

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПОЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов, О. Ю. Семёнова

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
443086 г. Самара, Московское шоссе, 34

E-mail: sopromat@ssau.ru

Изучены закономерности распределения остаточных напряжений в гладких цилиндрических образцах и в образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования и их влияние на предел выносливости сплошных и полых образцов из стали 20 в условиях концентрации напряжений.

Ключевые слова: *остаточные напряжения, поверхностное упрочнение, цилиндрический образец, концентратор напряжений, нераспространяющаяся трещина, предел выносливости.*

После упрочнения различными методами поверхностного пластического деформирования в поверхностном слое деталей изменяется структура материала, возникают наклеп и сжимающие остаточные напряжения. В работах [1, 2] установлено, что основную роль в повышении сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей в условиях концентрации играют сжимающие остаточные напряжения. В работе [3] для прогнозирования приращения предела выносливости упрочненных деталей с концентраторами по остаточным напряжениям был предложен критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ в виде

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

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором по толщине поверхностного слоя y ; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости (рис. 1).

Приращение предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла $\Delta\sigma_{-1}$ упрочненной детали с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ можно определить по следующей формуле:

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

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

Ольга Юрьевна Семенова, старший преподаватель кафедры «Высшая математика».

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

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

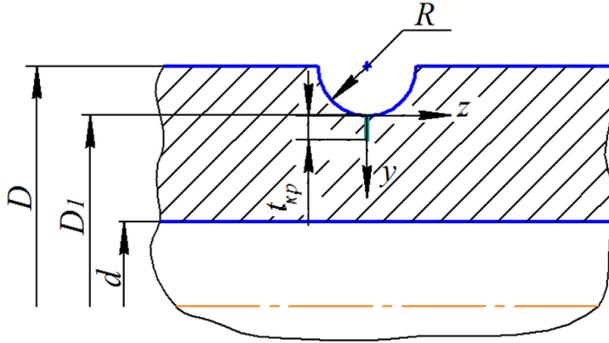


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

С целью проверки возможности применения критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ для прогнозирования предела выносливости упрочненных деталей из стали 20 были проведены эксперименты на полых цилиндрических образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля (см. рис. 1). Исследуемая сталь 20 имела следующие механические характеристики: $\sigma_T = 395$ МПа, $\sigma_s = 522$ МПа, $\delta = 26,1$ %, $\psi = 65,9$ %, $S_k = 1416$ МПа.

Гладкие образцы диаметром $D = 10$ мм, $D = 25$ мм с отверстием $d = 15$ мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) дробью диаметром 1,5-2 мм при давлении воздуха 0,25 МПа в течение 10 минут, а также обкатке роликом (ОР) 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 при скорости вращения образца 400 об/мин. Гладкие образцы диаметром $D = 50$ мм с отверстием $d = 40$ мм подвергались обкатке роликом на тех же режимах. Затем на все упрочненные и неупрочненные гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,5$ мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах диаметром $D = 10$ мм определялись экспериментально методом колец и полосок [4], а также методом удаления части цилиндрической поверхности [5]. Остаточные напряжения в гладких образцах диаметром $D/d = 25/15$ мм/мм и $D/d = 50/40$ мм/мм определялись методом колец и полосок [4]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в гладких образцах представлено на рис. 2.

Следует отметить, что остаточные напряжения в гладких образцах диаметром $D = 10$ мм, $D/d = 25/15$ мм/мм и $D/d = 50/40$ мм/мм практически не различаются при одной и той же упрочняющей обработке, причем различие при пневмодробеструйной обработке значительно меньше, чем при обработке роликом. Такое совпадение распределений сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя для цилиндрических сплошных образцов (деталей) и образцов различного диаметра с отверстием в случае, когда удвоенная толщина стенки равна диаметру гладкого образца, было описано в работах [6, 7].

В гладких образцах после пневмодробеструйной обработки сжимающие остаточные напряжения имеют существенный спад – до -110 МПа к поверхности образца, достигают максимума -338 МПа на глубине 0,07 мм и меняют знак на глубине 0,29 мм. После обкатки роликом при усилии $P = 0,5$ кН спад сжимающих остаточ-

ных напряжений к поверхности ($\sigma_z = -280$ МПа) значительно меньше, чем после ПДО, максимум составляет -345 МПа на глубине $0,1$ мм; смена знака происходит на глубине $0,48$ мм. После обкатки роликом при усилии $P = 1,0$ кН спад сжимающих остаточных напряжений к поверхности ($\sigma_z = -230$ МПа) несколько больше, чем при $P = 0,5$ кН; максимум составляет -360 МПа на глубине $0,15$ мм, и смена знака напряжений происходит на глубине $0,69$ мм.

