

УДК 621.787:539.319

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРИ НОРМАЛЬНОЙ И ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2012 В. Ф. Павлов¹, В. С. Вакулук¹, О. С. Афанасьева², А. С. Букатый³¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)²Самарский государственный технический университет³Ярославский государственный технический университет

Изучено влияние цементации, азотирования и борирования на предел выносливости при нормальной и повышенной температурах корсетных образцов из сплавов ВКС-5, ЭП718 и ВНС-17. Установлено, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений может быть использован для прогнозирования предела выносливости таких образцов.

Корсетный образец, цементация, азотирование, борирование, предел выносливости, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

Исследовалось влияние технологии изготовления корсетных образцов круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм (рис. 1) из сплавов ВКС-5, ЭП718 и ВНС-17 на предел выносливости при нормальной и повышенной температурах через величину и распределение остаточных напряжений поверхностного слоя. После шлифования образцы подвергались термической и химико-термической обработке по режимам, приведённым в табл. 1.

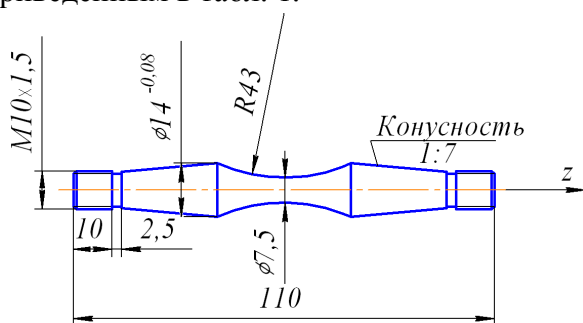


Рис. 1. Корсетный образец для испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

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

Испытания образцов на усталость при частом изгибе с вращением в случае симметричного цикла проводились на

машине МВП-10000, база испытаний – $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения, температура испытаний – 20°C и 500°C . Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в табл. 1. Из данных табл. 1 можно видеть, что цементация, борирование и азотирование образцов приводят к существенному повышению сопротивления усталости.

Часть цементированных, борированных и азотированных образцов, испытанных на пределе выносливости при $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения, были доведены до разрушения при статическом нагружении в случае растяжения. Во всех образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина $t_{кр}$ которых составляла 0,160 мм, что соответствует зависимости, установленной экспериментально в работах [1,2]:

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (1)$$

где D – диаметр наименьшего сечения образца; $D = 7,5\text{ мм}$ (рис. 1). На рис. 2 в качестве примера представлена фотография усталостного излома цементированного образца из сплава ВКС-5, где чётко просматривается нераспространяющаяся трещина усталости l глубиной 0,160 мм.

Следует обратить внимание на то, что нераспространяющиеся трещины усталости обнаружены в корсетных образцах, то есть в

образцах с весьма малой концентрацией напряжений. При этом значение критической глубины $t_{кр}$ этих трещин соответствует зависимости (1), установленной для поверхностно упрочнённых образцов и деталей с существенной концентрацией напряжений.

Меридиональные σ_ϕ остаточные напряжения (осевые σ_z – в наименьшем сечении образца) определялись методом удаления половины поверхности образца в пределах его корсетной части по методике, описанной в работе [3]. Исследовались остаточные напряжения в образцах как непосредственно после термической обработки, так и после испытаний на

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость образцов и определения остаточных напряжений

Материал	Вариант	Режимы обработки	Температура испытаний	σ_{-1} , МПа	$\sigma_\phi^{нов}$, МПа	ψ_σ	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
ВКС-5	1	исходное состояние: закалка 900°C; отпуск 600°C – 1 час	20°C	760	-1950	–	-136	–
	2	ионная цементация 950°C – 1 час; отпуск 650°C – 3 час	20°C	900	-2100	0,933	-389	0,553
	3	цементация 940°C – 6 час; отпуск 650°C – 3 час; закалка 900°C; обработка холодом: -70°C	20°C	1040	-2200	1,120	-672	0,522
ЭП718	1	ложное борирование	20°C	340	-580	–	-82	–
	2	борирование	20°C	580	-1510	0,258	-593	0,465
ВНС-17	1	исходное состояние: закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час	20°C	640	-1830	–	-372	–
	2	закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час; азотирование 560°C – 36 час	20°C	760	-2190	0,333	-606	0,513
ВНС-17	1	закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час; азотирование 580°C – 30 час; азотирование 630°C – 20 час	500°C	360	-1170	–	-116	–
	2	закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час; азотирование 630°C – 20 час; отпуск 600°C – 2 час	500°C	400	-1950	0,051	-190	0,541

