

**В.Ф. Павлов,
В.С. Вакулюк,
В.П. Сазанов,
О.М. Пилипив,
К.Ф. Матвеева**

**ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ НАДРЕЗА НА
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ
ОБРАЗЦОВ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ
УПРОЧНЕНИИ**

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва

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

pavlov.vf@ssau.ru

В исследовании изучалось влияние глубины надреза на распределение остаточных напряжений и предел выносливости при изгибе цилиндрических образцов из стали 20 диаметром 50 мм с отверстием диаметром 40 мм после опережающего поверхностного пластического деформирования обкаткой роликом на двух режимах. Установлено, что с увеличением глубины надреза величина сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении образцов уменьшается и, как следствие, уменьшается приращение предела выносливости упрочнённых образцов с надрезом. Для сохранения эффекта упрочнения по повышению предела выносливости при опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением глубины надреза необходимо увеличивать толщину слоя гладкой детали со сжимающими остаточными напряжениями. Показано, что для оценки приращения предела выносливости упрочнённых образцов следует использовать не остаточные напряжения на дне надреза, а среднеинтегральные остаточные напряжения по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

Ключевые слова: *поверхностное упрочнение; глубина надреза; остаточные напряжения; предел выносливости; критерий среднеинтегральных остаточных напряжений*

1 Введение

При упрочнении деталей машин различными методами поверхностного пластического деформирования (ППД) в поверхностном слое изменяется структура материала, создаются наклёп и сжимающие остаточные напряжения. В работе [1] было установлено, что основную роль в повышении многоциклового усталости упрочнённых ППД деталей играют сжимающие остаточные напряжения. В настоящем исследовании рассматривается влияние глубины надреза на предел выносливости обкатанных роликом цилиндрических образцов из стали 20.

2 Цель исследования

В работе изучалось влияние глубины надреза полукруглого профиля при опережающем поверхностном пластическом деформировании (ОППД) на предел выносливости при изгибе цилиндрических образцов из стали 20 ($\sigma_s = 522$ МПа, $\sigma_T = 395$ МПа, $\delta = 26,1$ %, $\psi = 65,9$ %, $S_k = 1416$ МПа) диаметром 50 мм с отверстием диаметром 40 мм. Гладкие образцы подвергались обкатке роликом диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилиях 0,5 кН (ОР1) и 1,0 кН (ОР2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. На упрочнённые и неупрочнённые образцы фасонным резцом наносились круговые надрезы полукруглого

профиля трёх радиусов: $R = 0,3$ мм, $R = 0,5$ мм, $R = 1,0$ мм.

3 Результаты исследования

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [2]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по глубине а поверхностного слоя гладких образцов приведены на рисунке 1. Из данных рисунка 1 можно видеть, что при повышении усилия обкатки роликом с 0,5 кН до 1,0 кН толщина поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями увеличивается с 0,5 мм до 0,7 мм. Такое увеличение толщины слоя со сжимающими остаточными напряжениями приводит к повышению предела выносливости упрочнённых деталей.

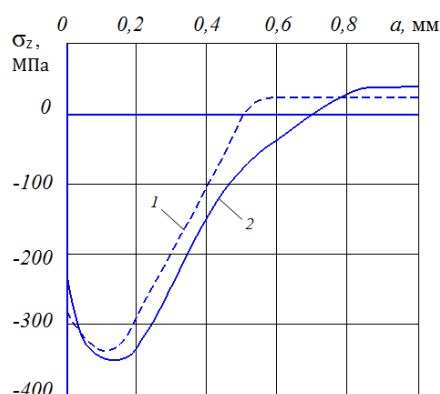


Рисунок 1. Осевые σ_z остаточные напряжения в гладких образцах диаметром 50 мм с отверстием диаметром 40 мм после обкатки роликом:
1 – ОР1, 2 – ОР2

Остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезами определялись как аналитическим методом – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт нанесения надреза и остаточных напряжений гладких образцов [3], так и численным методом с использованием программного комплекса Nastran/Patran. Следует отметить, что результаты расчёта остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение.

На рисунке 2 представлено распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах с надрезами по глубине поверхностного слоя а опасного сечения, а в таблице 1 – остаточные напряжения $\sigma_z^{нов}$ на поверхности надреза. Из приведённых на рисунке 2 и в таблице 1 данных видно, что с увеличением глубины надреза изменяется характер распределения остаточных напряжений – сжимающие остаточные напряжения в опасном сечении образцов уменьшаются.

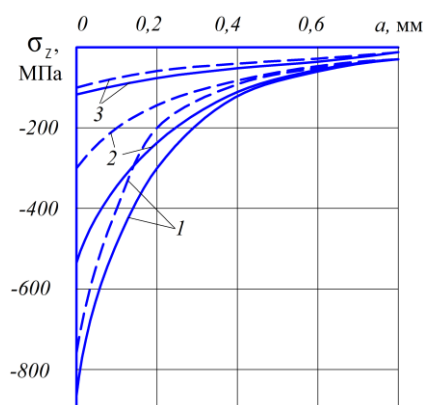


Рисунок 1. Осевые σ_z остаточные напряжения после ОР1 (---) и ОР2 (—) в образцах с надрезами:
1 – $R = 0,3$ мм; 2 – $R = 0,5$ мм; 3 – $R = 1,0$ мм

Необходимо обратить внимание на существенную величину сжимающих остаточных напряжений, достигающих на дне надреза при $R = 0,3$ мм -861 МПа, что значительно превышает не только предел текучести, но и предел прочности исследуемой стали 20. В работе [4] было доказано, что сжимающие остаточные напряжения в упрочнённом (наклёпанном) слое могут превышать даже сопротивление разрыву S_k материала детали на 15%. В исследуемом случае этот предел не достигнут, так как $S_k = 1416$ МПа.

