

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей по остаточным напряжениям*

В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичев, В. С. Вакулюк, В. П. Сазанов, А. С. Букатый

Самарский государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева (Национальный исследовательский университет), Самара, Россия

На примере образцов из стали 20 различного диаметра экспериментально установлено, что в условиях концентрации напряжений для прогнозирования влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, образцы, прогнозирование предела выносливости, концентрация напряжений, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

После поверхностного пластического деформирования (ППД) в поверхностном слое деталей изменяется структура, возникают наклеп и сжимающие остаточные напряжения. Известно [1], что основную роль в повышении сопротивления усталости упрочненных деталей с концентраторами играют сжимающие остаточные напряжения. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости таких деталей оценивается по двум критериям. Первый, который используется в работах [1–4], предполагает наличие остаточных напряжений на поверхности концентратора. Зависимость для определения предела выносливости имеет вид

$$P_R = P_R^0 - \psi_P \sigma_z^{\text{пов}}, \quad (1)$$

где $P_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$ – предел выносливости неупрочненной детали; $\psi_P(\psi_\sigma, \psi_\tau)$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости; $\sigma_z^{\text{пов}}$ – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора в опасном сечении детали. Другие компоненты остаточного напряженного состояния в соответствии с третьей теорией предельных напряженных состояний во внимание не принимаются, так как радиальные напряжения на поверхности концентратора $\sigma_\rho = 0$, а окружные σ_θ являются промежуточными главными напряжениями [5].

Обычно зависимость (1) записывается для приращения предела выносливости в виде

$$\Delta P_R = \psi_P \left| \sigma_z^{\text{пов}} \right|. \quad (2)$$

На практике при упрочнении деталей ППД часто наблюдается максимум сжимающих напряжений в подповерхностных слоях, т.е. к поверхности деталей напряжения уменьшаются. Этот спад бывает весьма существен, иногда остаточные напряжения снижаются на поверхности до нуля и даже становятся растягивающими [6]. Однако увеличение предела выносливости наблюдается и в этих случаях. Так, например, в [7] определялись остаточные напряжения и сопротивление усталости азотированных и упрочненных роликом стальных цилиндрических образцов. После нагре-

* Доклад на Международной научно-технической конференции “Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций” (Киев, 2013).

ва и выдержки этих образцов при температуре 150 и 200°C имело место снижение сжимающих остаточных напряжений на поверхности и их увеличение на некотором расстоянии от нее, в результате чего повышается предел выносливости.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что критерий оценки влияния поверхностного упрочнения деталей с концентраторами по остаточным напряжениям должен базироваться на учете остаточных напряжений не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали.

При достаточно больших переменных напряжениях, близких к пределу выносливости, в упрочненных деталях с концентраторами всегда возникают нераспространяющиеся усталостные трещины [3, 8, 9]. В связи с этой особенностью сопротивления усталости в [10] было предложено принять за критерий величину остаточных напряжений на дне нераспространяющейся трещины, в качестве которых рассматриваются дополнительные остаточные напряжения, возникающие в результате перераспределения остаточных усилий упрочненной детали при образовании трещины. При этом исходные остаточные напряжения детали на дне трещины не учитываются ввиду их малости по сравнению с дополнительными.

Для установления второго критерия в [10] использовалось решение задачи [11] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочненной детали после нанесения на нее надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [11], был получен второй критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочненной детали в виде

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (3)$$

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. 1); $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали (образца) на пределе выносливости.

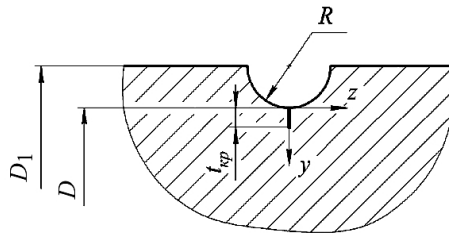


Рис. 1. Нераспространяющаяся трещина усталости.

Критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ имеет четко выраженный физический смысл – это остаточное напряжение на дне трещины с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и ее глубины. Приращение предела выносливости ΔP_R ($\Delta \sigma_R$, $\Delta \tau_R$) упрочненной детали с концентратором напряжений при использовании критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ определяется по следующей формуле:

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_P |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (4)$$

где $\bar{\psi}_P$ ($\bar{\psi}_\sigma$, $\bar{\psi}_\tau$) – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ на предел выносливости по разрушению. В дальнейшем критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ будем называть критерием среднеинтегральных остаточных напряжений.