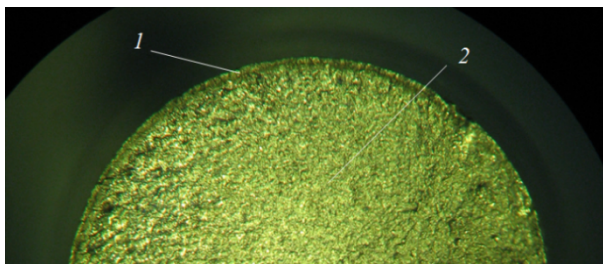


Рис. 2. Фрагмент излома корсетного образца из сплава ВКС-5:

1 – нераспространяющаяся трещина,
2 – зона долома

усталость. Необходимо отметить, что остаточные напряжения в образцах, прошедших базу испытаний в случае нормальной температуры (20°C) при напряжении, равном пределу выносливости, практически не отличались от остаточных напряжений образцов, не подвергавшихся испытаниям на усталость.

Следовательно, остаточные напряжения после термической и химико-термической обработок в исследованных образцах весьма устойчивы при нормальной температуре к воздействию переменных напряжений. Распределение меридиональных σ_ϕ остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a корсетных образцов представлено на рис. 3.

Из данных рис. 3 видно, что при всех видах химико-термической обработки в образцах действуют сжимающие остаточные напряжения с максимумом на поверхности, достигающим в образцах из сплава ВКС-5 после цементации -2200 МПа. После цементации и азотирования распределение остаточных напряжений является более полным, чем в исходном состоянии.

В результате испытаний на усталость азотированных образцов из сплава ВНС-17 при температуре 500°C произошло существенное снижение сжимающих остаточных напряжений и уменьшение глубины их залегания (рис. 3,з; эпюры 1 и 2). Отпуск азотированных образцов из сплава ВНС-17 перед испытаниями на усталость

приводит к большему сохранению остаточных напряжений, что и обусловило больший предел выносливости (табл. 1).

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. 3,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 остаточных напряжений в первом случае (рис. 3,а; эпюра 2) происходит на глубине $a = 0,1$ мм, а во втором (рис. 3,а; эпюра 3) – на глубине $a = 0,23$ мм. В результате приращение предела выносливости образцов по сравнению с исходным состоянием (рис. 3,а; эпюра 1) после ионной цементации в два раза меньше, чем после обычной цементации. $\Delta\sigma_{-1} = 140$ МПа и $\Delta\sigma_{-1} = 280$ МПа, соответственно. О влиянии характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя упрочнённых деталей на сопротивление усталости указывалось ранее в [4-7].

Оценка влияния химико-термической обработки на предел выносливости корсетных образцов проводилась по двум критериям. Первый критерий, использованный в [8-11], учитывает влияние остаточных напряжений σ_ϕ^{nov} на поверхности опасного сечения детали. Приращение предела выносливости при изгибе $\Delta\sigma_{-1}$ в этом случае определяется по формуле:

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_\sigma \cdot |\sigma_\phi^{nov}|, \quad (2)$$

где ψ_σ – коэффициент влияния остаточных напряжений σ_ϕ^{nov} на предел выносливости.