Испытания на усталость при поперечном изгибе в случае симметричного цикла упрочнённых и неупрочнённых образцов с надрезами проводились на машине УМП-02 [5], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты испытаний на усталость по определению предела

выносливости σ_{-1} представлены в таблице 1. Из данных таблицы 1 видно, что с увеличением глубины надреза при одних и тех же режимах обкатки приращение предела выносливости упрочнённых образцов уменьшается. Эта закономерность объясняется изменением характера распределения остаточных напряжений, то есть уменьшением сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении образцов с увеличением глубины надрезов после ОППД.

Выстоявшие базу испытаний упрочнённые образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большем напряжении. На

изломах этих образцов были выявлены нераспространяющиеся трещины усталости, критическая глубина $t_{кр}$ которых для каждой партии образцов приведена в таблице 1. Необходимо отметить, что полученные в исследовании величины $t_{кр}$ соответствуют установленной в работе [6] зависимости (1) критической глубины нераспространяющейся трещины усталости от размеров опасного сечения детали в виде: $t_{кр} = 0,0216D[1 - 0,04(d/D)^2 - 0,54(d/D)^3]$ (1) где D – диаметр опасного сечения детали, d – диаметр отверстия в опасном сечении детали.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Надрез R , мм	Неупрочн. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
		упрочн. обр-ка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
0,3	55	ОР1	92,5	-747	0,050	0,73	-117	0,321
		ОР2	107,5	-861	0,061	0,73	-158	0,332
0,5	60	ОР1	87,5	-311	0,088	0,71	-82	0,335
		ОР2	105	-517	0,087	0,72	-133	0,338
1,0	57,5	ОР1	70	-87	0,144	0,69	-38	0,329
		ОР2	75	-114	0,154	0,68	-52	0,337

Оценка влияния упрочнения роликом на приращение предела выносливости образцов проводилась по двум критериям: остаточным напряжениям на поверхности надреза $\sigma_z^{нов}$ и среднеинтегральным остаточным напряжениям $\bar{\sigma}_{ост}$ [7], вычисленным по толщине опасного сечения образцов, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. Из представленных в таблице 1 данных видно, что коэффициент влияния упрочнения ψ_σ по критерию $\sigma_z^{нов}$ изменяется в три раза и поэтому не может быть использован при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей. Коэффициент влияния упрочнения $\bar{\psi}_\sigma$ по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ изменяется в настоящем исследовании

только в 1,1 раза, что позволяет использовать этот критерий на практике.

4 Заключение

1. В проведённом исследовании показано, что с увеличением глубины надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании уменьшаются сжимающие остаточные напряжения по толщине опасного сечения и предел выносливости образцов.

2. В исследовании установлено, что для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением глубины надреза следует увеличивать толщину слоя гладкой детали со сжимающими остаточными напряжениями.

3. Для оценки приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с надрезами наиболее целесообразно

использовать критерий среднеинтегральных 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] Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения // Куйбышев: КуАИ. 1971. Вып. 53. С. 32-42.

[3] 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.

[4] 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.

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

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

[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.

Valentin F. Pavlov,
Vladimir S. Vakulyuk,
Vyacheslav P. Sazanov,
Oleg M. Pilipiv,
Karina F. Matveeva

Samara University,
Moskovskoe shosse 34, Samara, 443086
pavlov.vf@ssau.ru

THE INFLUENCE OF CUT'S DEPTH ON RESIDUAL STRESSES DISTRIBUTION AND AN ENDURANCE LIMIT OF SPECIMENS UNDER SURFACE HARDENING

The influence of cut's depth on residual stresses distribution and an endurance limit under bending of hollow cylindrical specimens made of steel 20 with external diameter 50 mm and interior diameter 40 mm after outstripping superficial plastic deforming by roller strengthening of two regimes has been examined. It's been stated that the value of compressive residual stresses in a dangerous section of specimens decreases on cut's depth increase. As a result, an endurance limit increment of hardened specimens with cuts diminishes. In order to preserve the effect of hardening by increasing the endurance limit under outstripping superficial plastic deforming with an increase in a cut's depth, it is necessary to increase the thickness of a smooth part with compressive residual stresses layer. It's been shown that in order to estimate the increase in the endurance limit of hardened specimens, one should use not residual stresses at the bottom of a cut, but average integral residual stresses through the part's dangerous section surface layer thickness that equal a critical depth of a non-propagating fatigue crack.

Key words: surface hardening; cut's depth; residual stresses; endurance limit; average integral residual stresses criterion

Reference

- [1] Ivanov, S.I., Pavlov, V.F., (1976) Vliyanie ostatochnykh napryazhenij na ustalostnuyu prochnost' [Residual stresses influence on fatigue strength]. Problemy prochnosti [Strength problems], no. 5, pp. 25-27. (in Russian).
- [2] Ivanov, S.I., (1971) K opredeleniyu ostatochnykh 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 53, pp. 32-42. (in Russian).
- [3] Ivanov, S.I., Shatunov, M.P., Pavlov, V.F., (1974) Vliyanie ostatochnykh 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).
- [4] Radchenko, V.P., Pavlov, V.F., (2011) Naibol'shaya velichina sjimayutschych ostatochnykh 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 [Proceed-ings 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).
- [5] Filatov, E.Ya., Pavlovsky, V.E., (1985) Universal'nyy 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).
- [6] Pavlov, V.F., Kirpichev, V.A., Vakulyuk, V.S., (2012) Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverhnostno uprochnyonnykh 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).
- [7] Pavlov, V.F., (1986) O svyazi ostatochnykh 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).