

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ С УЧЁТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

© 2018

- В. Ф. Павлов** доктор технических наук, заведующий кафедрой сопротивления материалов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sopromat@ssau.ru
- В. А. Кирпичёв** доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sopromat@ssau.ru
- П. Е. Киселев** аспирант кафедры сопротивления материалов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; dogg199191@mail.ru
- А. А. Швецова** аспирантка кафедры технологий производства двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; lcr_063@mail.ru

Одним из основных параметров, используемых в расчётах на прочность поверхностно упрочнённых деталей, является предел выносливости по разрушению, при прогнозировании которого наряду с упрочнением следует учитывать влияние различных эксплуатационных фактов. Прогнозирование предела выносливости в условиях концентрации напряжений осуществляется по критерию, учитывающему влияние остаточных напряжений на поверхности опасного сечения упрочнённой детали, и критерию среднеинтегральных остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. Исследовано влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости с учётом таких эксплуатационных факторов, как тип деформации, рабочая температура, асимметрия цикла нагружения образцов, изготовленных из сталей и алюминиевых сплавов. Испытания на усталость цилиндрических образцов с круговыми надрезами полукруглого профиля проведены при кручении, изгибе и растяжении-сжатии. Установлено, что использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений достаточно хорошо отражает влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости по разрушению с учётом изученных эксплуатационных факторов.

Упрочнённая деталь; прогнозирование предела выносливости; эксплуатационные факторы; критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

Цитирование: Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Киселев П.Е., Швецова А.А. Прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей с учётом эксплуатационных факторов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 144-153.

DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-144-153

В современном машиностроении при проектировании детали в неё закладывается общетехнический (назначенный) ресурс, который она должна отработать без разрушений и отказов.

Одним из определяющих параметров ресурса является предел выносливости $P_R(\sigma_R, \tau_R)$ поверхностно упрочнённой детали.

Зависимость для определения предела выносливости в общем виде записывается как

$$P_R = P_R^0 - \psi_P \cdot \sigma_{ост}, \quad (1)$$

где $P_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$ – предел выносливости неупрочнённой детали; $\psi_P(\psi_\sigma, \psi_\tau)$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по остаточным напряжениям на поверхности; $\sigma_{ост}$ – осевые (меридиональные) остаточные напряжения в наименьшем сечении детали [1]. Другие компоненты остаточного напряжённого состояния в соответствии с третьей теорией предельных напряжённых состояний не учитываются, так как радиальные напряжения на поверхности концентратора $\sigma_\rho = 0$, а окружные σ_θ являются промежуточными главными напряжениями [2].

Для прогнозирования предела выносливости P_R поверхностно упрочнённых деталей существует два критерия: критерий, учитывающий влияние остаточных напряжений на поверхности упрочнённой детали, и критерий среднеинтегральных остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя. При использовании каждого из критериев изменяется только вычитаемое в формуле (1), которое является приращением ΔP_R предела выносливости.

Целью работы является исследование возможности прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей в условиях концентрации по распределению остаточных напряжений поверхностного слоя с учётом таких эксплуатационных факторов, как тип деформации, рабочая температура, асимметрия цикла нагружения.

Первый критерий $\sigma_z^{нов}$ учитывает лишь распределение остаточных напряжений на поверхности упрочнённых изделий. Однако на практике при обработке деталей механическими способами, в том числе и поверхностным пластическим деформированием, наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений с распределением до нуля к поверхности. Этот спад часто является весьма существенным, иногда остаточные напряжения даже становятся растягивающими [3]. При этом всё же наблюдается повышение предела выносливости.

Доказательством вышесказанного является приведённая на рис. 1 фотография излома упрочнённого дробью образца из сплава В93 диаметром 10 мм с надрезом полукруглого профиля радиуса $\rho_0 = 0,3$ мм, прошедшего базу испытаний $10 \cdot 10^6$ циклов нагружения и разрушенного затем при статическом растяжении. На фотографии чётко различимы границы нераспространяющейся трещины усталости 2.

