

ВЛИЯНИЕ ОБКАТКИ РОЛИКОМ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ОБРАЗЦОВ С НАДРЕЗОМ РАЗЛИЧНОЙ ГЛУБИНЫ И НАПРЕССОВАННОЙ ВТУЛКОЙ

В.Ф. Павлов,
В.П. Сазанов,
В.С. Вакулюк,
Д.В. Туманов
И.В. Богданова

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва

Московское шоссе, 34,
г. Самара, Российская Федерация,
443086

pavlov.vf@ssau.ru

Изучалось влияние обкатки роликом на распределение остаточных напряжений и многоцикловую усталость сплошных цилиндрических образцов диаметром 50 мм из стали 20 с надрезами различной глубины и напрессованной втулкой. Установлено, что с увеличением глубины надреза величина сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении образцов с надрезом уменьшается, что приводит к снижению предела выносливости обкатанных роликом образцов. Для сохранения эффекта упрочнения с увеличением глубины надреза необходимо увеличивать толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов проводилась по двум критериям: осевым остаточным напряжениям на поверхности концентратора и среднеинтегральным остаточным напряжениям, вычисленным по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. Установлено, что для оценки влияния обкатки роликом на предел выносливости образцов с надрезами различной глубины и напрессованной втулкой наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений.

Ключевые слова: обкатка роликом; остаточные напряжения; предел выносливости; критерий среднеинтегральных остаточных напряжений

1 Введение

После обработки различными методами поверхностного пластического деформирования (ППД) в тонком поверхностном слое деталей изменяется структура, возникает наклёп и наводятся сжимающие остаточные напряжения. В работе [1] было установлено, что основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых ППД деталей с концентраторами напряжений играют сжимающие остаточные напряжения. Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей используются два критерия: осевые остаточные напряжения $\sigma_z^{нов}$ на поверхности опасного сечения детали и среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{осм}$ [2]. Приращение предела выносливости

$\Delta\sigma_{-1}$ упрочнённой ППД детали при изгибе в случае симметричного цикла определяется по следующим формулам:

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

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

где ψ_{σ} – коэффициент влияния ППД на предел выносливости по критерию $\sigma_z^{нов}$; $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния ППД на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{осм}$;

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

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали по глубине поверхностного слоя a , $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$, $t_{кр}$ – критическая глубина

нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочнённой ППД детали при работе на пределе выносливости.

В монографии [3] для упрочнённых различными методами ППД деталей и образцов из различных материалов с различными концентраторами напряжений при изгибе, растяжении-сжатии и кручении было экспериментально установлено, что критическая глубина

нераспространяющейся трещины усталости зависит только от размера опасного поперечного сечения и определяется для цилиндрических деталей и образцов по формуле

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (4)$$

где D – диаметр опасного сечения детали.

2 Цель исследования

Для проверки возможности использования обоих критериев при оценке влияния обкатки роликом на предел выносливости σ_{-1} при изгибе в случае симметричного цикла были проведены экспериментальные исследования на сплошных цилиндрических неупрочнённых и упрочнённых образцах диаметром 50 мм из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля различного радиуса и напрессованной втулкой. Используемая в исследовании сталь 20 имела следующие механические характеристики: $\sigma_T = 395$ МПа, $\sigma_s = 522$ МПа, $\delta = 26,1\%$, $\psi = 65,9\%$, $S_k = 1416$ МПа.

3 Результаты исследования

Половина гладких образцов диаметром $D=50$ мм подвергалась обкатке роликом диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилиях $P=0,5$ кН (ОР1) и $P=1,0$ кН (ОР2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Затем на неупрочнённые и упрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиусов

$R=0,3$ мм, $R=0,5$ мм и $R=1,0$ мм.

Распределение остаточных напряжений в гладких образцах определялось методом колец и полосок [4]. Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя а гладких образцов представлены на рисунке 1. Можно видеть, что с увеличением усилия обкатки сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания возрастают.