В работе [12] для упрочненных разными методами ППД деталей (образцов) из различных материалов с разными концентраторами напряжений при растяжении–сжатии, изгибе и кручении было экспериментально установлено, что критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости зависит только от размеров опасного поперечного сечения, и для цилиндрической детали определяется соотношением

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (5)$$

где D – диаметр опасного сечения детали (рис. 1).

Для проверки возможности использования обоих критериев при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла были проведены эксперименты на сплошных цилиндрических упрочненных и неупрочненных образцах различного диаметра из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля. Механические характеристики исследуемой стали 20 следующие: $\sigma_T = 395$ МПа; $\sigma_B = 522$ МПа; $\delta = 26,1\%$; $\psi = 65,9\%$; $S_k = 1416$ МПа.

Гладкие образцы с наружным диаметром $D_1 = 10$ и 25 мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) и обкатке роликом (ОР) при усилиях $P = 0,5$ кН (ОР1) и $1,0$ кН (ОР2), гладкие образцы диаметром $D_1 = 50$ мм – обкатке роликом при усилиях $P = 0,5$ кН (ОР1) и $1,0$ кН (ОР2). Затем на все упрочненные и неупрочненные гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм.

Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах диаметром $D_1 = 10$ мм определялись экспериментально методом колец и полосок [13], а также методом удаления части цилиндрической поверхности [14], в образцах диаметром $D_1 = 25$ и 50 мм – методом колец и полосок [13].

Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких образцов представлено на рис. 2. Видно, что сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания при одной и той же упрочняющей обработке с увеличением диаметра образца возрастают. Эта закономерность объясняется повышением жесткости образцов с ростом размеров их поперечного сечения. Аналогичные закономерности в распределении остаточных напряжений после гидродробеструйной обработки образцов из стали 45 и сплава Д16Т были установлены в работе [12] при изменении диаметра образцов D_1 от 10 до 50 мм.

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчетным путем – суммированием дополнительных остаточных напряжений в результате перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений в гладких образцах. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим [11], так и численным методом. Необходимо заметить, что было получено хорошее совпадение результатов определения дополнительных остаточных напряжений двумя методами.

Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в наименьшем сечении образцов с надрезами $R = 0,3$ мм приведено на рис. 3. Значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов $\sigma_z^{пов}$ представлены в таблице.

Обращает на себя внимание значительная величина сжимающих остаточных напряжений, достигающих на дне надреза – 1004 МПа ($D_1 = 50$ мм), что существенно выше не только предела текучести, но и предела прочности исследуемой стали 20. В работе [15] показано, что остаточные напряжения в упрочненном (наклепанном) слое могут превышать сопротивление разрыву S_k материала детали (образца) на 15% . В данном случае этот предел не превышен, так как $S_k = 1416$ МПа.

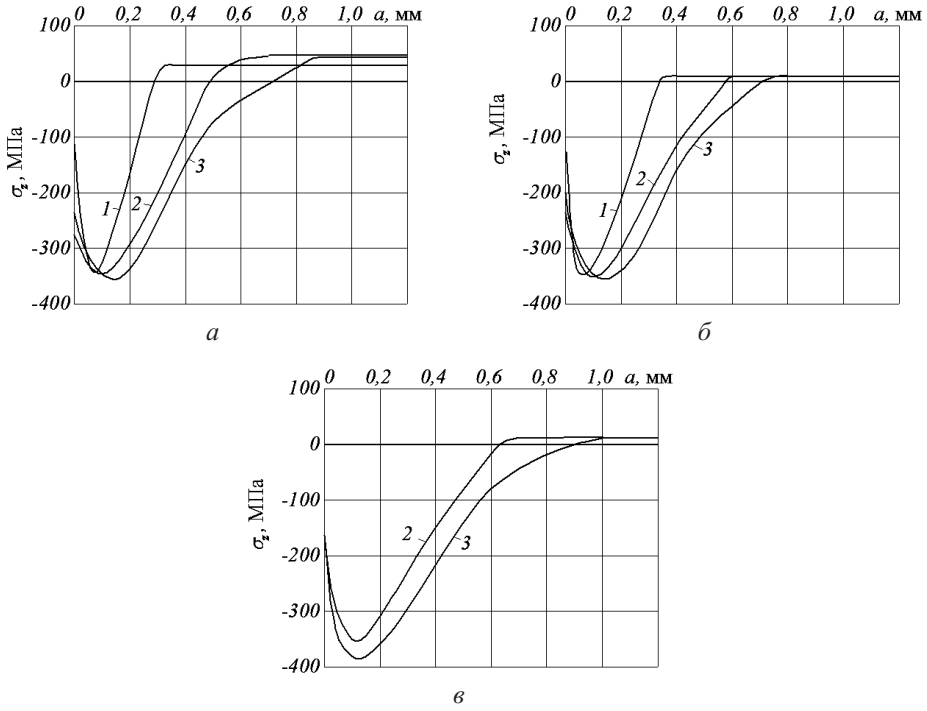


Рис. 2. Остаточные напряжения σ_z в упрочненных гладких образцах диаметром 10 (а), 25 (б) и 50 мм (в) после ПДО (1), ОР1 (2) и ОР2 (3).