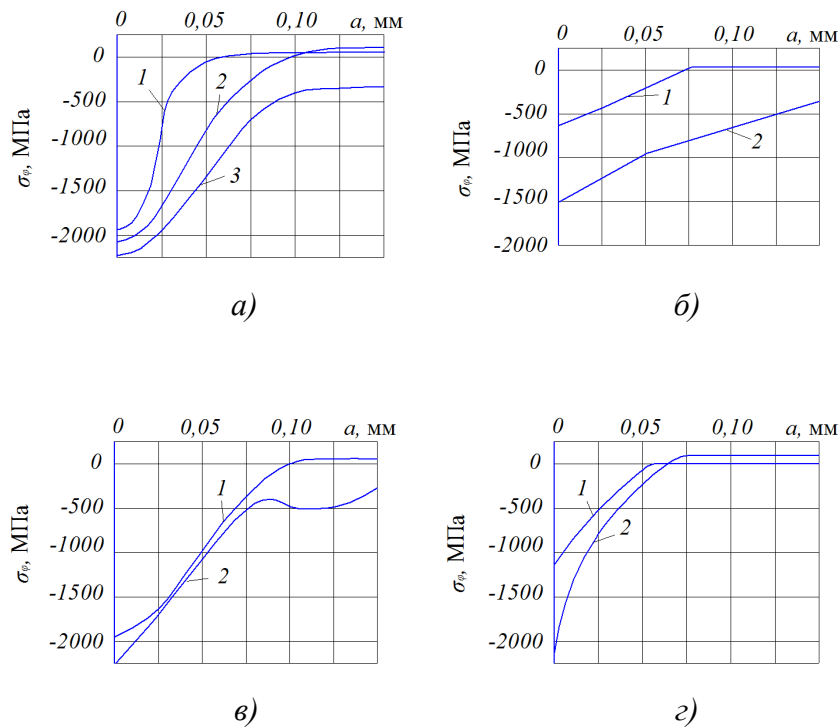


Рис. 3. Остаточные напряжения в корсетных образцах из сплавов ВКС-5 (а), ЭП718 (б) и ВНС-17 (в, г); номера эюр соответствуют номерам вариантов табл. 1

Из данных табл. 1 следует, что оценку приращения предела выносливости корсетных образцов за счёт химико-термической обработки по остаточным напряжениям $\sigma_{\phi}^{нов}$ на поверхности проводить не представляется возможным, так как коэффициент ψ_{σ} , вычисленный по формуле (2), изменяется в рассмотренных случаях от 0,051 до 1,120, то есть в 22 раза.

Оценка влияния химико-термической обработки на приращение предела выносливости образцов $\Delta\sigma_{-1}$ проводилась также по второму критерию – критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [2,12]:

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

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния $\bar{\sigma}_{ост}$ на предел выносливости;

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_{\phi}(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi; \quad (4)$$

$\sigma_{\phi}(\xi)$ – меридиональные (осевые) остаточные напряжения в наименьшем сечении образца по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{кр}$ – 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 $\bar{\sigma}_{ост}$ вычислялись по формуле (4) с использованием распределения меридиональных σ_{ϕ} остаточных напряжений, представленного на рис. 3, и приведены в табл. 1. Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния остаточных напряжений на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ определялся по зависимости (3). Значения $\bar{\psi}_{\sigma}$ представлены в табл. 1.

Анализ приведённых в табл. 1 данных показывает, что значение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ составляет в среднем 0,519 и незначительно отличается от значения $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,53$, вычисленного по зависимости [13]:

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

где $\alpha_{\sigma} = 1,06$ – теоретический коэффициент концентрации напряжений для исследованных корсетных образцов, который определён по справочнику [14].

Необходимо отметить, что критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ обычно используется для

прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) с существенной концентрацией напряжений [2]. В настоящем исследовании для корсетных образцов концентрация напряжений весьма мала ($\alpha_\sigma = 1,06$), однако полученное значение коэффициента $\bar{\psi}_\sigma = 0,519$ соответствует зависимости (5), установленной для случаев значительной концентрации напряжений. Этот результат позволяет применять критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с малой концентрацией напряжений, но лишь в тех случаях, когда сжимающие остаточные напряжения не изменяются в процессе испытаний на усталость под действием переменных напряжений.

Выводы

1. Проведённые экспериментальные исследования показали, что сжимающие остаточные напряжения в корсетных образцах из сплавов ВКС-5, ЭП718 и ВНС-17 практически не изменяются в процессе испытаний на усталость при нормальной температуре (20°C) под действием переменных напряжений.

2. При испытаниях на усталость азотированных образцов из сплава ВНС-17 при температуре 500°C происходит существенное снижение сжимающих остаточных напряжений и уменьшение глубины их залегания.