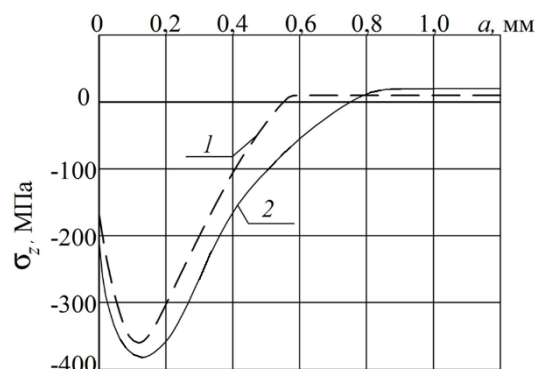


Рисунок 1. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах диаметром 50 мм после: 1 – ОР1; 2 – ОР2

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётным путём – суммированием дополнительных осевых остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и осевых остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим [5], так и численным методами. Необходимо отметить, что результаты расчёта дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение.

Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя а в наименьшем сечении образцов с надрезами $R=0,3$ мм и $R=0,5$ мм представлены на рисунке 2, а величины остаточных напряжений на поверхности дна надрезов $\sigma_z^{нов}$ приведены в таблице 1.

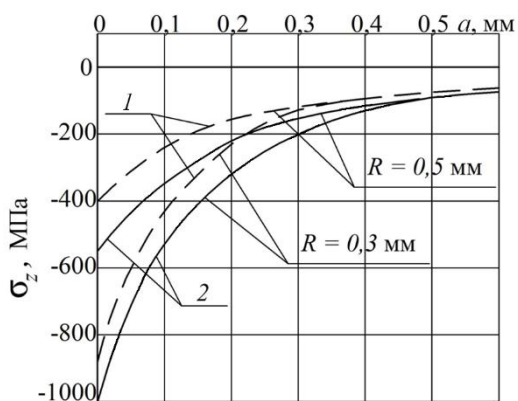


Рисунок 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых образцах диаметром 50 мм с надрезами $R=0,3$ мм и $R=0,5$ мм после: 1 – OP1; 2 – OP2

Следует обратить внимание на значительную величину сжимающих остаточных напряжений, достигающих -1004 МПа на дне надреза с радиусом $R=0,3$ мм, что значительно выше не только предела текучести σ_T , но и предела прочности σ_b исследуемой стали 20. В работе [6] было установлено, что остаточные

напряжения в упрочнённом (наклёпанном) слое могут превышать сопротивление разрыву S_k материала детали или образца на 15%. В настоящем исследовании этот предел не превышен, так как $S_k=1416$ МПа.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла упрочнённых и неупрочнённых образцов с надрезами и напрессованной втулкой проводились на машине УМП-02 [7]; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} образцов представлены в таблице 1. Упрочнённые роликом образцы, выстоявшие базу испытаний без разрушения при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были видны нераспространяющиеся трещины усталости, критическая глубина $t_{кр}$ которых соответствует формуле (4) и приведена в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов с надрезами и напрессованной втулкой на усталость и определения остаточных напряжений

Концентратор	Неупроч образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы							K_σ	$(\bar{\psi}_\sigma)_{расч}$
		обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$		
надрез $R = 0,3$ мм	87,5	OP1	117,5	-898	0,033	1,040	-94	0,322	2,86	0,328
		OP2	130	-1004	0,042	1,110	-128	0,332		
надрез $R = 0,5$ мм	92,5	OP1	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366	2,47	0,353
		OP2	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357		
надрез $R = 1,0$ мм	92,5	OP1	110	-126	0,139	1,073	-46	0,380	2,32	0,363
		OP2	115	-166	0,136	1,035	-62	0,363		
напрессованная втулка	87,5	OP1	107,5	-180	0,111	1,02	-64	0,313	2,97	0,321
		OP2	112,5	-170	0,147	1,14	-82	0,305		

Из приведённых в таблице 1 данных можно видеть, что поверхностное

пластическое деформирование обкаткой роликом образцов с надрезом и

напрессованной втулкой приводит к значительному повышению предела выносливости, причём с увеличением усилия обкатки с $P=0,5$ кН до $P=1,0$ кН предел выносливости возрастает. Это наблюдаемое явление объясняется бóльшей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых роликом образцах при повышении усилия обкатки (рисунок 1), результатом чего является увеличение остаточных напряжений в опасном сечении образцов. Для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением глубины надреза следует увеличивать толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями гладкой детали (заготовки).

