

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ НАДРЕЗА НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ОБРАЗЦОВ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Павлов В.Ф.
Вакулюк В.С.
Сазанов В.П.
Семёнова О.Ю.
Матвеева К.Ф.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва (Самарский университет)

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

pavlov.vf@ssau.ru

Исследовано влияние глубины надреза полукруглого профиля на многоцикловую усталость сплошных и полых цилиндрических образцов из стали 20 диаметром 25 мм при опережающем поверхностном пластическом деформировании. Выявлено, что с повышением глубины надреза от 0,3 мм до 1,0 мм предел выносливости образцов с надрезом уменьшается при одной и той же упрочняющей обработке. Для сохранения эффекта упрочнения при многоцикловой усталости с увеличением глубины надреза необходимо увеличивать толщину упрочнённого поверхностного слоя образцов при опережающем поверхностном пластическом деформировании. Установлено, что для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов с надрезами различной глубины следует использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, вычисленных по толщине поверхностного слоя опасного поперечного сечения образца, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

Ключевые слова: цилиндрический образец; поверхностное упрочнение; надрез различной глубины; остаточные напряжения; предел выносливости

В работе исследовалось влияние глубины надреза на предел выносливости при изгибе сплошных образцов диаметром $D_1 = 25$ мм и образцов с отверстием $D_1/d = 25/15$ мм/мм (рисунок 1) после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД), при котором надрезы наносятся после упрочнения гладких образцов. Гладкие образцы из стали 20 ($\sigma_s = 522$ МПа, $\sigma_T = 395$ МПа, $\delta = 26,1\%$, $\psi = 65,9\%$, $S_k = 1416$ МПа) упрочнялись пневмодробеструйной обработкой (ПДО) дробью диаметром 1,5 – 2 мм при давлении воздуха 0,25 МПа в течение 10 минут, а также обкаткой роликом (ОР) диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилии $P = 0,5$ кН (ОР-1) и $P = 1,0$ кН (ОР-2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Далее на все неупрочнённые и упрочнённые гладкие образцы профильными резцами наносились надрезы полукруглого профиля трёх

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

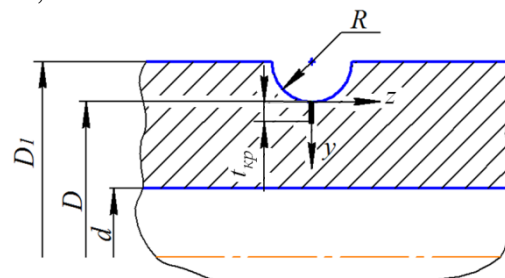


Рисунок 1. Надрез полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

Осевые σ_z остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [1]. Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя a гладких образцов представлены на рисунке 2. Из приведённых на рисунке 2 эпюр видно, что при одной и той же упрочняющей обработке в гладких образцах с отверстием наибольшие сжимающие остаточные напряжения примерно одинаковы с наи-

большими напряжениями сплошных образцов, а глубина смены знака остаточных напряжений в образцах с отверстием меньше, чем в сплошных образцах. Необходимо также обратить внимание на то, что значения реактивных растягивающих остаточных напряжений под упрочнённым

слоем в образцах с отверстием больше, чем в образцах без отверстия. Все эти закономерности распределения остаточных напряжений следует учитывать при оценке предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений после ОПД.

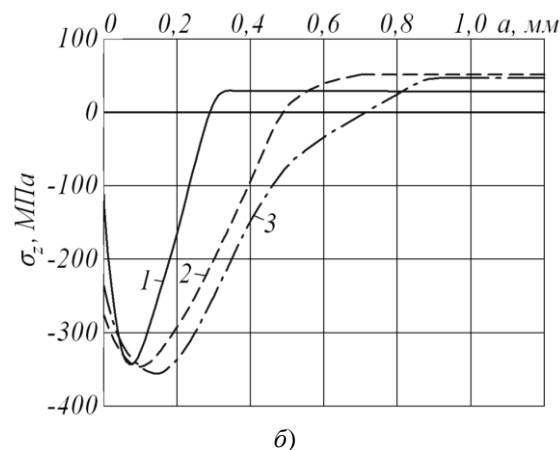
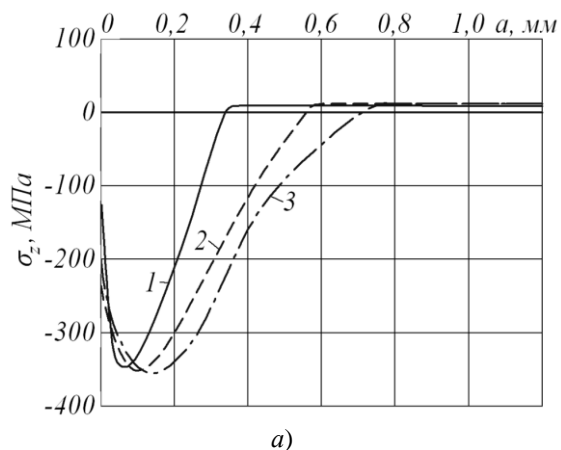