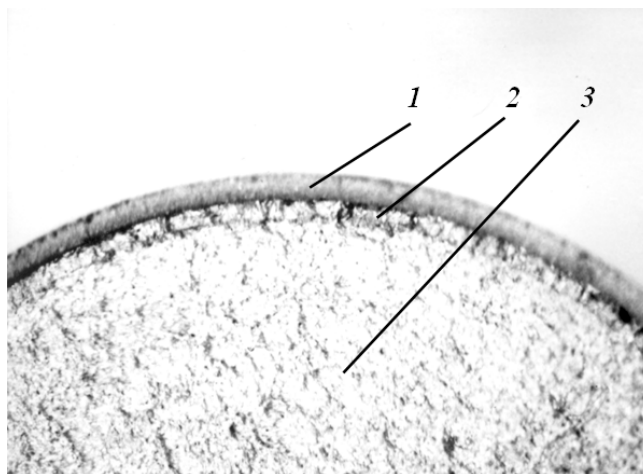


Рис. 1. Фрагмент излома образца диаметром 10 мм с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм из сплава В93: 1 – надрез; 2 – нераспространяющаяся трещина; 3 – зона статического долома

Из рис. 1 следует, что по мере развития трещины сжимающие остаточные напряжения к её дну растут и достигают подповерхностного максимума, останавливая тем самым рост трещины. В связи с этой особенностью сопротивления усталости за искомым критерий логично взять остаточные напряжения по всей толщине упрочнённого поверхностного слоя, включающие в себя и дополнительные остаточные напряжения, возникающие за счёт перераспределения остаточных усилий детали в результате образования трещины.

Поэтому критерий $\sigma_z^{ног}$ является достоверным лишь при прогнозировании сопротивления усталости деталей с поверхностными дефектами, то есть при определении предела выносливости по трещинообразованию, и не применим при прогнозировании предела выносливости по разрушению, что часто встречается в машиностроении. В работе [3] также было установлено, что использование критерия $\sigma_z^{ног}$ не является целесообразным из-за большого рассеивания соответствующего коэффициента влияния ψ_p .

Второй критерий $\bar{\sigma}_{осм}$ получен в работе [4] при использовании решения задачи [5] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении детали после нанесения надреза полуэллиптического профиля на упрочнённую поверхность в виде:

$$\bar{\sigma}_{осм} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (2)$$

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$ (рис. 2); $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости.

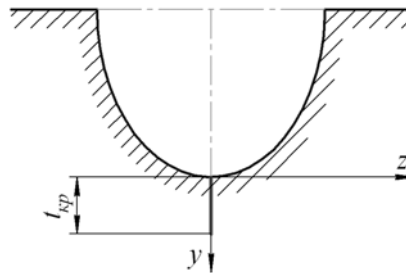


Рис. 2. Нераспространяющаяся трещина усталости

Как следует из (2), данный критерий учитывает влияние остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя, что делает возможным его использование именно там, где происходит разрушение – на дне трещины.

Для прогнозирования предела выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений необходимо знать две величины: критическую глубину нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ и коэффициент $\bar{\psi}_p$ ($\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau$) влияния поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{осм}$.

Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости в случае изгиба и растяжения-сжатия, полученный экспериментальным путём, в общем виде описывается следующим выражением [6]:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \quad (3)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Значение $t_{кр}$ определяется только размерами опасного поперечного сечения детали и вычисляется по формуле [7]:

$$t_{кр} = 0,0216 D, \quad (4)$$

где D – диаметр поперечного сечения детали.

Рассмотрим влияние некоторых эксплуатационных факторов на работу детали в течение всего жизненного цикла.

Тип деформации. В работе [7] было показано, что при $\alpha_\sigma = 2,5 - 3$ в случае изгиба коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ можно принять равным $\bar{\psi}_\sigma \cong 0,36$. Для большой группы авиационных деталей (валы, рессоры, торсионы) характерной деформацией является переменное кручение. Для исследования влияния остаточных напряжений на предел выносливости при кручении были изготовлены образцы из сталей 30ХГСА, ЭИ961 и алюминиевого сплава В95 [8]. На упрочнённые и неупрочнённые образцы диаметром $D = 12$ мм из стали ЭИ961 и сплава В95 безнаклёпным способом наносились надрезы полукруглого профиля с радиусом $\rho_0 = 0,3$ мм, из стали 30ХГСА – с $\rho_0 = 0,35$ мм. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя после гидродробеструйной обработки (ГДО) в гладких образцах и в образцах с надрезом приведено на рис. 3.