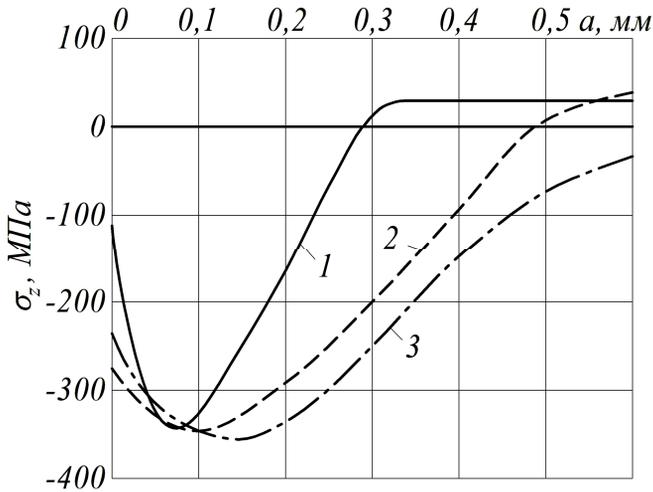


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочненных гладких образцах из стали 20 после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Следовательно, с увеличением усилия обкатки роликом максимум сжимающих остаточных напряжений смещается вглубь от поверхности образца и увеличивается толщина поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями. Эти закономерности распределения остаточных напряжений в гладких упрочненных образцах (деталях) оказывают значительное влияние на сопротивление усталости при опережающем поверхностном пластическом деформировании [8].

Остаточные напряжения в образцах с надрезом определялись расчетным путем – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счет перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим методом по методике работы [9], так и численным методом по первоначальным деформациям с использованием программного комплекса Nastran/Patran. Необходимо отметить, что результаты определения дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a наименьшего сечения образцов с надрезом $R = 0,5$ мм приведено на рис. 3.

Следует обратить внимание на то, что при упрочняющей обработке на одних и тех же режимах образцов диаметром 10 мм, $25/15$ мм/мм и $50/40$ мм/мм с надрезом $R = 0,5$ мм остаточные напряжения несколько различаются, причем на поверхности надрезов в образцах после обкатки роликом напряжения одинаковы. В образцах после ПДО остаточные напряжения различаются и на поверхности надреза. Наблюдаемое различие в распределении остаточных напряжений в образцах с надрезом

после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД) при одинаковом распределении напряжений в гладких образцах объясняется тем, что с увеличением диаметра полого цилиндра при неизменной толщине стенки уменьшается величина растягивающих остаточных напряжений под упрочненным поверхностным слоем. В результате при одинаковых дополнительных напряжениях после ОППД суммарные остаточные напряжения с увеличением диаметра образца с отверстием увеличиваются, что и наблюдалось в настоящем исследовании.

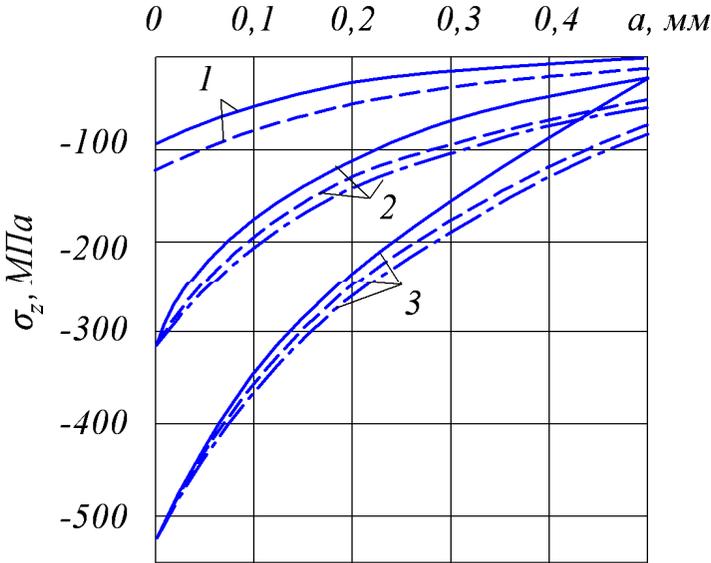


Рис. 3. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочненных образцах из стали 20 с надрезом $R = 0,5$ мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН (— $D = 10$ мм; ---- $D/d = 25/15$ мм/мм; - · - · - $D/d = 50/40$ мм/мм)