Рисунок 2. Эпюры σ_z остаточных напряжений в упрочнённых гладких сплошных образцах диаметром $D_1 = 25$ мм (а) и образцах с отверстием диаметром $D_1/d = 25/15$ мм/мм (б) после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Из представленных на рисунке 2 эпюр остаточных напряжений видно, что после нанесения на упрочнённые ПДО гладкие образцы надрезов с радиусами $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм на дне надрезов материал находится в ненаклёпанном состоянии. После нанесения на упрочнённые обкаткой роликом образцы при $P = 0,5$ кН надрезов с радиусом $R = 0,5$ мм наблюдается такое же состояние. Во всех случаях упрочнения для образцов с надрезами $R = 1,0$ мм материал на дне надрезов находится в ненаклёпанном состоянии. В других случаях обкатки роликом материал в зоне дна надрезов находится в наклёпанном состоянии ($P = 0,5$ кН – $R = 0,3$ мм; $P = 1,0$ кН – $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм).

Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезами различного радиуса определялись аналитическим методом – суммированием дополнительных остаточных напряжений от перераспределения остаточных усилий за счёт нанесения надрезов и остаточных напря-

жений гладких образцов [2], а также методом конечных элементов с использованием программного комплекса Patran\Nastran. Необходимо отметить, что расхождение значений остаточных напряжений в образцах с надрезами различной глубины, вычисленных аналитическим и численным методами, составляло 3–5%. Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя a опасного сечения образцов приведены на рисунках 3 и 4.

При анализе эпюр остаточных напряжений, представленных на рисунках 2–4, видно, что при одинаковых максимальных остаточных напряжениях гладких образцов в образцах с надрезами одной глубины остаточные напряжения тем больше, чем больше толщина поверхностного слоя гладких образцов со сжимающими остаточными напряжениями. Эта закономерность объясняется повышением концентрации остаточных напряжений в зоне дна надреза [2].

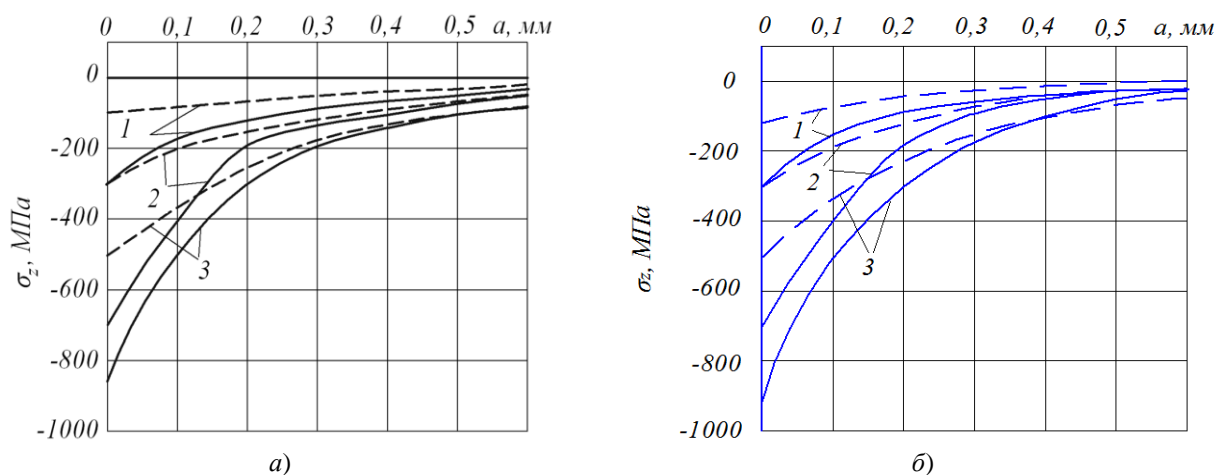


Рисунок 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в сплошных (а) и полых (б) упрочнённых образцах с надрезами (— — — — $R = 0,3$ мм; - - - - $R = 0,5$ мм) после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

