

ВЛИЯНИЕ РАДИУСА НАДРЕЗА ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ

© 2011 В. С. Вакулюк, В. А. Кирпичёв, В. Ф. Павлов, А. В. Чирков

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

Экспериментально установлено, что с увеличением радиуса надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании уменьшается приращение предела выносливости в связи с уменьшением сжимающих остаточных напряжений в наименьшем сечении детали.

Опережающее поверхностное пластическое деформирование, радиус надреза, остаточные напряжения, предел выносливости.

Опережающее поверхностное пластическое деформирование (ОППД) как упрочняющая обработка деталей с концентраторами напряжений используется тогда, когда непосредственное упрочнение концентратора затруднено. В этом случае поверхностным пластическим деформированием вначале обрабатывается гладкая деталь, а затем на эту деталь наносится концентратор. В результате перераспределения остаточных усилий поверхностно упрочнённой гладкой детали при нанесении концентратора возникают дополнительные остаточные напряжения [1, 2]. Остаточные напряжения детали с концентратором после ОППД определяются суммированием дополнительных напряжений и исходных остаточных напряжений гладкой детали [1, 2]. Опережающее поверхностное пластическое деформирование за счёт концентрации сжимающих остаточных напряжений приводит к существенному повышению характеристик сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений. Положительный эффект от ОППД наблюдается и в том случае, когда упрочнённый поверхностный слой гладкой детали прорезается полностью [3].

В настоящем исследовании изучалось влияние радиуса надреза при ОППД образцов из стали 20 диаметром 10 и 25 мм на предел выносливости при изгибе. Гладкие образцы 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 усилиях $P = 0,5$ 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 диаметром 10 мм наносились круговые надрезы полукруглого профиля двух радиусов: $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм, а на образцы диаметром 25 мм – 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 [4], а в образцах диаметром 10 мм также и методом удаления части цилиндрической поверхности [5]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких образцов диаметром 10 мм приведено на рис. 1, а диаметром 25 мм – на рис. 2.

Из данных рис. 1 следует, что после нанесения на упрочнённые ПДО образцы диаметром 10 мм надрезов с радиусами $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм материал на дне концентраторов находится в ненаклёпанном состоянии. Такое же состояние наблюдается после нанесения на упрочнённые обкаткой роликом образцы при $P = 0,5$ кН надрезов с радиусом $R = 0,5$ мм. В остальных случаях обкатки роликом образцов диаметром 10 мм материал на дне 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). Из данных, приведённых на рис. 2, следует аналогичный вывод для упрочнённых образцов диаметром 25 мм с надрезами $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм. Для образцов с надрезами $R = 1,0$ мм во всех случаях упрочнения материал на дне концентраторов находится в ненаклёпанном состоянии.

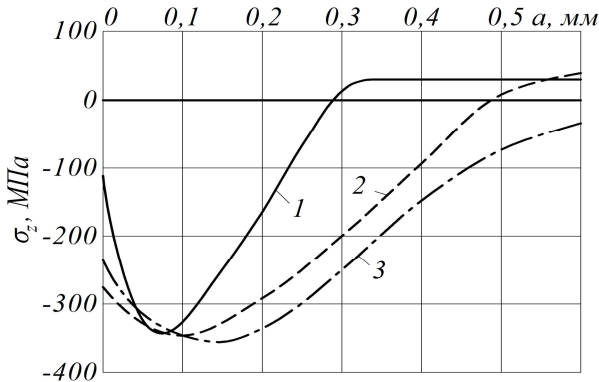


Рис. 1. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых гладких образцах диаметром 10 мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

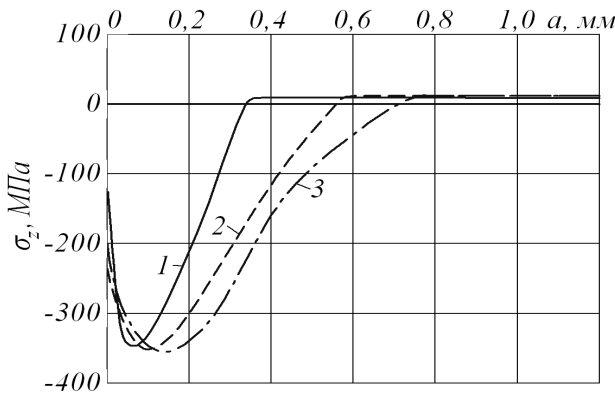


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых гладких образцах диаметром 25 мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

