УДК 621.787:539.319

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЁННОГО СЛОЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

© 2016 В.А. Кирпичёв, В.П. Сазанов, О.Ю. Семёнова, С.А. Михалкина

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

Статья поступила в редакцию 30.03.2016

Исследовалось влияние толщины упрочнённого поверхностного слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании на предел выносливости полых цилиндрических образцов из стали 20 диаметром 25 мм с отверстием диаметром 15 мм с круговыми надрезами полукруглого профиля трёх радиусов: R = 0,3 мм, R = 0,5 мм, R = 1,0 мм. Различная толщина упрочнённого поверхностного слоя создавалась пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом на двух режимах. Установлено, что с увеличением радиуса надреза сжимающие остаточные напряжения в опасном сечении образцов уменьшаются, в результате чего уменьшается предел выносливости. Для сохранения эффекта упрочнения в случае опережающего поверхностного пластического деформирования при увеличении глубины надреза следует увеличивать толщину упрочнённого поверхностного слоя детали.

Ключевые слова: опережающее поверхностное пластическое деформирование, остаточные напряжения, толщина, упрочнённый слой, предел выносливости

В исследовании изучалось влияние толщины упрочнённого поверхностного слоя при опережающем деформировании поверхностном пластическом (ОППД) образцов из стали 20 диаметром 25 мм с отверстием диаметром 15 мм на предел выносливости при изгибе. Гладкие образцы подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) дробью диаметром 1,5-2,5 мм при давлении воздуха 0,28 МПа в течение 10 минут, а также обкатке роликом (OP) диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилии P=0,5 кН и P=1,0 кН с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Затем на все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля трёх радиусов: R=0,3 мм, *R*=0.5 мм и *R*=1.0 мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [1]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя *а* гладких образцов приведено на рис. 1. Из данных рис. 1 следует, что после нанесения на упрочнённые ПДО образцы надрезов с радиусами *R*=0,3 мм и *R*=0,5 мм материал на дне концентраторов находился в ненаклёпанном состоянии. Такое же состояние наблюдалось после нанесения на упрочнённые ОР образцы при *P*=0,5 кН надрезов с радиусом *R*=0,5 мм. Для образцов с надрезами *R*=1,0 мм во всех случаях упрочнения материал на дне концентраторов находился в ненаклёпанном состоянии.

В остальных случаях обкатки роликом материал на дне надрезов находился в наклёпанном состоянии (*P*=0,5 кН – *R*=0,3 мм; *P*=1,0 кН – *R*=0,3 мм и *R*=0,5 мм). Остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезами определялись аналитическим методом – суммированием дополнительных остаточных напряжений и остаточных напряжений гладких образцов [2], а также численным методом с использованием программного комплекса NASTRAN/PATRAN [3].



Рис. 1. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах после:

1 – ПДО; 2 – ОР, *Р*=0,5 кН; 3 – ОР, *Р*=1,0 кН



Рис. 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезами (−−−− − *R*=0,3мм; − − − − *R*=0,5 мм) после: 1 − ПДО; 2 − OP, *P*=0,5 кН; 3 − OP, *P*=1,0 кН

Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя *а* наименьшего сечения образцов приведено на рис. 2 и рис. 3. Анализируя данные рис. 1–3, можно видеть, что при практически одинаковых максимальных остаточных

Кирпичёв Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов. E-mail: dean fla@ssau.ru;

Сазанов Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры conpomuвления материалов. E-mail: sazanow@mail.ru;

Семёнова Ольга Юрьевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики. E-mail: sopromat@ssau.ru;

Михалкина Светлана Алексеевна, старший преподаватель кафедры высшей математики

напряжениях гладких образцов в образцах с надрезом одной глубины остаточные напряжения тем выше, чем больше толщина упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов со сжимающими остаточными напряжениями. Эта закономерность объясняется концентрацией остаточных напряжений в области дна надреза. Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла образцов с надрезами проводились на машине УММ-01 [4], база испытаний – 3·10⁶ циклов нагружения.



Рис. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезами *R*=1,0 мм после: *1* – ПДО; *2* – ОР, *P*=0,5 кН; *3* – ОР, *P*=1,0 кН

Результаты испытаний на усталость по определению предела выносливости σ_{-1} представлены в табл. 1.

Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя а наименьшего сечения образцов приведено на рис. 2 и рис. 3. Анализируя данные рис. 1-3, можно видеть, что при практически одинаковых максимальных остаточных напряжениях гладких образцов в образцах с надрезом одной глубины остаточные напряжения тем выше, чем больше толщина упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов со сжимающими остаточными напряжениями. Эта закономерность объясняется концентрацией остаточных напряжений в области дна надреза. Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла образцов с надрезами проводились на машине УММ-01 [4], база испытаний – 3.106 циклов нагружения. Результаты испытаний на усталость по определению предела выносливости σ_{-1} представлены в табл. 1.

m f 1 D					
Таолица І. Резуль	таты испытании на	усталость и оп	ределения (остаточных н	апряжении

Надрез <i>R</i> , мм	Неупрочн. образцы $\sigma_{\!-\!1}$, МПа	Упрочнённые образцы						
		упрочн.	$\sigma_{_{-1}}$,	$\sigma^{\scriptscriptstyle nob}_{\scriptscriptstyle 7}$,	117	$t_{\rm KD}$,	$\overline{\sigma}_{ocm}$,	$\overline{\mathcal{W}}$
		обр-ка	ка МПа МПа	МПа	Ψ_{σ}	MM	МΠа	Ψ_{σ}
0,3	95	ПДО	127,5	-307	0,106	0,452	-88	0,368
		OP1	155	-732	0,082	0,445	-181	0,331
		OP2	177,5	-861	0,096	0,442	-248	0,333
0,5	110	ПДО	127,5	-124	0,121	0,438	-47	0,372
		OP1	152,5	-311	0,137	0,442	-128	0,332
		OP2	182,5	-517	0,140	0,446	-218	0,333
1,0	90	ПДО	95	-29	0,175	0,410	-14	0,357
		OP1	105	-77	0,195	0,420	-39	0,384
		OP2	110	-105	0,191	0,420	-53	0,377

Выстоявшие базу испытаний упрочнённые образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при бо́льшем напряжении. Во всех упрочнённых образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина $t_{\kappa p}$ которых для каждой партии образцов представлена в табл. 1. На рис. 4 приведена фотография излома упрочнённого ОР при P = 1,0 кН образца с надрезом радиуса R=0,5 мм, на которой видна серповидная нераспространяющаяся трещина 2. Следует отметить, что значения $t_{\kappa p}$, измеренные в настоящем исследовании, хорошо согласуются с установленной ранее [5, 6] зависимостью

$$t_{kp} = 0,0216 \cdot D \left[1 - 0,04 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 0,54 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 \right], \quad (1)$$

где *D* – диаметр опасного сечения упрочнённого образца (детали) с концентратором напряжений, *d* – диаметр отверстия.

Из данных табл. 1 видно, что с увеличением глубины надреза приращение предела выносливости упрочнённых образцов снижается, так как уменьшаются сжимающие остаточные напряжения в их опасном сечении. Поэтому для сохранения эффекта упрочнения при ОППД с увеличением глубины надреза необходимо увеличивать толщину слоя гладкой детали со сжимающими остаточными напряжениями.



Рис. 4. Фотография излома упрочнённого роликом при *P*=1,0 кН образца с надрезом *R*=0,5 мм: *1* – надрез, *2* – нераспространяющаяся трещина, *3* – зона долома

Для оценки приращения предела выносливости $\Delta \sigma_{-1}$ за счёт поверхностного упрочнения использовались два критерия влияния остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла. Первым критерием [7-11] являются

осевые остаточные напряжения σ_z^{nos} на поверхности концентратора. Зависимость для определения приращения предела выносливости $\Delta \sigma_{-1}$ упрочнённых образцов (деталей) в этом случае имеет вид

$$\Delta \sigma_{-1} = \psi_{\sigma} \cdot \left| \sigma_{z}^{nob} \right|, \qquad (2)$$

где ψ_{σ} – коэффициент влияния остаточных напряже-

ний по критерию σ_z^{noo} на предел выносливости по разрушению.

Для определения второго критерия в работе [12] использовалось решение задачи [2] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении образца (детали) после нанесения надреза полуэллиптического профиля на упрочнённую поверхность. Выделив основную часть решения [2], был получен второй критерий $\overline{\sigma}_{ocm}$ влияния остаточных напряжений на предел выносливости образца (детали) в виде

$$\overline{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_{0}^{1} \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1 - \xi^2}} d\xi, \qquad (3)$$

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца (детали), $\xi = a/t_{\kappa p}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{\kappa p}$, $t_{\kappa p}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе образца (детали) на пределе выносливости.

Критерий $\overline{\sigma}_{ocm}$, который называется критерием среднеинтегральных остаточных напряжений, имеет чётко выраженный физический смысл – это остаточное напряжение на дне нераспространяющейся трещины усталости с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины. Приращение предела выносливости $\Delta \sigma_{-1}$ при изгибе в случае симметричного цикла при использовании критерия $\overline{\sigma}_{ocm}$ определяется по следующей формуле:

$$\Delta \sigma_{-1} = \overline{\psi}_{\sigma} \cdot \left| \overline{\sigma}_{ocm} \right|, \qquad (4)$$

где $\overline{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию $\overline{\sigma}_{ocm}$ на предел выносливости по разрушению.