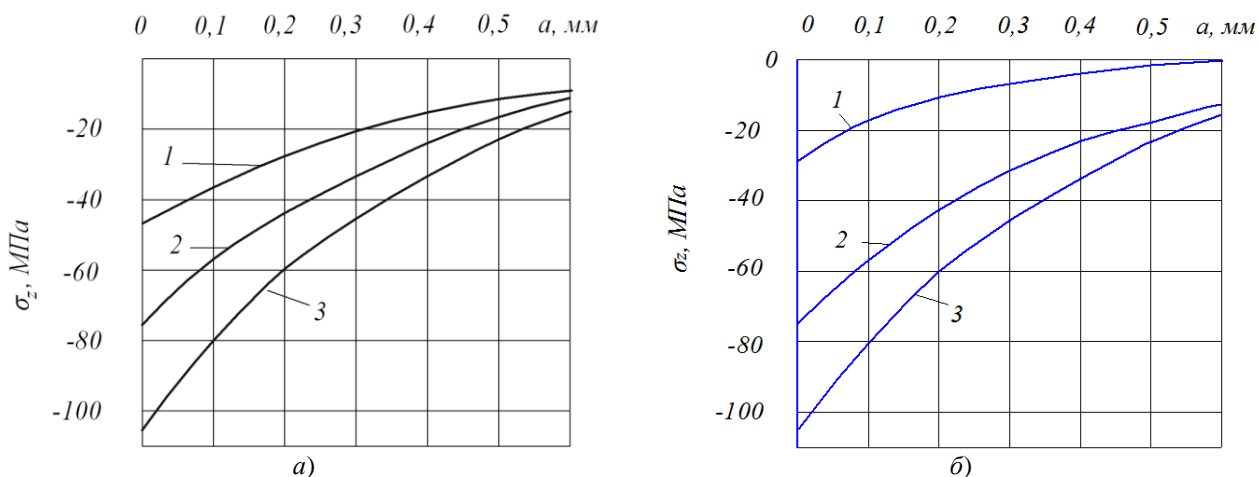


Рисунок 4. Осевые σ_z остаточные напряжения в сплошных (а) и полых (б) упрочнённых образцах с надрезами $R = 1,0$ мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Следует обратить внимание на значительную величину сжимающих остаточных напряжений на поверхности дна надрезов с $R = 0,3$ мм в образцах, упрочнённых роликом, которые превышают не только предел текучести σ_T , но и предел прочности σ_B стали 20. Этому обстоятельству дано объяснение в работе [3]. В этой работе показано, что предел текучести упрочнённого поверхностным пластическим деформированием материала может достигать сопротивления разрыву S_k , который для использованной стали 20 составляет 1416 МПа. В настоящем исследовании этот предел не достигнут, так как наи-

большее значение осевых остаточных напряжений составляет -908 МПа.

Испытания образцов с надрезами на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине УММ-01 [4], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Значения предела выносливости σ_{-1} образцов приведены в таблице 1.

Упрочнённые образцы, выстоявшие без разрушения базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большем напряжении. Во всех упрочнённых образцах наблюдались нераспространяющиеся усталостные трещины, средняя глубина $t_{кр}$ которых для каждой партии образцов приве-

дена в таблице 1. Необходимо отметить, что величина $t_{кр}$ достаточно хорошо согласуется с установленной ранее [5-7] зависимостью

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

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

Из приведённых в таблице 1 данных можно видеть, что с увеличением глубины надреза приращение предела выносливости образцов за счёт упрочнения уменьшается, так как снижаются сжимающие остаточные напряжения в опасном сечении. В связи с этим для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании с повышением глубины надреза необходимо увеличивать толщину слоя со сжимающими

ми остаточными напряжениями в гладкой детали.

Для оценки влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ использовались два критерия. Первым критерием [8–11] являются осевые остаточные напряжения $\sigma_z^{ног}$ на поверхности опасного сечения образца. Формула для определения приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ при изгибе в случае симметричного цикла упрочнённых образцов и деталей в этом случае имеет следующий вид:

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_\sigma \left| \sigma_z^{ног} \right|, \quad (2)$$

где ψ_σ – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию $\sigma_z^{ног}$ на предел выносливости по разрушению.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