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 MSC.Nastran/MSC.Patran. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a наименьшего сечения образцов диаметром 10 мм с надрезами приведено на рис. 3, диаметром 25 мм – на рис. 4 и 5.

Анализируя данные рис. 1–5, можно видеть, что при практически одинаковых максимальных остаточных напряжениях гладких образцов в образцах с надрезом одного радиуса остаточные напряжения тем выше, чем больше толщина поверхностного слоя гладких образцов с сжимающими остаточными напряжениями. Эта закономерность объясняется концентрацией остаточных напряжений в области дна надреза.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла образцов диа-

метром 10 мм с надрезами проводились на машине МУИ-6000, образцов диаметром 25 мм – на машине УММ-01 [6]. База испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в табл. 1 и 2.

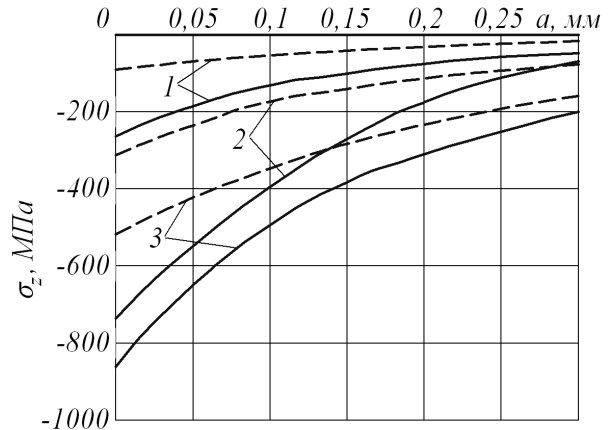


Рис. 3. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых образцах диаметром 10 мм с надрезами (— — $R = 0,3$ мм; - - - $R = 0,5$ мм) после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

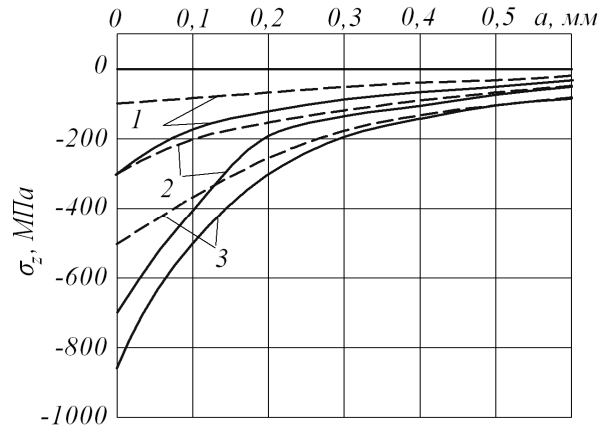


Рис. 4. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых образцах диаметром 25 мм с надрезами (— — $R = 0,3$ мм; - - - $R = 0,5$ мм) после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

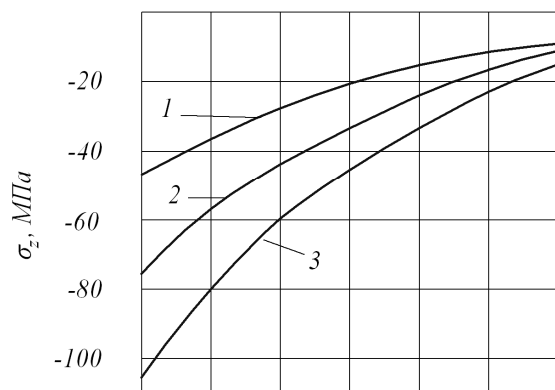


Рис. 5. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых образцах диаметром 25 мм с надрезами $R = 1,0$ мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, упрочнённые образцы доводились до разрушения при большем напряжении. Во всех упрочнённых образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина которых $t_{кр}$ для каждой партии образцов представлена в табл. 1 и