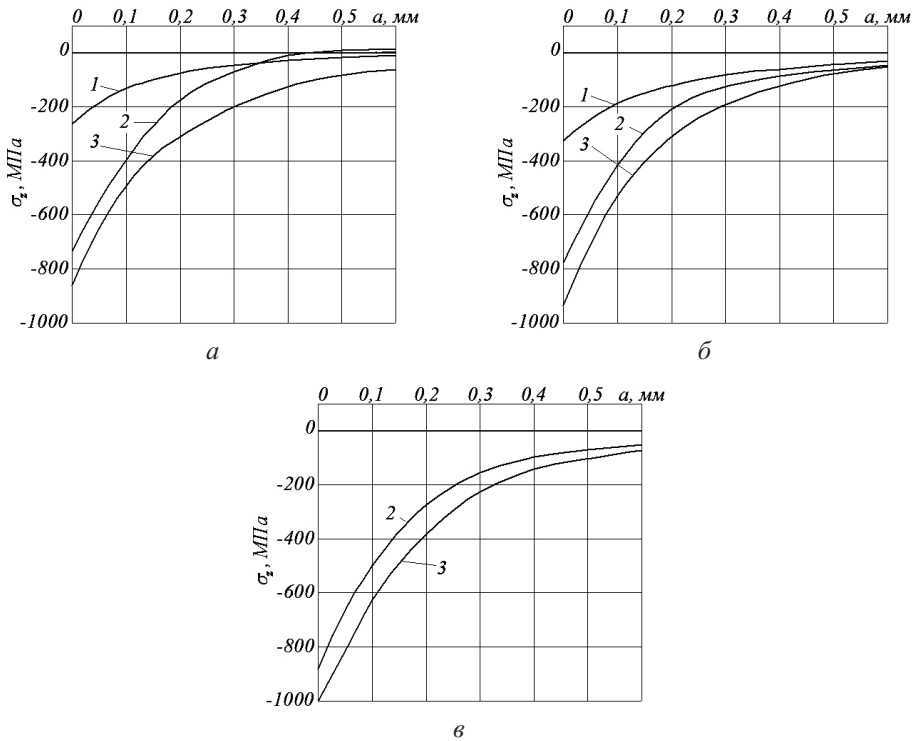


Рис. 3. Остаточные напряжения σ_z в упрочненных образцах диаметром 10 (а), 25 (б) и 50 мм (в) с надрезами $R = 0,3$ мм после ПДО (1), ОР1 (2) и ОР2 (3).

Результаты испытаний образцов на усталость и определения остаточных напряжений

D, мм	Неупрочненные образцы, σ_{-1} , МПа	Упрочненные образцы						
		Обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{\text{пов}}$, МПа	ψ_σ	$t_{\text{кр}}$, мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
10	110	ПДО	155,0	-263	0,171	0,203	-126	0,357
		ОР1	230,0	-732	0,164	0,195	-337	0,356
		ОР2	267,5	-861	0,183	0,205	-454	0,347
25	120	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345
		ОР1	165,0	-787	0,073	0,510	-171	0,336
		ОР2	175,0	-908	0,074	0,520	-202	0,334
50	87,5	ОР1	117,5	-898	0,033	1,04	-94	0,322
		ОР2	130,0	-1004	0,042	1,11	-128	0,332

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочненных и упрочненных образцов диаметром $D_1 = 10$ мм в гладкой части проводились на машине МУИ-6000, диаметром $D_1 = 25$ мм – на машине УММ-01, диаметром $D_1 = 50$ мм – на машине УМП-02 [16], база испытаний составляет $3 \cdot 10^6$ цикл нагружения.

Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в таблице. Упрочненные образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, глубина $t_{\text{кр}}$ которых соответствует зависимости (5) (таблица).

