

ВЛИЯНИЕ ОБКАТКИ РОЛИКОМ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ОБРАЗЦОВ С НАПРЕССОВАННОЙ ВТУЛКОЙ¹

В.Ф. Павлов, В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов, С.А. Михалкина

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

E-mail: sopromat@ssau.ru

Экспериментально исследовано влияние обкатки роликом на предел выносливости при изгибе образцов диаметром 25 мм из сталей 20 и 40Х с напрессованной втулкой. Установлено, что обкатка роликом существенно повышает предел выносливости, особенно образцов из стали 40Х. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критериям остаточных напряжений на поверхности и среднеинтегральных остаточных напряжений показала, что для прогнозирования приращения предела выносливости упрочненных образцов с напрессованной втулкой можно рекомендовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

Ключевые слова: обкатка роликом, напрессованная втулка, предел выносливости, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

В исследовании изучалось влияние сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости поверхностно упрочненных цилиндрических образцов диаметром 25 мм из сталей 20 и 40Х с напрессованной втулкой. Механические характеристики используемых для образцов материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики материалов

Материал	σ_a , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
Сталь 20	522	395	26,1	65,9	1416
40Х	751	444	17,6	60,7	1330

Влияние поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости образцов при изгибе $\Delta\sigma_{-1}$ в случае симметричного цикла оценивалось по двум критериям. Во-первых, по критерию осевых остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхности образцов, использованному в работах [1-6]:

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_{\sigma} \left| \sigma_z^{нов} \right|, \quad (1)$$

где ψ_{σ} – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливо-

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/13944).

Валентин Федорович Павлов (д.т.н., профессор), заведующий кафедрой «Сопротивление материалов».

Владимир Степанович Вакулюк (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Сопротивление материалов».

Светлана Алексеевна Михалкина, старший преподаватель кафедры «Сопротивление материалов».

сти по критерию $\sigma_z^{нов}$.

Во-вторых, оценка производилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [7, 8]:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_\sigma |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (2)$$

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

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

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали (образца) с концентратором по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности детали (образца) до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочненном образце с концентратором при работе на пределе выносливости.

Сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое образцов создавались обкаткой роликом (ОР) диаметром 60 мм с профильным радиусом 1,6 мм при усилии $P = 0,5$ кН и $P = 1,0$ кН. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a определялось экспериментально методом колец и полосок [9] (рис. 1). Из данных рис. 1 видно, что при обкатке роликом на одних и тех же режимах ($P = 1,0$ кН) характер распределения сжимающих остаточных напряжений в образцах из стали 40Х существенно отличается от характера распределения остаточных напряжений в образцах из стали 20. Сжимающие остаточные напряжения в образцах из стали 40Х (эпюра 3) значительно выше как по величине, так и по глубине залегания, чем в образцах из стали 20 (эпюра 2), то есть распределение остаточных напряжений в образцах из стали 40Х является более полным. Это различие в характере распределения остаточных напряжений, как будет показано ниже, существенно сказывается на сопротивлении усталости упрочненных обкаткой роликом образцов из сталей 20 и 40Х.

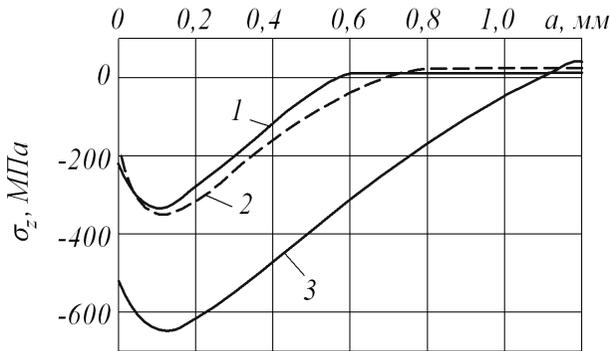


Рис. 1. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочненных обкаткой роликом образцах из стали 20 (1, 2) и стали 40Х (3) при $P = 0,5$ кН (1) и $P = 1,0$ кН (2, 3)

Следует обратить внимание также на значительную величину наибольших сжимающих остаточных напряжений в образцах из стали 40Х, составляющих -620 МПа и превышающих предел текучести материала (см. табл. 1). Этому факту дано объяснение в работе [10], в которой показано, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое деталей может превышать даже сопротивление разрыву S_k материала детали на 15 %. Из данных табл. 1 и рис. 1 видно, что этот предел в исследуемом случае не достигнут.

