивалентное удалению слоя толщиной a в пределах половины поверхности корсетной части образца, показано на рис. 1.

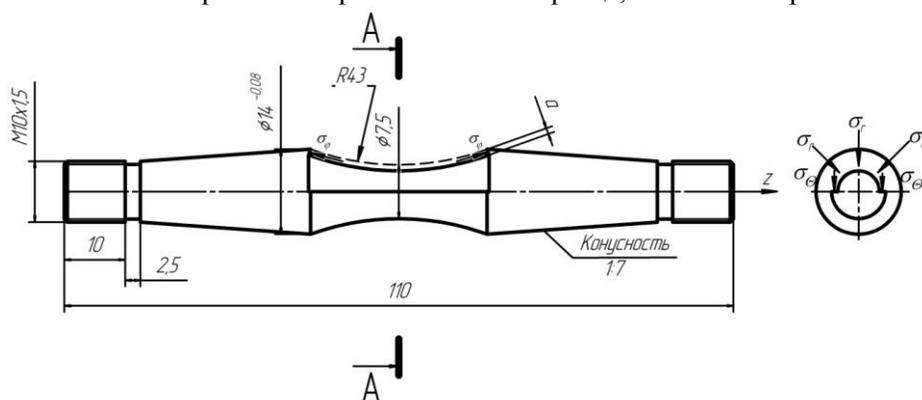


Рис. 1. Нагружение корсетного образца, эквивалентное удалению слоя толщиной a

* Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию (проект РНП.2.1.1/3397).

Валентин Федорович Павлов – д.т.н., профессор, зав. кафедрой.

Владимир Степанович Вакулюк – к.т.н., доцент.

Виктор Алексеевич Кирпичев – к.т.н., доцент.

Валерий Иванович Лапин – инженер.

Конечная зависимость для вычисления меридиональных σ_φ остаточных напряжений имеет следующий вид:

$$\sigma_\varphi(a) = \frac{E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \left(L - \frac{\ell}{2} \right) \frac{d}{da} \left[\frac{f(a)}{XP(a)} \right], \quad (1)$$

где E – модуль продольной упругости материала образца; μ – коэффициент Пуассона; L – расстояние от начала зоны травления образца до сечения, в котором измеряются перемещения (рис. 2); ℓ – длина корсетной части образца (рис. 1 и 2); $f(a)$ – измеряемое перемещение образца с удлинителем при удалении поверхностного слоя толщиной a (рис. 2); $XP(a)$ – коэффициент жёсткости.

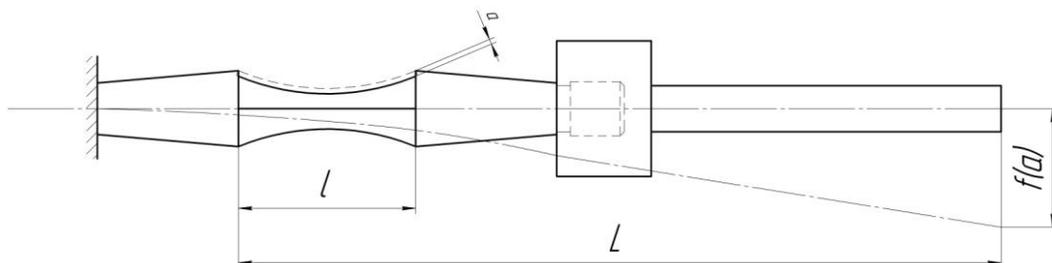


Рис. 2. Схема измерения перемещения $f(a)$ образца с удлинителем при удалении поверхностного слоя толщиной a

Удлинитель использовался для увеличения измеряемых перемещений с целью повышения точности определения остаточных напряжений. Значения коэффициента жёсткости $XP(a)$, вычисленного по результатам решения задачи теории упругости, приведены в табл. 1. Из данных табл. 1 видно, что изменение наименьшего диаметра d корсетного образца оказывает существенное влияние на значение коэффициента жёсткости $XP(a)$, поэтому диаметр образца следует измерять с достаточной точностью.

Таблица 1

Значения коэффициента $XP(a)$

d , мм	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5
R , мм	43,5	43,4	43,3	43,2	43,1	43
$XP(a)$, мм ⁻¹	4,500	4,279	4,059	3,842	3,620	3,385

В настоящем 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 табл. 2.

После термической обработки шлифованию подвергалась только коническая часть образцов, поэтому в рабочей части (корсетной) остаточное напряжённое состояние оставалось неизменным.

