

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2006 В.А. Кирпичев

Самарский государственный аэрокосмический университет

В настоящем исследовании изучалась возможность использования критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для прогнозирования предела выносливости при повышенной температуре.

Ранее[1] рассматривалось влияние сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости упрочненных деталей с концентраторами напряжений при нормальной температуре. Для определения приращения предела выносливости $\Delta\sigma_R$ был использован критерий среднеинтегральных остаточных напряжений

$$\Delta\sigma_R = \bar{\psi}_\sigma |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (1)$$

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

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_z(\vartheta) d\vartheta - \quad (2)$$

– среднеинтегральные остаточные напряжения по толщине поверхностного слоя детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

В настоящем исследовании изучалась возможность использования критерия (2) для прогнозирования предела выносливости при повышенной температуре. Вначале рассматривалось влияние остаточных напряжений при симметричном цикле на образцах диаметром 7,5 мм из стали ЭИ961 ($\sigma_B=1090$ МПа, $\sigma_{0,2}=992$ МПа, $\delta=11,3\%$, $\psi=67,4\%$)*. Часть образцов после изготовления подвергалась алмазному выглаживанию (усилие выглаживания – 0,1 кН, частота вращения образца – 160 мин⁻¹, подача – 0,05 мм/об, радиус алмазного наконечника – 2,0 мм), а затем на все образцы наносились надрезы полукруглого профиля радиуса 0,3 мм. Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя гладких и надрезанных образцов приведены

на рис.1. На этом же рисунке представлены остаточные напряжения в образцах после их выдержки в печи при температуре 400°С в течение 100 часов. Видно, что после термоэкспозиции остаточные напряжения уменьшились примерно на 30 %.

Значения предела выносливости при изгибе σ_{-1} , критерия остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ представлены в таблице 1.

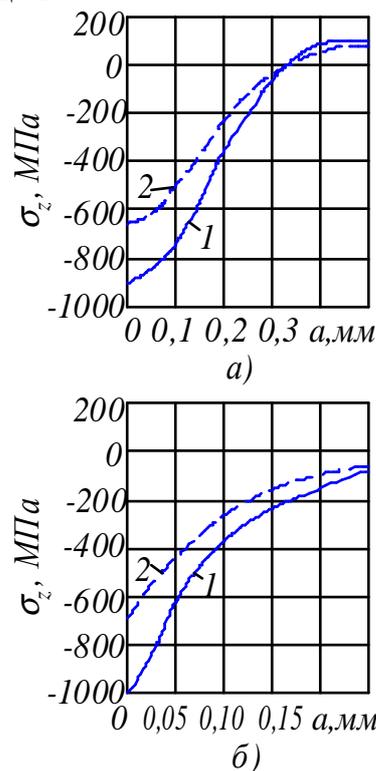


Рис.1. Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) из стали ЭИ961 после алмазного выглаживания:
1 – $T = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T = 400^\circ\text{C}$

Можно видеть, что коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, учитывающий влияние упрочнения через критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, для стали ЭИ961 и при температуре 400°С достаточно близок к значению

* Здесь и далее значения механических характеристик приведены при нормальной температуре.

$\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ [1]. Поэтому формулу (1) можно использовать для прогнозирования приращения предела выносливости упрочненных деталей при рабочих температурах, заложив в нее оставшиеся после воздействия температуры остаточные напряжения.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений в образцах из стали ЭИ961

Температура, град С	Неупрочненные образцы, σ_{-1} , МПа	Упрочненные образцы		
		σ_{-1} , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
20	230	380	-422	0,356
400	190	270	-242	0,331

Далее проводились эксперименты на образцах прямоугольного поперечного сечения из сплавов ЭИ698ВД ($\sigma_B = 1120$ МПа, $\sigma_{0,2} = 700$ МПа, $\delta = 4\%$, $\psi = 6\%$) и ЖС6У ($\sigma_B = 1030$ МПа, $\sigma_{0,2} = 940$ МПа, $\delta = 4\%$, $\psi = 6\%$) с V – образными надрезами (рис. 2) двух радиусов $R = 0,5$ и $1,0$ мм, имитирующих елочный замок лопатки турбины ГТД. Размеры образцов представлены в таблице 2.