Необходимо отметить, что при кручении вид нераспространяющейся трещины усталости кардинально отличается от вида при изгибе. Характер трещины прерывистый и её размеры при обходе по контуру излома имеют значительные отклонения от средней глубины $t_{кр}$, однако среднее значение $t_{кр}$ соответствует зависимости (4).

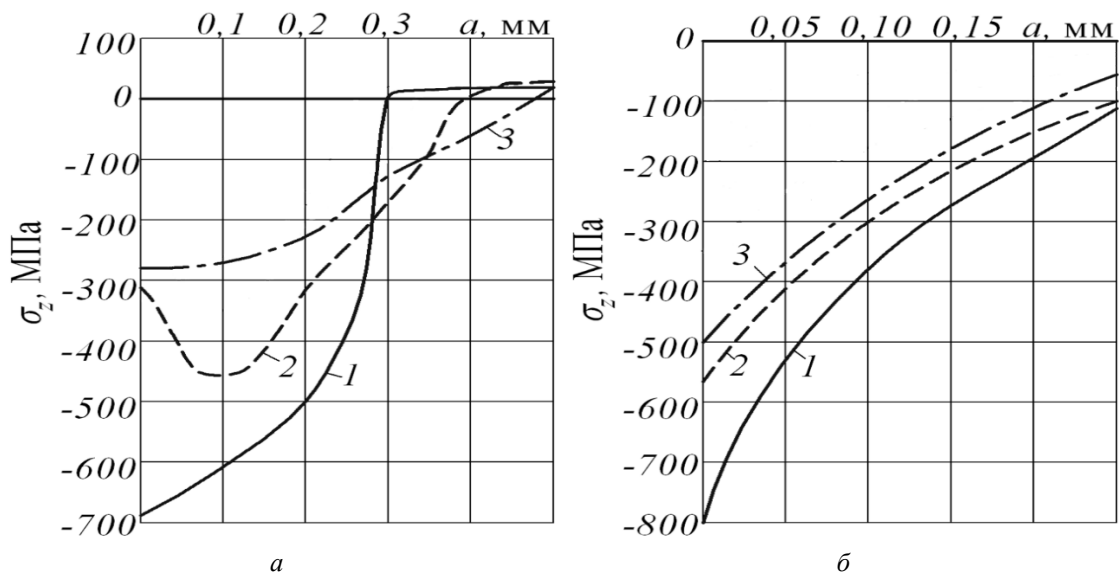


Рис. 3. Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) после ГДО: 1 – ЭИ961; 2 – 30ХГСА; 3 – В95

Результаты определения предела выносливости при кручении τ_{-1} представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость и определение остаточных напряжений при кручении

Материал	Размеры образцов и концентраторов			Неупрочнённые образцы	Упрочнённые образцы			
	D_1 , мм	D , мм	ρ_0 , мм		τ_{-1} , МПа	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\tau$
30ХГСА	12	11,3	0,35	180,7	222,5	0,235	-233	0,179
ЭИ961	12	11,4	0,30	244	300	0,240	-293	0,191
В95	12	11,4	0,30	37,5	72,5	0,250	-193	0,180

Из табл. 1 видно, что коэффициент $\bar{\psi}_\tau$ влияния упрочнения на предел выносливости при кручении имеет небольшой разброс и составляет в среднем 0,181, что вдвое меньше значения аналогичного коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ при изгибе и растяжении-сжатии.