D, мм	d, мм	R, мм	Неупроч. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
				обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{ног}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
24,4	0	0,3	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345
				ОР-1	165	-787	0,073	0,510	-171	0,336
				ОР-2	175	-908	0,074	0,520	-202	0,334
24,0	0	0,5	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
				ОР-1	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
				ОР-2	172,5	-515	0,117	0,520	-169	0,355
23,0	0	1,0	112,5	ПДО	120	-46	0,163	0,490	-21	0,357
				ОР-1	130	-92	0,190	0,510	-46	0,380
				ОР-2	142,5	-145	0,207	0,495	-79	0,380
24,4	15	0,3	95	ПДО	127,5	-307	0,106	0,452	-88	0,368
				ОР-1	155	-732	0,082	0,445	-181	0,331
				ОР-2	177,5	-861	0,096	0,442	-248	0,333
24,0	15	0,5	110	ПДО	127,5	-124	0,121	0,438	-47	0,372
				ОР-1	152,5	-311	0,137	0,442	-128	0,332
				ОР-2	182,5	-517	0,140	0,446	-218	0,333
23,0	15	1,0	90	ПДО	95	-29	0,175	0,410	-14	0,357
				ОР-1	105	-77	0,195	0,420	-39	0,384
				ОР-2	110	-105	0,191	0,420	-53	0,377

Для получения второго критерия в статье [12] использовалось решение задачи [2] об определении дополнительных осевых остаточных напряжений в опасном

сечении образца и детали после нанесения на упрочнённую поверхность надреза полуэллиптического профиля. После выделения основной части решения [2] был по-

лучен второй критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений влияния упрочнения на предел выносливости образца и детали в следующем виде:

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

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца и детали, $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от дна надреза до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$, $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе образца и детали при напряжении, равном пределу выносливости.

Критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ имеет чётко выраженный физический смысл – это осевое остаточное напряжение на дне нераспространяющейся трещины усталости с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины. Приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ упрочнённых образцов и деталей при изгибе в случае симметричного цикла с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ определяется по следующей зависимости:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (4)$$

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

Значения осевых остаточных напряжений на поверхности надрезов σ_z^{nos} и среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ представлены в таблице 1. По результатам испытаний на усталость неупрочнённых и упрочнённых образцов по формулам (2) и (4) определялись коэффициенты влияния ψ_{σ} и $\bar{\psi}_{\sigma}$, величины которых приведены в таблице 1. Из приведённых данных видно, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов с надрезом по перво-

му критерию – осевым остаточным напряжениям на поверхности надреза σ_z^{nos} – приводит к существенному рассеянию соответствующего коэффициента ψ_{σ} . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах – от 0,073 до 0,207, то есть в три раза, что неприемлемо для оценки приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости образцов с надрезом по второму критерию – среднеинтегральным остаточным напряжениям $\bar{\sigma}_{ост}$ – приводит к значительно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$. Этот результат объясняется тем, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений учитывает влияние на предел выносливости не только величины сжимающих остаточных напряжений, но и характера их распределения по глубине поверхностного слоя опасного сечения образца и детали. Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ в настоящем исследовании изменяется от 0,331 до 0,384, составляя в среднем 0,350, и практически совпадает с величиной $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$, установленной в работе [7] для поверхностно упрочнённых образцов и деталей с такой же концентрацией напряжений.

Следует отметить, что на величину коэффициентов влияния ψ_{σ} и $\bar{\psi}_{\sigma}$ не оказывает влияние состояние материала на поверхности надрезов. Из приведённых в таблице 1 данных видно, что не наблюдается определённой зависимости между значениями коэффициентов ψ_{σ} , $\bar{\psi}_{\sigma}$ и наклёпанным или ненаклёпанным состоянием материала образцов.

Выводы

1. В проведённом исследовании установлено, что с увеличением глубины надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании осевые сжимающие остаточные напряжения в

опасном сечении образцов уменьшаются – в результате приращение предела выносливости снижается. Для сохранения эффекта упрочнения по сопротивлению усталости необходимо увеличивать толщину поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями при ОППД.

2. Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости цилиндрических образцов с круговыми надрезами различной глубины по критерию осевых остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхности надреза приводит к значительному рассеянию соответствующего коэффициента ψ_σ , что затрудняет использование этого критерия на практике.

3. Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ даёт приемлемые для практики результаты – соответствующий коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ изменяется в существенно меньших пределах, чем коэффициент ψ_σ . В связи с этим критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ можно использовать для оценки приращения предела выносливости цилиндрических образцов с круговыми надрезами различной глубины после опережающего поверхностного пластического деформирования.

4. Для цилиндрических сплошных и полых образцов диаметром 25 мм из стали 20 с надрезами различной глубины подтверждена установленная ранее зависимость (1) критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ от размера опасного сечения.

Список использованных источников

[1] Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения / С.И. Иванов // Труды КуАИ. – Куйбышев, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.

[2] 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 : межвузовский сборник. – Куйбышев, 1974. – Вып. 1. – С. 88-95.

[3] Радченко, В. П. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей / В.Л. Радченко, В. Ф. Павлов // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г. С. Писаренко НАНУ, 2011. – С. 354-357.

[4] 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.