3. Оценку влияния химико-термической обработки на предел выносливости корсетных образцов из сплавов ВКС-5, ЭП718 и ВНС-17 по критерию остаточных напряжений $\sigma_\phi^{нов}$ на поверхности опасного сечения проводить не представляется возможным, так как соответствующий коэффициент ψ_σ в изученных случаях изменяется от 0,051 до 1,150, то есть в 22 раза.

4. Оценку влияния химико-термической обработки на предел выносливости как при нормальной, так и при повышенной температурах представляется возможным проводить по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, так как

соответствующий коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в рассмотренных случаях изменяется от 0,465 до 0,553, то есть в 1,2 раза.

5. Для оценки приращения предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла образцов из сплавов ВКС-5, ЭП718 и ВНС-17 после цементации, борирования и азотирования можно использовать зависимость (3). При этом коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ вычисляется по формуле (5), а среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ – по формуле (4) по толщине поверхностного слоя опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости, определяемой зависимостью (1).

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 // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-26.
2. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
3. Павлов В.Ф., Вакулук В.С., Кирпичёв В.А., Липин В.И. Остаточные напряжения и предел выносливости корсетных образцов после различных видов термической и химико-термической обработки // Вестник СамГТУ. Технические науки, 2010. – №7(28). – С. 101-106.
4. Павлов В.Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости // Известия вузов. Машиностроение. – 1987. – №7. – С. 3-6.
5. Смагленко Ф.П. Влияние распределения остаточных напряжений на усталостную прочность твёрдого сплава ВК15 // Проблемы прочности. – 1980. – №8. – С. 35-38.
6. Торбило В.М., Маркус Л.И. Остаточные напряжения в поверхностном слое закалённых сталей после алмазного

выглаживания // Вестник машиностроения. – 1969. – №6. – С. 44-45.

7. Туровский М.Л., Новик Р.А. Упрочняющая обработка роликами азотированных стальных деталей // Вестник машиностроения. – 1970. – №1. – С. 39-42.

8. Кравченко Б.А., Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 131 с.

9. Серенсен С.В., Борисов С.П., Бородин Н.А. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.

10. Туровский М.Л., Шифрин Н.М. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали // Вестник машиностроения. – 1970. – №11. – С. 37-40.

11. Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.

12. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.

13. Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранаева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 678-685.

14. Петерсон Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Издательство «МИР», 1977. – 304 с

EVALUATION OF THERMOCHEMICAL TREATMENT INFLUENCE ON FATIGUE STRENGTH OF SPECIMENS UNDER NORMAL AND HIGH TEMPERATURES

© 2012 V. F. Pavlov¹, V. S. Vakuljuk¹, O. S. Afanasieva², A. S. Bukatyi³

¹Samara State Aerospace University
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

²Samara State Technical University

³Yaroslavl State Technical University

The influence of cementation, nitriding and borating on endurance limit of corset specimens made of ВКС-5, ЭП718 and ВНС-17 allows under normal and high temperatures are studied. It is established that the average integral residual stresses criterion can be used for the prediction of endurance limit for specimens like these.

Corset specimen, cementation, nitriding, borating, endurance limit, average residual stresses criterion.

Информация об авторах

Павлов Валентин Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет).

E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Вакулюк Владимир Степанович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет).

E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Афанасьева Ольга Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики, Самарский государственный технический университет. E-mail: msaushkin@gmail.com. Область научных интересов: механика упрочнённых конструкций.

Букатый Алексей Станиславович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Ярославский государственный технический университет. E-mail: bukaty@inbox.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Pavlov Valentin Fedorovich, doctor of technical sciences, professor, Head of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.

Vakuljuk Vladimir Stepanovich, candidate of technical sciences, associate professor of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.

Afanasieva Olga Sergeevna, candidate of technical sciences, associate professor of applied mathematics and computer science department, Samara State Technical University. E-mail: msaushkin@gmail.com. Area of research: hardened constructions mechanics.

Bukaty Alexey Stanislavovich, candidate of technical sciences, senior lecturer of machining technology department, Yaroslavl State Technical University. E-mail: bukaty@inbox.ru. Area of research: residual stresses mechanics.