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

Материал	№ п/п	Режимы обработки	σ_{-1} , МПа	$\overline{\sigma}_{ост}$, МПа	$\overline{\psi}_{\sigma}$
ВКС-5	1	Закалка 900 °С; отпуск 600 °С – 1 час	760	-136	–
	2	Ионная цементация 950 °С – 1 час; отпуск 650 °С – 3 час	900	-389	0,553
	3	Цементация 940 °С – 6 час; отпуск 650 °С – 3 час; закалка 900 °С; обработка холодом: - 70 °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 – $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения, температура испытаний – 20 °С. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в табл. 2. Можно видеть, что химико-термическая обработка образцов привела к существенному повышению сопротивления усталости. Часть образцов, испытанных на пределе выносливости при $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения, была доведена до разрушения при бóльшей нагрузке. Во всех разрушенных образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости (рис. 3), средняя глубина которых $t_{кр}$ составляла 0,160 мм, что соответствует зависимости, установленной в [2]:

$$t_{кр} = 0,0216d . \quad (2)$$

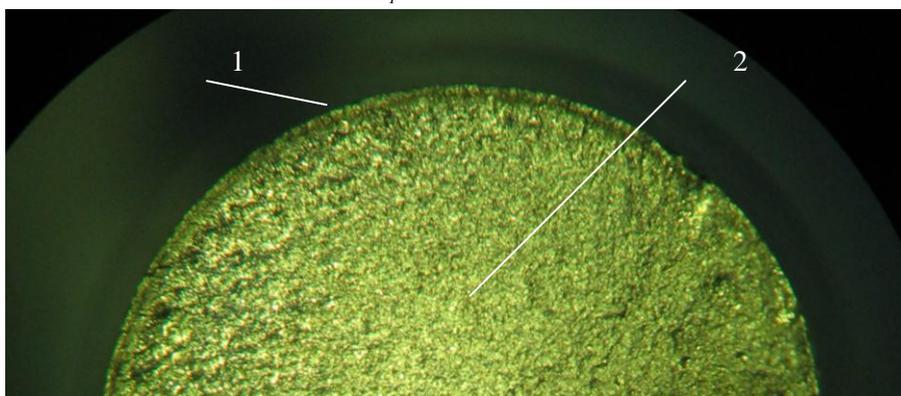


Рис. 3. Усталостный излом образца из сплава ВКС-5:
1 – нераспространяющаяся трещина; 2 – зона долома

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 $t_{кр}$ соот-

ветствует зависимости (2), установленной экспериментально для образцов и деталей с существенной концентрацией напряжений [2].

Меридиональные σ_φ остаточные напряжения определялись по формуле (1) описанным выше методом удаления половины поверхности образца в пределах его корсетной части. 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 напряжении, равном пределу выносливости, практически не отличались от остаточных напряжений 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 σ_φ остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a представлены на рис. 4.

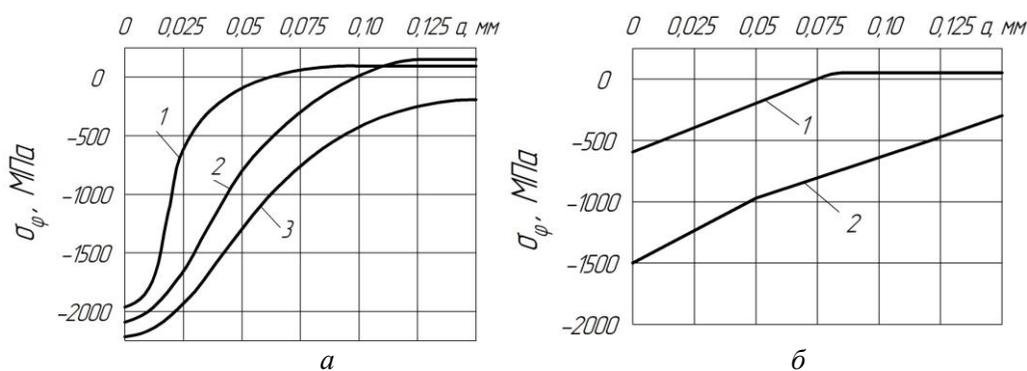


Рис. 4. Распределение меридиональных σ_φ остаточных напряжений в корсетных образцах из сплавов ВКС-5 (а) и ЭП718 (б); номера эпюр соответствуют номерам вариантов табл. 2

Из данных рис. 4 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 (рис. 4, а; 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 (рис. 4, а; 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 (рис. 4, а; эпюра 2) происходит на глубине $a = 0,1$ мм, а во втором (рис. 4, а; эпюра 3) – на глубине $a = 0,23$ мм. В результате приращение предела выносливости образцов по сравнению с исходным состоянием (рис. 4, а; 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 работах [3-6].