Так же, как и при изгибе, коэффициент $\bar{\psi}_\tau$ не зависит от степени неравномерного наклёпа на дне концентратора. При изменении остаточных напряжений на поверхности надреза образцов из стали 30ХГСА от -222 до -584 МПа коэффициент $\bar{\psi}_\tau$ также не изменяется. Следовательно, выводы о закономерностях влияния сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе справедливы и для кручения с той лишь разницей, что коэффициент $\bar{\psi}_\tau$ в два раза меньше, чем коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$.

Также было рассмотрено влияние остаточных напряжений на предел выносливости при растяжении-сжатии, для чего изготавливались образцы диаметром 10 мм из тех же материалов, что и при кручении, половина из них подвергалась ГДО. Затем на упрочнённые и неупрочнённые образцы наносились надрезы полукруглого профиля радиусом $\rho_0 = 0,3$ мм. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя, а также результаты испытаний на усталость представлены на рис. 4 и в табл. 2.

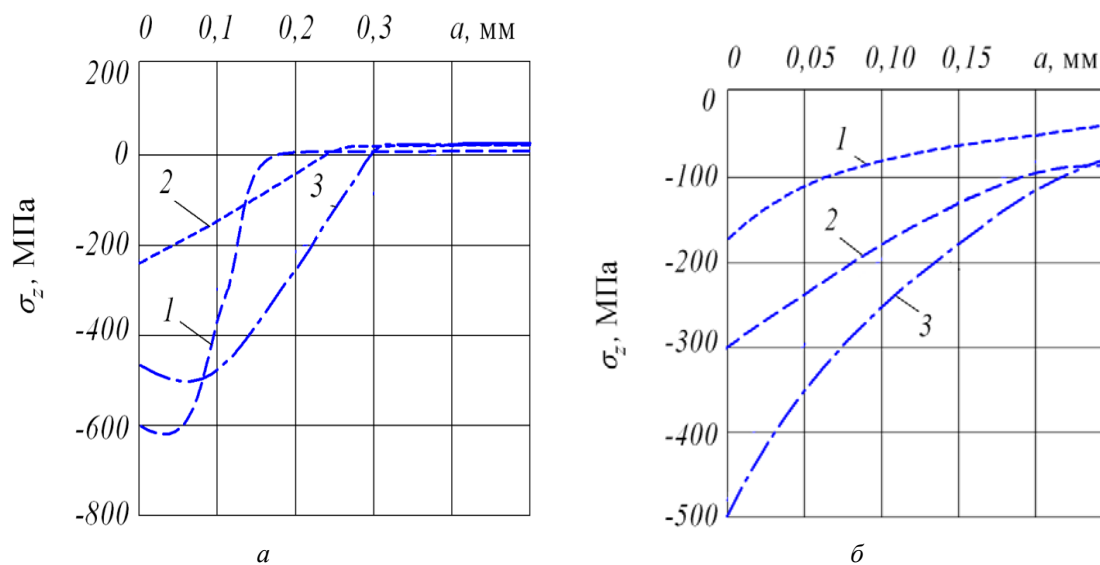


Рис. 4. Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (б) после ГДО: 1 – Д16Т; 2 – 30ХГСА; 3 – ЭИ961

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений при растяжении-сжатии

Материал	Неупрочнённые образцы σ_{-1p} , МПа	Упрочнённые образцы					
		σ_{-1p} , МПа	$\sigma_z^{нов}$ МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
30ХГСА	146	198	-300	0,173	0,200	-144	0,361
ЭИ961	151,3	233,4	-500	0,164	0,198	-258	0,357
Д16Т	78,4	105	-160	0,166	0,200	-75,3	0,353

Из данных табл. 2 видно, что прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ для образцов с одинаковой степенью концентрации напряжений приводит к таким же результатам, как и при изгибе, что подтверждается примерным равенством коэффициентов влияния поверхностного упрочнения $\bar{\psi}_\sigma$ по данному критерию.