табл. 2. Следует отметить, что значения $t_{кр}$ хорошо согласуются с установленной ранее [7, 8] зависимостью

$$t_{кр} = 0,0216 \cdot D, \quad (1)$$

где D – наименьший диаметр упрочнённого образца (детали) с концентратором напряжений.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость образцов диаметром 10 мм

Надрез R , мм	Неупроч. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
		обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
0,3	110	ПДО	155	-263	0,171	0,203	-126	0,357
		ОР, $P = 0,5$ кН	230	-732	0,164	0,195	-337	0,356
		ОР, $P = 1,0$ кН	267,5	-861	0,183	0,205	-454	0,347
0,5	120	ПДО	137,5	-90	0,194	0,196	-48	0,365
		ОР, $P = 0,5$ кН	187,5	-311	0,217	0,202	-178	0,379
		ОР, $P = 1,0$ кН	250	-517	0,251	0,192	-333	0,390

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость образцов диаметром 25 мм

Надрез R , мм	Неупроч. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
		обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
0,3	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345
		ОР, $P = 0,5$ кН	165	-787	0,073	0,510	-171	0,336
		ОР, $P = 1,0$ кН	175	-908	0,074	0,520	-202	0,334
0,5	120	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
		ОР, $P = 0,5$ кН	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
		ОР, $P = 1,0$ кН	172,5	-515	0,117	0,520	-169	0,355
1,0	112,5	ПДО	120	-46	0,163	0,490	-21	0,357
		ОР, $P = 0,5$ кН	130	-92	0,190	0,510	-46	0,380
		ОР, $P = 1,0$ кН	142,5	-145	0,207	0,495	-79	0,380

На рис. 6 и 7 представлены фотографии изломов упрочнённых пневмодробеструйной обработкой образцов диаметром 10 мм с надрезом радиуса $R = 0,5$ мм и диаметром 25 мм с надрезом радиуса $R = 0,5$ мм. На фотографиях чётко видны нераспространяющиеся трещины усталости 2, причём для образцов диаметром 10 мм (рис. 6) трещины

имеет концентрическую форму, так как испытания на усталость проводились при чистом изгибе с вращением. Для образцов диаметром 25 мм (рис. 7) трещины имеют серповидную форму, так как испытания проводились при поперечном изгибе в одной плоскости.

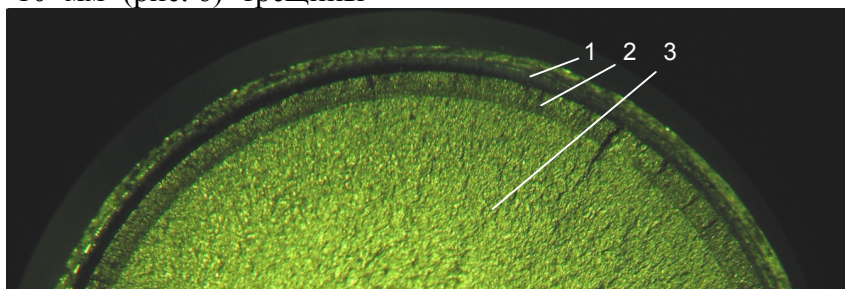


Рис. 6. Фотография излома упрочнённого ПДО образца диаметром 10 мм с надрезом $R = 0,5$ мм: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