Испытания на многоцикловую усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочненных и упрочненных образцов диаметром $D = 10$ мм проводились на машине МУИ-6000, диаметром $D/d = 25/15$ мм/мм – на машине УММ-01 [10], диаметром $D/d = 50/40$ мм/мм – на машине УМП-02 [10], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в таблице. Упрочненные образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжениях, равных пределу выносливости, были доведены до разрушения при большей нагрузке. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, глубина $t_{кр}$ которых в среднем при $D = 10$ мм составляла 0,197 мм, при $D/d = 25/15$ мм/мм – 0,442 мм, при $D/d = 50/40$ мм/мм – 0,715 мм, что соответствует зависимости критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ от размеров поперечного сечения детали (образца), установленной экспериментально в работах [8, 11]:

$$t_{кр} = 0,0216D_1 \cdot \left[1 - 0,04 \cdot \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 - 0,54 \cdot \left(\frac{d}{D_1} \right)^3 \right], \quad (3)$$

где D_1 – диаметр наименьшего (опасного) сечения образца или детали, d – диаметр отверстия (см. рис. 1).

Результаты испытаний на усталость

| D/d , мм/мм | Неупрочненные образцы σ_{-1} , МПа | Упрочненные образцы | | | |
|---------------|---|---------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| | | Обработка | σ_{-1} , МПа | $\bar{\sigma}_{ocm}$, МПа | $\bar{\psi}_\sigma$ |
| 10/0 | 120 | ПДО | 137,5 | -48 | 0,365 |
| | | ОР, $P = 0,5$ кН | 187,5 | -178 | 0,379 |
| | | ОР, $P = 1,0$ кН | 250 | -333 | 0,390 |
| 25/15 | 110 | ПДО | 127,5 | -47 | 0,372 |
| | | ОР, $P = 0,5$ кН | 152,5 | -128 | 0,332 |
| | | ОР, $P = 1,0$ кН | 182,5 | -218 | 0,333 |
| 50/40 | 60 | ОР, $P = 0,5$ кН | 87,5 | -82 | 0,335 |
| | | ОР, $P = 1,0$ кН | 105 | -133 | 0,338 |

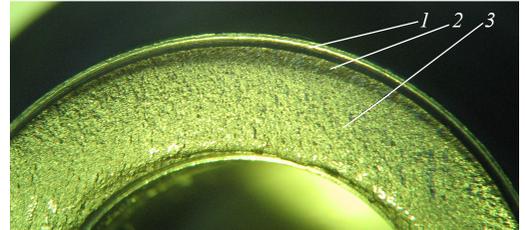
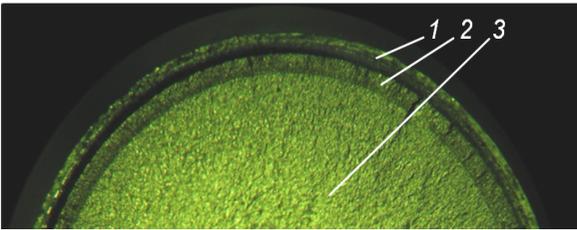


Рис. 4. Излом упрочненного дробью образца диаметром $D = 10$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм:
1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Рис. 5. Излом упрочненного роликом при $P = 1,0$ кН образца диаметром $D/d = 25/15$ мм/мм с надрезом $R = 0,5$ мм:
1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

На рис. 4 – 6 представлены фотографии изломов упрочненных образцов диаметром $D = 10$ мм (рис. 4), $D/d = 25/15$ мм/мм (рис. 5), $D/d = 50/40$ мм/мм (рис. 6). На фотографиях четко видны нераспространяющиеся трещины усталости 2, причем для образцов с $D = 10$ мм нераспространяющаяся трещина имеет концентрическую форму, так как эти образцы испытывались на усталость при чистом изгибе с вращением. Для образцов диаметром $D/d = 25/15$ мм/мм и $D/d = 50/40$ мм/мм трещина имеет серповидную форму, так как испытания на усталость этих образцов проводились при поперечном изгибе в одной плоскости.