Рабочая температура. Значительное количество деталей в газотурбинных двигателях работают в условиях высоких температур. Для учёта влияния рабочей температуры на предел выносливости деталей были проведены испытания на усталость образцов диаметром 7,5 мм после алмазного выглаживания из стали ЭИ961 и диаметром 10 мм из алюминиевого сплава В95 после упрочнения дробью. Далее стальные образцы выдерживались в печи в течение 100 часов при температуре 400°C, алюминиевые – при температуре 125°C. На упрочнённые и неупрочнённые образцы наносились надрезы полукруглого профиля с $\rho_0 = 0,3$ мм. Затем определялись остаточные напряжения и проводились испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла. Результаты испытаний и определения остаточных напряжений приведены на рис. 5, 6 и в табл. 3.

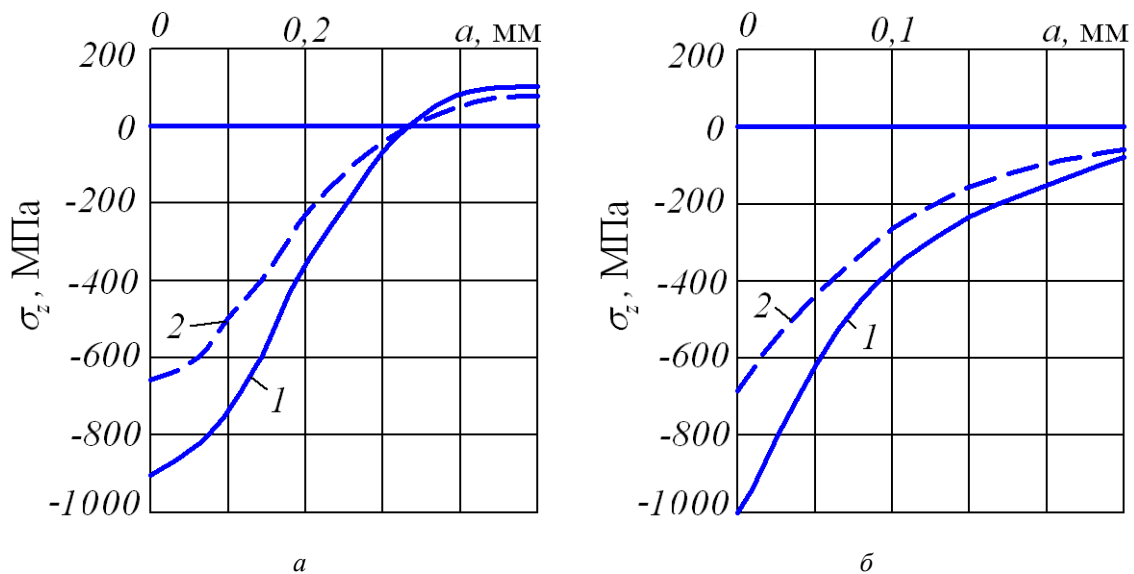


Рис. 5. Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) из стали ЭИ961 после упрочнения: 1 – $T = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T = 400^\circ\text{C}$