Испытания образцов с напрессованной втулкой на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине УММ-01 [11], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Значения пределов выносливости образцов σ_{-1} представлены в табл. 2. Можно видеть, что приращение предела выносливости упрочненных роликом при $P = 1,0$ кН образцов из стали 40Х почти в два раза выше, чем из стали 20, что объясняется бóльшей величиной сжимающих остаточных напряжений и более полным их распределением по толщине поверхностного слоя [8, 12].

На примере образцов из стали 20, обкатанных роликом при $P = 0,5$ кН и $P = 1,0$ кН, можно проанализировать влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя на предел выносливости. При практически одинаковых осевых остаточных напряжениях на поверхности образцов ($\sigma_z^{ног} = -220$ МПа и $\sigma_z^{ног} = -210$ МПа) и наибольших напряжениях ($\sigma_z^{наиб} = -350$ МПа и $\sigma_z^{наиб} = -360$ МПа) бóльшая глубина залегания сжимающих остаточных напряжений при $P = 1,0$ кН ($a = 0,70$ мм), чем при $P = 0,5$ кН ($a = 0,52$ мм), приводит к бóльшему увеличению предела выносливости. Приращение предела выносливости поверхностно упрочненных образцов при $P = 0,5$ кН составляет 50 МПа, а при $P = 1,0$ кН – 70 МПа, то есть на 40 % выше. Этот результат указывает на то, что распределение сжимающих остаточных напряжений в поверхностно упрочненных деталях должно быть наиболее полным по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости.

Для определения критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости выстоявшие базу испытаний упрочненные роликом образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при бóльшем напряжении. На изломах этих образцов просматривались нераспространяющиеся усталостные трещины, средняя глубина которых приведена в табл. 2. На рис. 2 в качестве примера представлена фотография излома образца из стали 20, упрочненного обкаткой роликом при $P = 1,0$ кН. На фотографии видна нераспространяющаяся трещина l , имеющая серповидную форму. Серповидная форма трещины обусловлена тем, что изгиб образцов при испытаниях на усталость осуществлялся в одной плоскости. За критическую глубину трещины $t_{кр}$ в этом случае принимается наибольшая глубина, то есть глубина трещины в наиболее удаленной от нейтральной оси точке опасного сечения образца.

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ вычислялся по формуле (3) с использованием распределения остаточных напряжений, приведенного на рис. 1, по толщине поверхностного слоя образцов, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. Значения $\bar{\sigma}_{ост}$ приведены в табл. 2. Коэффициенты влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ определялись по формулам (1) и (2) и также представлены в табл. 2.

**Результаты определения остаточных напряжений
и испытаний на усталость образцов с напрессованной втулкой**

Материал	K_σ	Неупрочненные образцы σ_{-1} , МПа	Упрочненные образцы						
			Обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
Сталь 20	2,33	100	ОР, $P=0,5$ кН	150	-220	0,227	0,535	-148	0,338
	2,33		ОР, $P=1,0$ кН	170	-210	0,333	0,540	-201	0,348
40X	3,95	162,5	ОР, $P=1,0$ кН	285	-520	0,235	0,523	-484	0,253

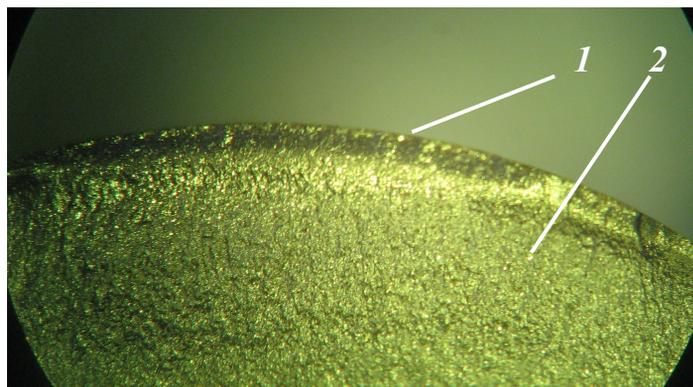


Рис. 2. Фрагмент излома упрочненного обкаткой роликом при $P = 1,0$ кН образца из стали 20:
1 – нераспространяющаяся трещина усталости; 2 – зона долома

Сравнивая значения коэффициента ψ_σ , учитывающего влияние поверхностного упрочнения по критерию $\sigma_z^{нов}$, для образцов из стали 20, можно видеть, что величина этого коэффициента для двух вариантов упрочнения различается на 47 %, то есть весьма существенно. Такое различие коэффициента ψ_σ не позволяет с достаточной для практики точностью использовать критерий осевых остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхности опасного сечения для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости детали.