[5] Павлов, В. Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-26.

[6] Павлов, В. Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 37-40.

[7] 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.

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

[9] 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. – №2. – С. 3-7.

[10] Кравченко, Б. А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б. А. Кравченко, К. Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 131 с.

[11] Туровский, М.Л. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементованной стали / М. Л. Туровский, Н. М. Шифрин // Вестник машиностроения. – 1970. – №11. – С. 37-40.

[12] Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.

INFLUENCE OF NOTCH DEPTH ON MULTI-CYCLE FATIGUE OF SPECIMENS UNDER OUTSTRIPPING SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Pavlov V.F.
Vakulyuk V.S.
Sazanov V.P.
Semenova O.Yu.
Matveeva K.F.

Samara National
Research University

Moskovskoe shosse, 34, Samara,
443086, Russian Federation

pavlov.vf@ssau.ru

The influence of the notch depth of a semicircular profile on the multi-cycle fatigue of solid and hollow cylindrical samples made of steel 20 with diameter 25 mm under outstripping surface plastic deformation was studied. It was revealed that with an increase in the notch depth from 0.3 mm to 1.0 mm, the endurance limit of notched samples decreases with the same hardening treatment. To maintain the hardening effect during multi-cycle fatigue with increasing notch depth, it is necessary to increase the thickness of the hardened surface layer of the samples with outstripping surface plastic deformation. It has been established that to assess the influence of surface hardening on the endurance limit of samples with notches of various depths, one should use the criterion of average integral residual stresses calculated from the thickness of the surface layer of the dangerous cross-section of the sample, equal to the critical depth of a non-propagating fatigue crack.

Keywords: cylindrical sample; surface hardening; notches of various depths; residual stresses; endurance limit

References

- [1] Ivanov, S. I. (1971), "On determination of residual stresses in cylinder by rings-and-stripes method. Residual stresses", *Transactions of Kuibyshev Aviation Institute*, issue 53, pp. 32-42.
- [2] Ivanov, S. I., Shatunov, M. P. and Pavlov, V. F. (1974) "The influence of residual stresses on the endurance of notched specimens", *Problems of aircraft constructions elements strength*, Kuibyshev Aviation Institute, issue 3, pp. 88-95. (in Russian).
- [3] Radchenko, V. P. and Pavlov, V. F. (2011) "The maximum of compressive residual stresses under surface hardening of parts", *Proceedings of the International Scientific Technical Conference "Strength of materials and structural elements"*, The G. S. Pisarenko Strength Problems Institute of the Ukraine Academy of Sciences, Kiev, , pp. 354-357. (in Russian).
- [4] Filatov, E. Ya. and Pavlovskiy, V.E. (1985) *Universal machine complex for fatigue tests of materials and structures*, Scientific Thought, Kiev. (in Russian).
- [5] Pavlov, V. F. (1988), "The influence of residual stresses in a part with a concentrator surface layer value and distribution on the endurance limit. Report 1. Solid parts", *Universities News. Mechanical Engineering*, no. 8, pp. 22-26. (in Russian).
- [6] Pavlov, V. F. (1988), "The influence of residual stresses in a part with a concentrator surface layer value and distribution on the endurance limit. Report 2. Hollow parts.", *Universities News. Mechanical Engineering*, no. 12, pp. 37-40. (in Russian).
- [7] Pavlov, V. F., Kirpichev, V. A. and Vakulyuk, V. S. (2012), *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam* [The prediction of surface hardened parts fatigue resistance by residual stresses], Publishing House of the SSC RAS, Samara (in Russian)
- [8] Ivanov, S. I. and Pavlov, V. F. (1976), "Residual stresses influence on fatigue strength", *Strength problems*, no. 5, pp. 25-27. (in Russian).
- [9] Serensen, S. V., Borisov, S. P. and Borodin, N. A. (1969), "On surface hardened specimens fatigue resistance evaluation taking into account residual stress kinetics", *Strength problems*, no. 2, pp. 3-7. (in Russian).
- [10] Kravchenko, B. A. and Mitryaev K. F. (1968), *Obrabotka i vynoslivost' vysokoprochnykh materialov* [Machining and endurance of high-strength materials], Kuibyshev Publishing House, Kuibyshev. (in Russian).
- [11] Turovsky, M. L., Shifrin N. M. (1970) "Stress concentration in the surface layer of cemented steel". *Mechanical Engineering Bulletin*, no. 11, pp. 37-40. (in Russian)
- [12] Pavlov, V.F. (1986), "On connection between residual stresses and endurance limit under bending in stress-concentration conditions", *Universities News. Mechanical Engineering*, no. 8, pp. 29-32. (in Russian).