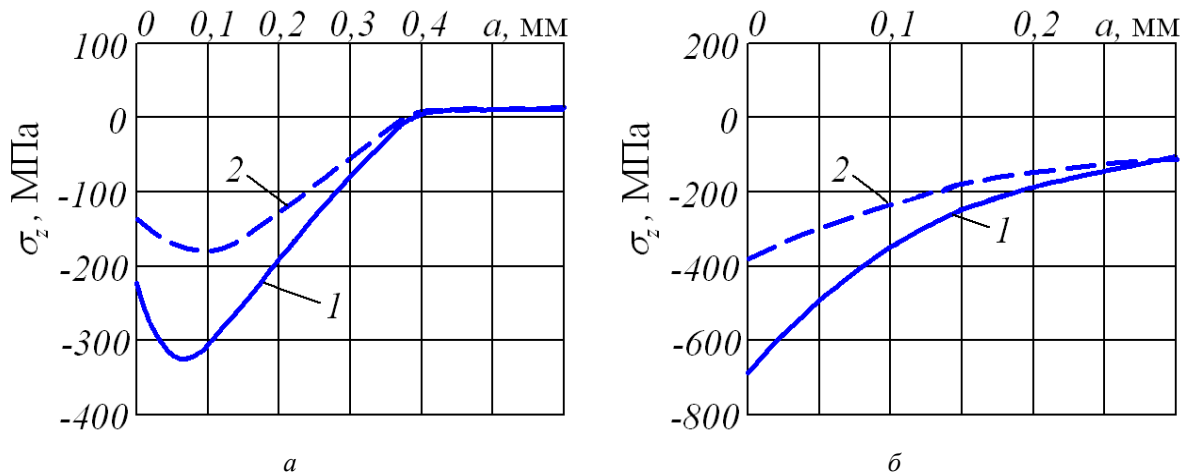


Рис. 6. Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) из сплава В95 после упрочнения: 1 – $T = 20^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = 125^{\circ}\text{C}$

Таблица 3. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений при изгибе

Материал	Температура, °C	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы			
			σ_{-1} , МПа	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
ЭИ961	20	230	380	0,160	-422	0,356
	400	190	270	0,160	-242	0,331
В95	20	105	200	0,310	-249	0,382
	125	105	155	0,310	-141	0,355

Из данных табл. 3 видно, что после термоэкспозиции остаточные напряжения релаксируют. Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$, учитывающий влияние поверхностного упрочнения через критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, как для стальных, так и для алюминиевых образцов достаточно близок к значению $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$.

Асимметрия цикла нагружения. Многие детали в машиностроении работают в условиях несимметричного цикла нагружения. В связи с этим возникает вопрос о применимости критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ для прогнозирования предела выносливости изделий, работающих в таких условиях.

Для выяснения влияния данного фактора на коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ были проведены испытания образцов из стали 45, как упрочнённых, так и неупрочнённых, при растяжении-сжатии со средним напряжением цикла σ_m . Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

σ_m , МПа	Неупрочнённые образцы σ_{Ra} , МПа	Упрочнённые образцы			
		σ_{Ra} , МПа	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
0	152,5	200	0,206	-134	0,355
50	137,5	-	-	-	-
100	135	180	0,205	-134	0,336
200	132,5	155	0,207	-134	0,167

Из данных табл. 4 видно, что с увеличением средних напряжений предельная амплитуда цикла σ_{Ra} уменьшается, как для упрочнённых, так и для неупрочнённых образцов. Также уменьшается и коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, равный 0,36 только при нулевом среднем напряжении цикла. Данные результаты говорят о невозможности напрямую применить критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ в случае асимметрии цикла нагружения. Однако если использовать диаграмму Ганна предельных амплитуд напряжений, то имеется формула для коэффициента влияния $\bar{\psi}_\sigma^{(m)}$ через сопротивление разрыву материала S_k [7]:

$$\psi_\sigma^{(m)} = \bar{\psi}_\sigma - \frac{\sigma_{-1p} (\sigma_m - \sigma_m^T)}{S_k \bar{\sigma}_{ост}}, \quad (5)$$

где σ_m^T – среднее напряжение, при котором в концентраторе без остаточных напряжений появляются первые пластические деформации; S_k – сопротивление разрыву. Формула (5) справедлива при $\sigma_m > \sigma_m^T$, а если $\sigma_m \leq \sigma_m^T$, то коэффициент $\bar{\psi}_\sigma^{(m)} = \bar{\psi}_\sigma$. Используя данную зависимость, можно вычислить предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений, что говорит о его применимости при несимметрично действующих напряжениях.

Таким образом, по результатам проведённых исследований влияния различных эксплуатационных факторов, действующих на детали на протяжении всего их жизненного цикла в пределах назначенного ресурса, можно утверждать, что прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей следует проводить по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений.

Библиографический список

1. Павлов В.Ф., Вакулюк В.С., Чирков А.В., Сазанов В.П. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей в условиях концентрации напряжений // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15, № 4 (44). С. 111-115.
2. Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость ненаклёпанного материала // В кн.: «Вопросы прикладной механики в авиационной технике». Вып. 66. Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1973. С. 70-75.
3. Школьник Л.М., Девяткин В.П. Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом // Вестник машиностроения. 1950. № 12. С. 13-15.
4. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29-32.
5. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // В кн.: «Вопросы прочности элементов авиационных конструкций». Вып. 1. Куйбышев: КуАИ, 1974. С. 88-95.
6. Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Филатов А.П., Чирков А.В. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15, № 4 (44). С. 81-85.
7. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. 125 с.