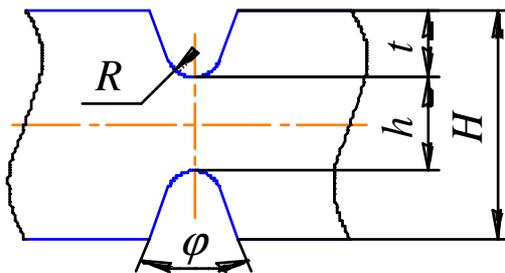


Рис.2. Область концентратора образца, имитирующего елочный замок лопатки турбины ГТД

Надрезы на образцы наносились вначале фрезерованием, а затем доводились до нужных размеров профильным шлифовальным кругом. Половина образцов после шлифования подвергалась ультразвуковому упрочнению (УЗУ) по вариантам режимов, приведенных в таблице 3, где $d_{ш}$ – диаметр шариков, τ – время упрочнения.

Таблица 2. Геометрические параметры образцов, имитирующих елочный замок лопатки турбины ГТД

R, мм	H, мм	h, мм	t, мм	ϕ , град
0,5	4,74 – 5,74	2,0 – 3,0	1,37	$55^{30'}$
1,0	6,10 – 7,10	2,0 – 3,0	2,05	$55^{30'}$

Для определения меридиональных остаточных напряжений σ_ϕ (осевых σ_z – в наименьшем сечении) использовались образцы с пятью идентичными надрезами, отстоящими друг от друга на расстоянии 12 мм, а для испытаний на усталость – с одним надрезом. Исследовались остаточные напряжения как непосредственно после УЗУ, так и после термоэкспозиции при температуре 700°C в течение 1000 часов. Эпюры остаточных напряжений приведены на рис. 3 – 5, где номера кривых соответствуют вариантам упрочнения таблицы 3.

Таблица 3. Режимы ультразвукового упрочнения

Материал	R, мм	Варианты упрочнения	Режимы УЗУ	
			$d_{ш}$, мм	τ , с
ЭИ698ВД	0,5	1	1,0	60
		2	0,68	40
	1,0	3	1,3	60
		4	1,0	60
ЖС6У	0,5	5	0,68	80
	1,0	6	0,68	60
		7	0,68	30

После шлифования на поверхности дна надреза возникают сжимающие остаточные напряжения до 360 МПа, переходящие на глубине 0,015 – 0,04 мм в растягивающие. Термоэкспозиция не привела к существенному изменению характера распределения остаточных напряжений после шлифования, но в образцах из сплава ЭИ698ВД с $R = 0,5$ мм (рис.3, б) растягивающие напряжения появились на поверхности надреза.

Ультразвуковое упрочнение образцов привело к созданию в области впадин надрезов значительных сжимающих остаточ-

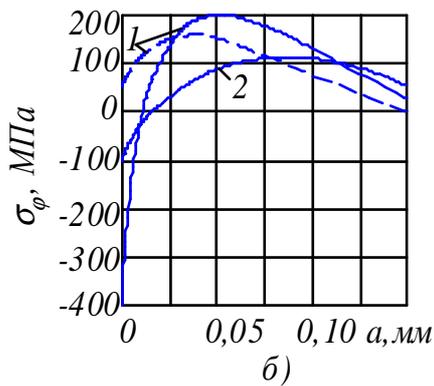
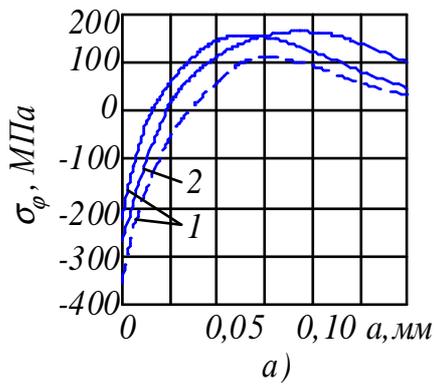


