

№ Образца	Количество циклов	Размер зерна, Å	
		Без предварительной нормализации	После предварительной нормализации
1	1	1396	706
2	2	1015	518
3	3	820	398
4	4	690	349
5	5	650	324
6	6	540	298

Таблица 2 - Размер областей когерентного рассеяния в образцах после циклического сжатия и отжига

Деформирование проводилось как в условиях одноосного растяжения, так и в условиях сжатия при осадке. Результаты исследования представлены в таблицах 1 и 2, в которых приводятся средние значения.

Данные таблицы 1 показывают, что в результате растяжения и последующей рекристаллизации при трёхкратном повторе размер зерна уменьшается практически в 2 раза. Предварительная нормализация способствует уменьшению размера зерна практически в 4 раза.

Деформация сжатия с последующим отжигом (таблица 2) привела к получению зерна с меньшими размерами в 4-7 раз по сравнению с данными, полученными при одноосном растяжении.

Кроме того, напряжённо-деформированное состояние при осадке позволило увеличить количество возможных циклов обработки: растяжение удалось осуществить только трижды (при четвёртом цикле все образцы разрушились, не достигнув требуемой степени деформации), в то время как осадка дала возможность шестикратной обработки.

Несмотря на протекание рекристаллизации после каждого деформирования, растяжение после третьего и осадка после шестого цикла приводили к преждевременному разрушению образцов. Очевидно, что такая обработка сопровождалась накоплением

остаточных напряжений. К тому же, в результате нормализации возможно искажение кристаллической решётки, поэтому при последующем повторном нагреве при рекри

сталлизации возможно протекание структурных превращений, влияющих на уровень остаточных микронапряжений. Для установления характера превращений был исследован

уровень остаточных напряжений в зависимости от режимов обработки (таблица 3). Шлиф для оценки остаточных напряжений в образцах на одноосное растяжение выбирался после замера твёрдости и построения графиков распределения её значений в каждом образце. В образцах после осадки остаточные напряжения оценивались на поверхности.

* Исследован разрушенный образец

Данные таблицы 3 показывают, что в процессе циклических обработок остаточные напряжения возрастают для обоих вариантов схемы напряжённо-деформированного состояния, несмотря на проведение рекристаллизации, что может быть связано уменьшением размера зерна.

№ Обр аzca	Кол иче ство цик лов	Макронапр яжения, МПа		Микронапряже ния, МПа	
		Сжа тие	Раст яже ние	Сжати е	Растя жение
Исх.	0	466		0,0005	
1	1	473	758	0,0007	0,0007
2	2	483	818	0,0009	0,0013
3	3	462	833	0,0009	0,0013
4	4	493	919*	0,0013	0,0014 *
5	5	503	-	0,0013	-
6	6	511	-	0,0027	-
	7*	517		0,003	

Таблица 3 – Значения остаточных макро- и микронапряжений

УДК 621.787:539.319

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА ВНС-17 ПРИ НОРМАЛЬНОЙ И ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРАХ

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),

²Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

RESIDUAL STRESSES AND FATIGUE RESISTANCE OF SPECIMENS MADE OF BHC-17 ALLOY AT NORMAL TEMPERATURES

© 2012 V.F. Pavlov¹, O.S. Afanasieva², Yu. N. Surgutanova¹, A.P. Morozov², A.A. Semyonov¹

The research shows that although sufficient residual stresses distribution variation after heightened temperature treatment the average residual stresses criterion can be used for limit of endurance estimation at normal and heightened temperatures of specimens made of BHC-17 alloy after thermal and chemi-thermal treatment.

Изучались меридиональные σ_φ остаточные напряжения поверхностного слоя и их влияние на предел выносливости азотированных корсетных образцов круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм из сплава ВНС-17 при нормальной и повышенной температурах. После шлифования образцы подвергались термической и химико-

термической обработке по режимам, приведённым в табл. 1.

Испытания образцов на усталость при чистом 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.

№п/п	Режимы обработки	Температура испытаний	σ_{-1} , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час	20°C	640	-384	–
2	закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час; азотирование 560°C – 36 час	20°C	760	-617	0,515
3	закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час; азотирование 580°C – 30 час; азотирование 630°C – 20 час	500°C	360	-116	–
4	закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час; азотирование 580°C – 30 час; азотирование 630°C – 20 час; отпуск 600°C – 2 час	500°C	400	-190	0,541

Часть образцов, испытанных при напряжениях, равных пределу выносливости на базе $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения, была доведена до разрушения при статической нагрузке в случае растяжения. Во всех образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина которых $t_{кр}$ составляла 0,160 мм, что соответствует зависимости, установленной в [1]

$$t_{кр} = 0,0216D,$$

где D – диаметр наименьшего сечения образца.