8. Павлов В.Ф., Прохоров А.А. Связь остаточных напряжений и предела выносливости при кручении в условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. 1991. № 5. С. 43-46.

PREDICTION OF ENDURANCE LIMIT OF HARDENED PARTS WITH ACCOUNT OF OPERATIONAL FACTORS

© 2018

V. F. Pavlov Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Strength of Materials; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; sopromat@ssau.ru

V. A. Kirpichev Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Strength of Materials; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; sopromat@ssau.ru

P. E. Kiselev Postgraduate Student of the Department of Strength of Materials; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; dogg199191@mail.ru

A. A. Shvetsova Postgraduate Student of the Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; lcr_063@mail.ru

Fracture endurance limit is one of the main parameters used in calculating the strength of surface hardened parts. The influence of various operational factors along with hardening should be taken into account in predicting this parameter. Prediction of the endurance limit under stress concentration was carried out according to the criterion that takes into account the influence of residual stresses on the surface of the dangerous section of a hardened part, as well as the criterion of the average integral residual stresses over the thickness of the hardened surface layer equal to the critical depth of a non-propagating fatigue crack. The effect of surface hardening on the endurance limit was analyzed taking into account such operational factors as the type of deformation, working temperature, the asymmetry of the loading cycle of specimens made of steels and aluminum alloys. Fatigue tests of cylindrical specimens with circular notches of a semicircular profile were carried out under torsion, bending and tension-and-compression. It was established that the use of the criterion of the average integral residual stresses is quite a good indicator of the effect of surface hardening on the fracture endurance limit taking into account the operational factors studied.

Hardened part; endurance limit prediction; operational factors; criterion of average integral residual stresses.

Citation: Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Kiselev P.E., Shvetsova A.A. Prediction of endurance limit of hardened parts with account of operational factors. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 2. P. 144-153. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-144-153

References

1. Pavlov V.F., Vakuljuk V.S., Chirkov A.V., Sazanov V.P. Prediction of the endurance limit of superficially strengthened details in the conditions of stress concentration. *Vestnik UGATU*. 2011. V. 15, no. 4 (44). P. 111-115. (In Russ.)
2. Ivanov S.I., Pavlov V.F. Vliyaniye ostatochnykh napryazheniy na vynoslivost' ne-naklepannogo materiala. *V kn.: «Voprosy prikladnoy mekhaniki v aviatsionnoy tekhnike»*. Vyp. 66. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1973. P. 70-75. (In Russ.)
3. Shkolnik L.M., Devyatkin V.P. Increasing the strength of gears with shot-blasting. *Vestnik Mashinostroeniya*. 1950. No. 12. P. 13-15. (In Russ.)

4. Pavlov V.F. On connection between residual stresses and the endurance limit under bending in stresses concentration conditions. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1986. No. 8. P. 29-32. (In Russ.)

5. Ivanov S.I., Shatunov M.P., Pavlov V.F. Vliyaniye ostatochnykh napryazheniy na vynoslivost' obraztsov s nadrezom. *V kn.: «Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruksiy»*. Vyp.1. Kuybyshev: Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1974. P. 88-95. (In Russ.)

6. Kirpichyov V.A., Bukatyi A.S., Filatov A.P., Chirkov A.V. Prediction of the endurance limit of superficially strengthened details at various degree of stress concentration. *Vestnik UGATU*. 2011. V. 15, no. 4 (44). P. 81-85. (In Russ.)

7. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakulyuk V.S. *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam* [Prediction of fatigue strength of surface hardened components by residual stresses]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2012. 125 p.

8. Pavlov V.F., Prokhorov A.A. Correlation of residual stresses and fatigue limit with torsion under conditions of stress concentration Report 1. Substantiation of strength and longevity criteria. *Strength of Materials*. 1991. V. 23, Iss. 5. P. 536-540. DOI: 10.1007/BF00771452