Рис.3. Остаточные напряжения в образцах с надрезом после шлифования (а) и последующей термоэкспозиции (б): 1 – ЭИ698ВД; 2 – ЖС6У;

— — — — — $R = 1,0$ мм; — — — — — $R = 0,5$ мм

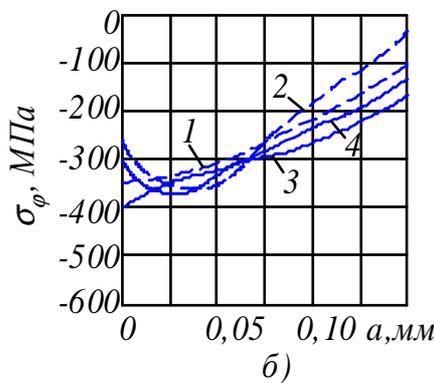
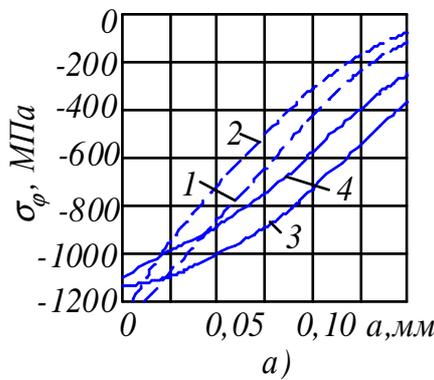


Рис.4. Остаточные напряжения в образцах из сплава ЭИ698ВД с надрезом после УЗУ (а) и последующей термоэкспозиции (б):

— — — — — $R = 1,0$ мм; — — — — — $R = 0,5$ мм

ных напряжений с глубиной залегания 0,15...0,2 мм, достигающих у поверхности концентратора 1200 МПа для сплава ЭИ698ВД (рис. 4,а) и 1300 МПа для сплава ЖС6У (рис. 5,а). В образцах с $R=0,5$ мм напряжения несколько выше, а глубина смены знака меньше, чем при $R=1,0$ мм, что объясняется большей концентрацией остаточных напряжений при $R=0,5$ мм. Одновременное увеличение диаметра упрочняющих шариков с 0,68 до 1,0 мм и времени обработки с 40 до 60 с не изменило максимальных значений остаточных напряжений в образцах из сплава ЭИ698ВД (рис. 4), но привело к созданию более полной эпюры.

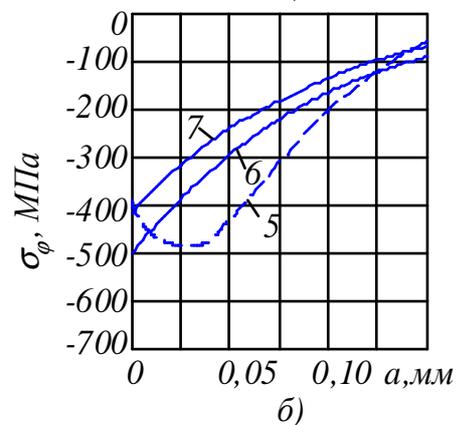
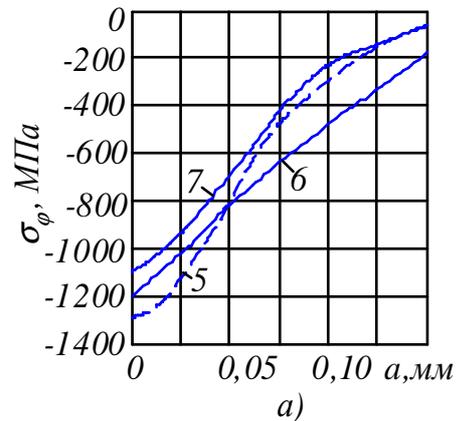