При определении критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ по формуле (3) для образцов с надрезами использовались эпюры остаточных напряжений, представленные на рисунке 2, а для образцов с напрессованной втулкой – на рисунке 1. Значения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ приведены в таблице 1.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по критерию $\sigma_z^{нов}$ (формула (1)) – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к значительному рассеянию соответствующего коэффициента влияния ψ_σ . Этот коэффициент в настоящем исследовании изменяется в широких пределах: от 0,033 до 0,147 (таблица 1), то есть изменяется в 4,5 раза, что неприемлемо для оценки влияния ППД на предел выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ (формула (2)) – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в исследовании изменяется от 0,305 до 0,380, составляя в

среднем 0,342.

В монографии [3] на основании многочисленных экспериментальных исследований была установлена зависимость между коэффициентом влияния $\bar{\psi}_\sigma$ поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ и действительным (эффективным) коэффициентом концентрации напряжений K_σ в виде

$$(\bar{\psi}_\sigma)_{расч} = 0,514 - 0,065 K_\sigma. \quad (5)$$

В таблице 1 представлены значения действительного коэффициента K_σ , определённые по данным работы [8]. Расчётные значения коэффициента влияния $(\bar{\psi}_\sigma)_{расч}$ приведены также в таблице 1. Из приведённых данных следует, что опытные значения коэффициента влияния $\bar{\psi}_\sigma$ для каждого радиуса надреза и напрессованной втулки незначительно отличаются от расчётных величин, вычисленных по формуле (5).

4 Заключение

1. Проведённое исследование показало, что при оценке влияния обкатки роликом на предел выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с надрезами и напрессованной втулкой наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, вычисленных по формуле (3).

2. Для оценки влияния обкатки роликом на предел выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с надрезами и напрессованной втулкой использование в качестве критерия осевых остаточных напряжений на поверхности концентратора $\sigma_z^{нов}$ не представляется возможным, так как соответствующий коэффициент влияния ψ_σ , учитывающий влияние этого критерия на предел выносливости, имеет существенное рассеяние.

3. Для сохранения эффекта упрочнения роликом при увеличении глубины надреза в случае опережающего поверхностного пластического деформирования необходимо назначать такие режимы обкатки, которые приводят к увеличению глубины залегания сжимающих остаточных напряжений.

Список литературы

[1] Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность // Проблемы прочности. 1976. №5. С. 25-27.

[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.

[3] Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.

[4] Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения // Куйбышев: КуАИ. 1971. Вып. 48. С. 179-183.

[5] Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Межвузовский сборник. Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып. 3. С. 88-95.

[6] 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.

[7] Филатов Э.Я., Павловский В.Э. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. Киев: Наукова Думка, 1985. 92 с.

[8] Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.

AN INFLUENCE OF ROLLER STRENGTHENING ON MULTICYCLIC FATIGUE OF SPECIMENS WITH CUTS OF VARIOUS DEPTH AND A PRESSURIZED HUB