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 (рис. 4, а). В результате предел выносливости образцов после настоящего борирования увеличился на 240 МПа.

Оценка влияния остаточных напряжений на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ проводилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ост}$ [7]:

$$\Delta\sigma_{-1} = \overline{\psi}_{\sigma} \cdot \left| \overline{\sigma}_{ост} \right|, \quad (3)$$

где $\overline{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению,

$$\overline{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_{\varphi}(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (4)$$

$\sigma_{\varphi}(\xi)$ – меридиональные (осевые) остаточные напряжения в наименьшем сечении образца; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности образца до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе образца на пределе выносливости.

Среднеинтегральные остаточные напряжения $\overline{\sigma}_{ост}$ и коэффициент влияния $\overline{\psi}_{\sigma}$ приведены в табл. 2. Анализ этих данных показывает, что значение коэффициента $\overline{\psi}_{\sigma}$ составляет в среднем 0,51 и практически совпадает со значением $\overline{\psi}_{\sigma} = 0,53$, вычисленным по зависимости [8]

$$\overline{\psi}_{\sigma} = 0,612 - 0,081 \cdot \alpha_{\sigma}, \quad (5)$$

где $\alpha_{\sigma} = 1,06$ – теоретический коэффициент концентрации напряжений для исследованных корсетных образцов, который определён по справочнику [9].

Таким образом, в проведённом исследовании установлено, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ост}$ может быть использован для прогнозирования предела выносливости подвергнутых химико-термической обработке корсетных образцов из сплавов ВКС-5 и ЭП718, то есть для образцов с малой концентрацией напряжений. Для прогнозирования приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ необходимо воспользоваться зависимостью (3), в которой коэффициент влияния остаточных напряжений $\overline{\psi}_{\sigma}$ определяется по формуле (5), среднеинтегральные остаточные напряжения $\overline{\sigma}_{ост}$ вычисляются по зависимости (4) по толщине поверхностного слоя образца, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$, рассчитанной по формуле (2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов В.Ф., Куртичев В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упругопрочных деталей с концентраторами напряжений. – Самара: СНЦ, 2008. – 64 с.
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. 22-26.
3. Павлов В.Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости // Известия вузов. Машиностроение. – 1987. – №7. – С. 3-6.

4. Смагленко Ф.П. Влияние распределения остаточных напряжений на усталостную прочность твердого сплава ВК15 // Проблемы прочности. – 1980. – №8. – С. 35-38.
5. Торбило В.И., Маркус Л.И. Остаточные напряжения в поверхностном слое закалённых сталей после алмазного выглаживания // Вестник машиностроения. – 1969. – №6. – С. 44-45.
6. Туровский М.Л., Новик Р.А. Упрочняющая обработка роликами азотированных стальных деталей // Вестник машиностроения. – 1970. – №1. – С. 39-42.
7. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29–32.
8. Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранаева О.В., Иванов В.Б. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости детали при различной степени концентрации // В сб.: Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Материалы докладов международной научно-технической конференции, часть 2. – Самара: СГАУ, 2009. – С. 178-179.
9. Петерсон Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: МИР, 1977. – 304 с.

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2010 г.

UDC 621.787:539.319

RESIDUAL STRESSES AND LIMIT OF ENDURANCE OF CORSET SPECIMENS AFTER VARIOUS TYPES OF THERMAL AND THERMOCHEMICAL PROCESSING

V.F. Pavlov, V.S. Vakuliuk, V.A. Kirpichev, V.I. Lapin

Samara State Aerospace University
34, Moskovskoye Shosse, Samara, 443086

Influence of thermal and thermochemical processing of corset specimens on limit of endurance is analyzed. It is established that use of average residual stresses criterion for forecasting of the corset specimens' limit of endurance with small stress concentration is available.

Keywords: *corset specimens, chemo-thermal treatment, limit of endurance, average residual stresses criterion.*

*Valentin F. Pavlov – Doctor of Technical Sciences, Professor.
Vladimir S. Vakuliuk – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.
Viktor A. Kirpichev – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.
Valeriy I. Lapin – Engineer.*