Значения остаточных напряжений на поверхности надрезов σ_z^{nos} и среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ocm}$ приведены в табл. 1. По результатам испытаний на усталость неупрочнённых и упрочнённых образцов вычислялись коэффициенты ψ_{σ} и $\overline{\psi}_{\sigma}$, значения которых представлены в табл. 1. Из данных табл. 1 можно видеть, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию – остаточным напряжениям на поверхности концентратора σ_z^{nos} – приводит к значительному рассеянию коэффициента ψ_{σ} . Этот коэффициент в настоящем исследовании изменяется в широких пределах – от 0,082 до 0,195, то есть почти в 2,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей. Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию – среднеинтегральным остаточным напряжениям $\overline{\sigma}_{ocm}$ – приводит к существенно ме́ньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\overline{\psi}_{\sigma}$. Это объясняется тем, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений учитывает влияние на сопротивление усталости не только величины сжимающих остаточных напряжений, но и характера их распределения по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали (образца). Коэффициент $\overline{\psi}_{\sigma}$ в проведенном исследовании изменяется от 0,331 до 0,384, составляя в среднем 0,354, и практически совпадает со значением $\overline{\psi}_{\sigma}$ =0,36, установленным в [6] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Необходимо отметить, что на значения коэффициентов ψ_{σ} и $\overline{\psi}_{\sigma}$ не оказывает влияние состояние материала на дне концентраторов. Из данных табл. 1 видно, что не наблюдается определённой зависимости между величинами коэффициентов ψ_{σ} , $\overline{\psi}_{\sigma}$ и наклёпанным или ненаклёпанным состоянием материала образцов.

Выводы: проведенное исследование показало, что с уменьшением толщины упрочнённого слоя при ОППД сжимающие остаточные напряжения в опасном сечении детали уменьшаются, в результате чего приращение предела выносливости за счёт упрочнения снижается. Для сохранения эффекта упрочнения с увеличением глубины надреза необходимо увеличивать толщину упрочнённого поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями при ОППД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. *Иванов, С.И.* К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения. Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 53. С. 32-42.
- Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ. 1974. Вып. 1. С. 88-95.
- Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. 2011. №3(27). Ч. З. С. 171-174.
- Филатов, Э.Я. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость / Э.Я. Филатов, В.Э. Павловский. – Киев: Наукова Думка, 1985. 92 с.
- Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. №12. С. 37-40.
- Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.
- Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. 131 с.
- Серенсен, С.В. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости / С.В. Серенсен,

С.П. Борисов, Н.А. Бородин // Проблемы прочности. 1969.
 $\mathrm{N}^{\mathrm{o}}2.$ С. 3-7.

- Туровский, М.Л. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали / М.Л. Туровский, Н.М. Шифрин // Вестник машиностроения. 1970. №11. С. 37-40.
- Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. 1976. №5. С. 25-27.
- Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, А.А. Прохоров // Проблемы прочности. 1988. № 5. С. 31-33.
- Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29-32.

THE INFLUENCE OF THE HARDENED LAYER THICKNESS ON THE FATIGUE RESISTANCE UNDER OUTSTRIPPING SUPERFICIAL PLASTIC DEFORMING

© 2016 V.A. Kirpichyov, V.P. Sazanov, O.Yu. Semenova, S.A. Mikhalkina

Samara State Aerospace University named after acad. S.P. Korolyov (National Research University)

The influence of the hardened surface layer thickness under outstripping superficial plastic deforming on the endurance limit of hollow cylindrical specimens made of steel 20 of 25mm diameter with the 15 mm hole with circular cuts of semicircular profile of three radiuses: R=0,3 mm, R=0,5 mm, R=1,0 mm. Various thickness of the hardened surface layer was made by pneumoshot blasting and by rolling of two regimes. It is established that the residual stresses in the dangerous section of specimens decrease with the radius of cuts increase, therefore the endurance limit decreases. The thickness of part's hardened surface layer should be increased for the hardening effect conservation in the case of outstripping superficial plastic deforming under cut depth rising.

Key words: outstripping superficial plastic deforming, residual stresses, hardened layer depth, endurance limit

Viktor Kirpichyov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Materials Resistance Department. E-mail: dean fla@ssau.ru; Vyacheslav Sazanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Materials Resistance Department. E-mail: sazanow@mail.ru; Olga Semenova, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Higher Mathematics. E-mail: sopromat@ssau.ru; Svetlana Mikhalkina, Senior Teacher at the Higher Mathematics Department