Меридиональные σ_φ остаточные напряжения определялись 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 в случае нормальной температуры (20°C) при

напряжениях, равных пределу выносливости, практически не отличались от остаточных напряжений образцов, не подвергавшихся испытаниям на усталость. Следовательно, остаточные напряжения в исследованных образцах весьма устойчивы к воздействию переменных напряжений. Эпюры меридиональных σ_φ остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a представлены на рис. 1.

Из данных рис. 1 видно, что при различных вариантах термической и химико-термической обработок действуют сжимающие остаточные напряжения с максимумом на поверхности, достигающим после азотирования -2160 МПа

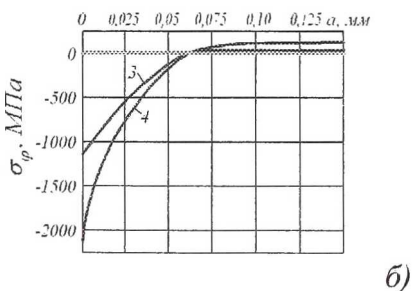
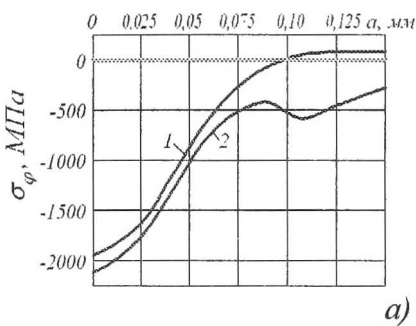


Рис. 1. Распределение меридиональных σ_φ остаточных напряжений в образцах из сплава ВНС-17; номера эпюр соответствуют номерам вариантов табл. 1

(эпюра 2). В результате испытаний на усталость образцов при температуре 500°C произошло существенное уменьшение остаточных напряжений и уменьшение глубины их залегания (эпюры 3 и 4).

Оценка влияния остаточных напряжений на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ проводилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [2]:

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

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

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

$\sigma_\varphi(\xi)$ – меридиональные (осевые) остаточные напряжения в наименьшем сечении образца; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности образца до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$.

Значения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ приведены в табл. 1. Величина коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ составляет в среднем 0,528 и совпадает со значением $\bar{\psi}_\sigma$, вычисленным по зависимости [3]

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma,$$

где $\alpha_\sigma = 1,06$ – теоретический коэффициент концентрации для исследованных корсетных образцов.

Таким образом, проведённое исследование показывает, что несмотря на существенное изменение распределения остаточных напряжений после воздействия повышенной температуры, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ может быть использован для оценки предела выносливости при нормальной и повышенной температурах корсетных образцов из сплава ВНС-17 после термической и химико-термической обработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

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

Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранаева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени

УДК 621.787:539.319

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

© 2012 В.Ф. Павлов, А.В. Чирков, Е.А. Денискина, О.Ю. Семёнова, А.А. Шкатов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика
С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара

LIMIT OF ENDURANCE AND RESIDUAL STRESSES OF CORSET SPECIMENS AFTER CHEMI-THERMICAL TREATING

© 2012 V.F. Pavlov, A.V. Chirkov, E.A. Deniskina, O.Yu. Semyonova, A.A. Shkatov

Cementation and nitriding influence on endurance limit of corset specimens made of ВКС-5 and ВНС-17 alloys is researched. It is established that use of average residual stresses criterion for forecasting limit of endurance of such specimens is available.

Изучалось влияние технологии изготовления корсетных образцов круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм из сплавов ВКС-5 и ВНС-17 на предел выносливости по величине и распределению остаточных напряжений поверхностного слоя. После шлифования образцы подвергались термической и химико-термической обработке по режимам, приведённым в табл. 1.

После термической обработки шли-

фованию подвергалась только коническая часть образцов, поэтому в рабочей (корсетной) части остаточное напряжённое состояние оставалось неизменным.

Испытания образцов на усталость при 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 σ_{-1} представлены в табл. 1

Материал	№ п/п	Вид обработки	Режим обработки	σ_{-1} , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
ВКС-5	1	исходное состояние	закалка 900°C; отпуск 600°C – 1 час	760	-136	–
	2	ионная цементация	ионная цементация 950°C – 1 час; отпуск 650°C – 3 часа	900	-389	0,553
	3	цементация	цементация 940°C – 6 час; отпуск 650°C – 3 часа; закалка 900°C; обработка холодом: -70°C	1040	-672	0,522
ВНС-17	1	исходное состояние	закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час	640	-372	–
	2	азотирование	закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час; азотирование 560°C – 36 час	760	-606	0,513

Таблица 1