Рис.5. Остаточные напряжения в образцах из сплава ЖС6У с надрезом после УЗУ (а) и последующей термоэкспозиции (б):

— — — — — $R = 1,0$ мм; — — — — — $R = 0,5$ мм

Наибольшие остаточные напряжения возникают в образцах из сплава ЖС6У с радиусом надреза $R=0,5$ мм (рис. 5,а). Увеличение времени обработки образцов с $R=1,0$ мм из этого сплава с 30 до 60 с при неизменном диаметре упрочняющих шариков $d_{ш}=0,68$ мм приводит к повышению как максимальных остаточных напряжений на

поверхности концентратора, так и по толщине слоя.

Термоэкспозиция образцов с УЗУ привела к снижению сжимающих остаточных напряжений в 2,5-3 раза, причем в некоторых случаях наблюдается появление подслоного максимума, обусловленного, очевидно, бóльшим наклепом впадин надрезов шариками меньшего диаметра. В образцах из сплава ЖС6У максимум остаточных напряжений выше, чем в образцах из сплава ЭИ698ВД, однако эпюра менее полная. Наблюдавшиеся различия в остаточных напряжениях образцов, обработанных на различных режимах УЗУ, термоэкспозиция снивелировала. Исключение составляет лишь случай упрочнения образцов из сплава ЖС6У по режиму 7 (рис. 5,б), при котором остаточные напряжения заметно меньше, чем в случае упрочнения по режиму 6. Поэтому следует рекомендовать для сплава ЖС6У режим 6 как более предпочтительный.

Испытания на усталость образцов с единичными V-образными надрезами с $R=0,5$ и $1,0$ мм были проведены при температуре 700°C . Испытания осуществлялись при растяжении в случае асимметричного цикла с средним напряжением 450 МПа для образцов из сплава ЭИ698ВД и 350 МПа – ЖС6У. Значения предельной амплитуды цикла σ_{aR} , критерия остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{OCT}$ и коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ представлены в таблице 4.

Из данных таблицы 4 следует, что среднее значение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ составляет $0,074$. Это значение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ незначительно отличается от $\bar{\psi}_{\sigma}=0,071$,

Таблица 4. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений в образцах из сплавов ЭИ698ВД и ЖС6У

Материал	R, мм	Вариант упрочнения	Неупрочненные образцы σ_{aR} , МПа	Упрочненные образцы		
				σ_{aR} , МПа	$\bar{\sigma}_{OCT}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
ЭИ698ВД	0,5	1	168	192	-315	0,076
		2		193	-330	0,076
ЭИ698ВД	1,0	3	195	220	-340	0,074
		4		218	-320	0,072
ЖС6У	1,0	6	159	184	-335	0,075
		7		177	-250	0,072

вычисленного по методике работы [2]. Таким образом, проведенные опыты показали, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений может быть применен и в случае работы детали при повышенной температуре, но при этом следует использовать остаточные напряжения детали в конце ее ресурса, которые можно определить путем термоэкспозиции.

Список литературы

1. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Вакулук В.С. и др. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости упрочненной детали. Всеукраинский научно – технический журнал. 2001. - №5 (21). – с. 16 – 20.
2. Павлов В.Ф., Кирпичев В.Ф., Минин Б.В. и др. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости при асимметричном цикле в случае растяжения – сжатия. // Известия вузов. Машиностроение. – 1989. - №9. – с.6 – 10.

USE OF CRITERION AVERAGE RESIDUAL STRESSES FOR FORECASTING A LIMIT OF ENDURANCE OF DETAILS AT THE INCREASED TEMPERATURE

© 2006 V.A. Kirpichev

Samara State Aerospace University

The opportunity of use of criterion average residual stresses for forecasting a limit of endurance of the strengthened details with concentrators is shown at the increased temperature.