Из данных, приведенных в таблице, видно, что ППД образцов с надрезом ПДО и ОР приводит к существенному повышению предела выносливости. Наиболее эффективна для исследованных образцов ОР, причем с увеличением усилия обкатки с $P = 0,5$ до $1,0$ кН предел выносливости возрастает. Наблюдаемое явление объясняется большей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочненных образцах при увеличении усилия обкатки (рис. 2), в результате чего повысились остаточные напряжения в наименьшем сечении образцов с надрезом.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию $\sigma_z^{\text{пов}}$ (остаточным напряжениям на поверхности надреза) приводит к значительному рассеянию коэффициента ψ_σ . Этот коэффициент изменяется в широких пределах: $0,033 \dots 0,183$ (таблица), т.е. изменяется в 5,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ (среднеинтегральным остаточным напряжениям) приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$, который изменяется от $0,332$ до $0,357$, составляя в среднем $0,341$, и незначительно отличается от значения $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленного в [12] для упрочненных образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Таким образом, при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочненных образцов с концентраторами напряжений наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$. Для определения приращения предела выносливости таких образцов при изгибе следует исполь-

зовать формулу (4). Критерий $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ при этом вычисляется по зависимости (3) по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине $t_{\text{кр}}$ нераспространяющейся трещины усталости и определяемой по формуле (5). Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ для упрочненных деталей и образцов с надрезами можно принять равным 0,36.

Выводы

1. Проведенное исследование показывает, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочненных цилиндрических образцов различного диаметра (10...50 мм) с надрезами наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$.

2. Для прогнозирования предела выносливости упрочненных образцов с надрезами использование в качестве критерия остаточных напряжений на поверхности концентратора $\sigma_z^{\text{пов}}$ не представляется возможным, так как соответствующий коэффициент, учитывающий влияние этого критерия на предел выносливости, имеет существенное рассеяние.

3. Для исследованной стали 20 экспериментально подтверждена установленная ранее зависимость (5) критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{\text{кр}}$ от размеров опасного поперечного сечения образца (детали).

Работа выполнена в рамках государственного задания высшим учебным заведениям в части проведения научно-исследовательских работ (проект 1.312.2011).

Резюме

На прикладі зразків зі сталі 20, що мають різний діаметр, експериментально встановлено, що в умовах концентрації напружень для прогнозування впливу поверхневого зміцнення на границю витривалості найбільш виправдано використання критерію середньоінтегральних залишкових напружень.

1. *Иванов С. И., Павлов В. Ф.* Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность // Пробл. прочности. – 1976. – № 5. – С. 25 – 27.
2. *Кравченко Б. А., Митряев К. Ф.* Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев: Куйбыш. кн. изд-во, 1968. – 131 с.
3. *Серенсен С. В., Борисов С. П., Бородин Н. А.* К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочненных образцов с учетом кинетики остаточной напряженности // Пробл. прочности. – 1969. – № 2. – С. 3 – 7.
4. *Туровский М. Л., Шифрин Н. М.* Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали // Вестн. машиностроения. – 1970. – № 11. – С. 37 – 40.
5. *Иванов С. И., Павлов В. Ф.* Влияние остаточных напряжений на выносливость ненаклепанного материала // Вопр. прикл. механики в авиационной технике. – 1973. – Вып. 66. – С. 70 – 73.
6. *Школьник Л. М., Девяткин В. П.* Повышение прочности шестерен дробеструйным наклепом // Вестн. машиностроения. – 1950. – № 12. – С. 7 – 12.
7. *Туровский М. Л., Новик Р. А.* Упрочняющая обкатка роликами азотированных стальных деталей // Там же. – 1970. – № 1. – С. 39 – 42.
8. *Кудрявцев П. И.* Нераспространяющиеся усталостные трещины. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.

9. *Серенсен С. В., Козаев В. П., Шнейдерович Р. М.* Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
10. *Павлов В. Ф.* О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Изв. вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29 – 32.
11. *Иванов С. И., Шатунов М. П., Павлов В. Ф.* Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопр. прочности элементов авиационных конструкций. – 1974. – Вып. 1. – С. 88 – 95.
12. *Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Иванов В. Б.* Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений. – Самара: СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
13. *Иванов С. И.* К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – 1971. – Вып. 48. – С. 179 – 183.
14. *Иванов С. И., Григорьева И. В.* К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности // Вопр. прочности элементов авиационных конструкций. – 1971. – Вып. 48. – С. 179 – 183.
15. *Радченко В. П., Павлов В. Ф.* Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей // Тр. междунар. науч.-техн. конф. “Прочность материалов и элементов конструкций”. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 354 – 357.
16. *Филатов Э. Я., Павловский В. Э.* Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. – Киев: Наук. думка, 1985. – 92 с.

Поступила 14. 11. 2013