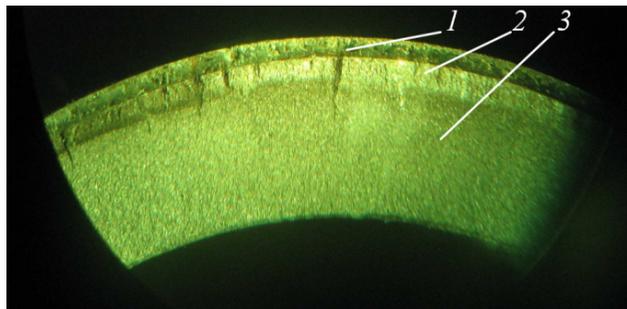


Рис. 6. Излом упрочненного роликом при $P = 1,0$ кН образца диаметром $D_1/d = 50/40$ мм/мм с надрезом $R = 0,5$ мм: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

С использованием распределения осевых σ_z остаточных напряжений в образцах с надрезом $R = 0,5$ мм (см. рис. 3) по толщине поверхностного слоя, равной $t_{кр}$, по формуле (1) вычислялись среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$, значения которых представлены в таблице. Затем по формуле (2) рассчитывался коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости $\bar{\psi}_\sigma$, значения которого также приведены в таблице.

Из представленных в таблице данных видно, что для цилиндрических сплошных и полых упрочненных образцов с надрезом $R = 0,5$ мм из стали 20 значение коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ при изгибе в случае симметричного цикла составляет в среднем 0,356, что практически совпадает со значением $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ для образцов и деталей из сталей других марок, алюминиевых сплавов и сплавов на основе никеля с такой же концентрацией напряжений [8]. Следует обратить внимание на то, что с увеличением диаметра образцов при одном и том же радиусе надреза $R = 0,5$ мм значение коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ уменьшается в связи с увеличением степени концентрации напряжений [12].

Выводы

1. Экспериментально установлено, что в гладких полых цилиндрических образцах (деталях) различного диаметра с одинаковой толщиной стенки сжимающие остаточные напряжения после одной и той же упрочняющей обработки равны напряжениям сплошного образца, диаметр поперечного сечения которого соответствует удвоенной толщине стенки.

2. С увеличением диаметра образца (детали) для сохранения положительного по сопротивлению многоциклового усталости эффекта поверхностного упрочнения необходимо увеличивать толщину поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями.

3. Для повышения эффекта поверхностного упрочнения распределение сжимающих остаточных напряжений в деталях с концентраторами должно быть наиболее полным по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

4. Подтверждена зависимость (3) критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ от размеров поперечного сечения полый цилиндрической детали на примере упрочненных пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом образцов из стали 20.

5. Установлено, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ может быть использован для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных цилиндрических деталей с концентраторами напряжений из стали 20 диаметром 10 – 50 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
2. Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 25-27.
3. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29-32.

4. *Иванов С.И.* К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
5. *Иванов С.И., Григорьева И.В.* К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 179-183.
6. *Павлов В.Ф., Киртичёв В.А., Иванов В.Б., Семёнова О.Ю., Денискина Е.А.* Закономерности распределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических деталях с отверстием различного диаметра / В сб.: Труды четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1 / Математическое моделирование и краевые задачи. – Самара: СамГТУ, 2007. – С. 171-174.
7. *Павлов В.Ф., Киртичёв В.А., Иванов В.Б., Семёнова О.Ю.* Особенности распределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических деталях после дробеструйной обработки / В сб.: Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1 / Математическое моделирование и краевые задачи. – Самара: СамГТУ, 2007. – С. 171-174.
8. *Павлов В.Ф., Киртичёв 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., Шатунов М.П., Павлов В.Ф.* Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып. 1. – С. 88-95.
10. *Филатов Э.Я., Павловский В.Э.* Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 с.
11. *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.
12. *Киртичёв В.А., Филатов А.П., Каранева О.В., Чирков, А.В., Семёнова О.Ю.* Прогнозирование предела выносливости поверхности упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 678-685.

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2012 г.

V.S. Vakulyuk, V.F. Pavlov, O.Yu. Semyonova

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

The regularities of residual stress distribution in smooth cylindrical specimens and specimens having a semicircular profile cut after outstripping superficial plastic deforming are studied. The influence of residual stresses distribution on solid and hollow steel 20 specimens on endurance limit at stress concentration is examined.

Keywords: *residual stresses, superficial hardening, cylindrical specimen, stress concentrator, non-propagating crack, endurance limit.*

*Vladimir S. Vakulyuk (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Valentin F. Pavlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Olga Yu. Semyonova, Senior Lecture.*