Анализируя значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$, учитывающего влияние поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$, можно видеть, что для упрочненных роликом образцов из стали 40X этот коэффициент меньше, чем для образцов из стали 20. Это различие объясняется большей чувствительностью стали 40X к концентрации напряжений по сравнению со сталью 20, что подробно исследовано в работе [13].

В табл. 2 приведены значения эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ , определенного для вала с напрессованной втулкой по данным работы [14]. Видно, что для образцов из стали 40X коэффициент K_σ в 1,7 раза больше, чем для образцов из стали 20. В работе [13] на основании многочисленных эксперимен-

тов была установлена зависимость между коэффициентом влияния $\bar{\psi}_\sigma$ и эффективным коэффициентом концентрации напряжений K_σ в виде

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,514 - 0,065K_\sigma. \quad (4)$$

Значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$, вычисленные по зависимости (4), составили: для случая образцов из стали 20 – 0,362, для случая образцов из стали 40X – 0,257, то есть коэффициенты $\bar{\psi}_\sigma$, полученные в настоящем исследовании (см. табл. 2), незначительно отличаются от вычисленных по формуле (4) величин. Следовательно, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ может быть использован для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных валов с напрессованной втулкой.

Выводы

1. На предел выносливости поверхностно упрочненных образцов и деталей существенное влияние оказывает не только величина, но и характер распределения сжимающих остаточных напряжений в их опасном сечении по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости.

2. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию остаточных напряжений σ_z^{nos} на поверхности образцов с напрессованной втулкой приводит к существенному различию коэффициента ψ_σ , что затрудняет использование критерия σ_z^{nos} на практике.

3. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ с учетом эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ дает приемлемые для практики результаты – коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ изменяется в существенно меньших пределах, чем коэффициент ψ_σ . Поэтому критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ представляется возможным использовать для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных валов с напрессованной втулкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свешников Д.А., Кудрявцев И.В., Гуляева Н.А. Сопротивление усталости цементированных и цианированных сталей применительно к зубчатым колесам. – М.: ВНИИТМАШ, ОНТИ, 1966. – С. 48-55.
2. Кравченко Б.А., Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 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 // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.
4. Туровский М.Л., Шифрин Н.М. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали // Вестник машиностроения. – 1970. – №11. – С. 37-40.
5. Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.
6. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Прохоров А.А. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. – 1988. – №5. – С. 31-33.

7. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
8. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
9. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
10. Радченко В.П., Павлов В.Ф. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. – С. 354-357.
11. Филатов Э.Я., Павловский В.Э. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. – Киев: Наукова думка, 1985. – 92 с.
12. 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. 22-25.
13. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
14. Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. – С. 678-685.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2012 г.

THE INFLUENCE OF ROLLER STRENGTHENING ON THE ENDURANCE LIMIT OF SAMPLES WITH A PRESSURIZED HUB

V.F.Pavlov, V.S. Vakulyuk, V.P. Sazanov, S.A. Mikhalkina

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086

The roller strengthening influence on the endurance limit during bending of 25 mm diameter samples of steels 20 and 40X with pressurized hub is experimentally researched. It has been found that roller strengthening increases the endurance limit considerably, especially of 40X steel samples. The estimate of surface strengthening influence on the endurance limit by means of the residual stress criterion on the surface, and average residual stresses has shown that to forecast increasing the endurance limit of strengthened samples with a pressurized hub can be recommended to use the average residual criterion.

Keywords: *roller strengthening, pressurized hub, endurance limit, average residual criterion.*

*Valentin F. Pavlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vladimir S. Vakulyuk (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Vyacheslav P. Sazanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Svetlana A. Mikhalkina, Senior Lecture.*