**Valentin F. Pavlov,
Vyacheslav P. Sazanov,
Vladimir S. Vakulyuk,
Dmitrij V. Tumanov
Irina V. Bogdanova**

Samara National Research University 34,
Moskovskoeshosse, Samara, 443086,
Russian Federation

pavlov.vf@ssau.ru

The influence of roller strengthening on a residual stresses distribution and multicyclic fatigue of solid cylindrical specimens of 50 mm diameter made of steel 20 with cuts of various depths and a pressurized hub has been examined. As a result, an endurance limit of roller strengthened specimens diminishes. In order to preserve the effect of hardening with a cut's depth increase, it's necessary to increase the thickness of a layer with compressive residual stresses. Surface hardening influence on an endurance limit of specimens has been estimated by two criteria: axial residual stresses on a concentrator's surface and average integral residual stresses, calculated through the dangerous section's surface layer thickness that equal a critical depth of a non-propagating fatigue crack. It's been stated that it's more reasonable to use the average integral residual stresses criterion for an evaluation of roller strengthening influence on an endurance limit of specimens with cuts of various depth and a pressurized hub.

Key words: roller strengthening; residual stresses; endurance limit; average integral residual stresses criterion

Reference

- [1] Ivanov, S.I., Pavlov, V.F., (1976) Vliyanie ostatochnyh napryazhenij na ustalostnuyu prochnost' [Residual stresses influence on fatigue strength]. Problemy prochnosti [Strength problems], no. 5, pp. 25-27. (in Russian).
- [2] Pavlov, V.F., (1986) O svyazi ostatochnyh napryazhenij i predela vynoslivosti pri izgibe v usloviyah koncentracii napryazhenij [On connection between residual stresses and endurance limit under bending in stresses concentration conditions]. Izvestiya vusov. Mashinostroeniye [Universities News. Mechanical Engineering], no. 8, pp. 29-32. (in Russian).
- [3] Pavlov, V.F., Kirpichev, V.A., Vakulyuk, V.S., (2012) Prognozirovaniye soprotivleniya ustalosti poverhnostno uprochnyonykh detalej po ostatochnym napryazheniyam [The prediction of surface hardened parts fatigue resistance by residual stresses]. Samara: Izdatel'stvo SNC RAN [Samara: Samara scientific centre Publishing House of the Russian Academy of Sciences], 125 pp. (in Russian).
- [4] Ivanov, S.I., (1971) K opredeleniyu ostatochnyh napryazhenij v cilindre metodom kolec i polosok. Ostatochnye napryazheniya [On determination of residual stresses in cylinder by rings-and-stripes method. Residual stresses]. Kuibyshev: KuAI [Kuibyshev Aviation Institute], issue 48, pp. 179-183. (in Russian).
- [5] Ivanov, S.I., Shatunov, M.P., Pavlov, V.F., (1974) Vliyanie ostatochnyh napryazhenij na vynoslivost' obrazcov s nadrezom [The influence of residual stresses on the endurance of notched specimens]. Voprosy prochnosti elementov aviacionnykh konstrukcij. Kujbyshev: KuAI [Problems of aircraft constructions elements strength. Kuibyshev Aviation Institute], issue 3, pp. 88-95. (in Russian).
- [6] Radchenko, V.P., Pavlov, V.F., (2011) Naibol'shaya velichina sjimayutschych ostatochnyh napryazhenij pri poverhnostnom uprochnenii detalej [The maximum of compressive residual stresses under surface hardening of parts]. Trudy MNTK «Prochnost' materialov i elementov konstrukcij». Kiev: IPP im.G.S. Pisarenko NANU [Proceedings of the International Scientific Technical Conference "Strength of materials and structural elements". Kiev: The G.S. Pisarenko Strength Problems Institute of the Ukraine Academy of Sciences], pp. 354-357. (in Russian).
- [7] Filatov, E.Ya., Pavlovsky, V.E., (1985) Universal'niy complex mashin dlya ispytaniya materialov i konstruktzij na ustalost' [Universal machine complex for fatigue tests of materials and structures]. Kiev: Naukova Dumka [Kiev: Scientific Thought], 92 pp. (in Russian).
- [8] Serensen, S.V., Kogayev, V.P., Shneyderovich, R.M., (1975) Nesutchaya sposobnost' i raschet detaley mashin na prochnost' [Carrying capacity and strength analysis of machine elements]. Moscow: Mashinostroyeniye (Mechanical Engineering), 488 pp. (in Russian).