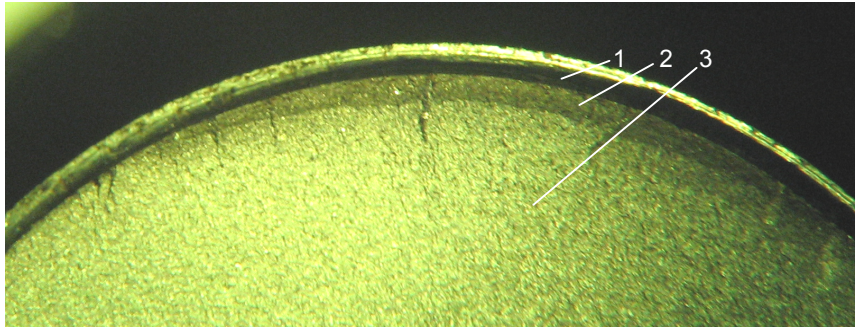


Рис. 7. Фотография излома упрочнённого ПДО образца диаметром 25 мм с надрезом $R=0,5$ мм:
1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Из данных табл. 1 и 2 видно, что с увеличением радиуса надреза предел выносливости образцов снижается, так как уменьшаются сжимающие остаточные напряжения в их опасном сечении. Поэтому для сохранения эффекта упрочнения при ОПД с увеличением радиуса надреза необходимо увеличивать толщину слоя гладкой детали с сжимающими остаточными напряжениями.

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 [3, 9 – 11] являются осевые остаточные напряжения $\sigma_z^{нов}$ на поверхности концентратора. Зависимость для определения приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ упрочнённых образцов (деталей) в этом случае имеет вид

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

где ψ_{σ} – коэффициент влияния остаточных напряжений 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 $\bar{\sigma}_{осм}$ влияния остаточных напряжений на предел выносливости образца (детали) в виде

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

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении образца (детали); $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора

до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе образца (детали) на пределе выносливости.

Критерий $\bar{\sigma}_{осм}$, который в дальнейшем будем называть 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 $\bar{\sigma}_{осм}$ определяется по следующей формуле:

$$\bar{\sigma}_{осм} = \bar{\psi}_{\sigma} \cdot \left| \sigma_{осм} \right|, \quad (4)$$

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

Значения остаточных напряжений на поверхности надрезов $\sigma_z^{нов}$ и среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{осм}$ приведены в табл. 1 и 2. По результатам испытаний неупрочнённых и упрочнённых образцов на усталость вычислялись коэффициенты ψ_{σ} и $\bar{\psi}_{\sigma}$, значения которых представлены в табл. 1 и 2. Из данных табл. 1 и 2 можно видеть, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию – остаточным напряжениям на поверхности концентратора $\sigma_z^{нов}$ – приводит к значительному рассеянию коэффициента ψ_{σ} . Этот коэффициент в настоящем исследовании изменяется в широких пределах: от 0,073 до 0,251 (табл. 1 и 2), то есть изменяется почти в 3,5 раза, что не-

приемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. 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 $\bar{\psi}_\sigma$ в проведённом исследовании изменяется от 0,334 до 0,390, составляя в среднем 0,357, и практически совпадает с значением $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленным в [8] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Необходимо отметить, что на значения коэффициентов ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ не оказывает влияния состояние материала на дне концентраторов. Из данных табл. 1 и 2 видно, что не наблюдается определённой зависимости между величинами коэффициентов ψ_σ , $\bar{\psi}_\sigma$ и наклёпанным или ненаклёпанным состоянием материала образцов.

Выводы

1. С увеличением глубины концентратора при опережающем поверхностном пластическом деформировании для сохранения эффекта упрочнения с позиций сопротивления усталости необходимо увеличивать толщину упрочнённого поверхностного слоя деталей с сжимающими остаточными напряжениями.

2. Для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений следует использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, который учитывает влияние на сопротивление усталости не только величины сжимающих остаточных напряжений, но и характера их распределения по толщине поверхностного слоя деталей.

3. Влияние сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённых деталей с концентраторами не

зависит от наклёпанного или ненаклёпанного состояния материала на поверхности опасного сечения.

4. Для определения приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений следует воспользоваться зависимостью (4), среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ в которой вычисляются по формуле (3) по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости (формула (1)).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/13944).

Библиографический список

1. Иванов, С.И. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях [Текст] / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1973. – Вып.60. – С.160-170.

2. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом [Текст] / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып.1. – С.88-95.

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

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

5. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности [Текст] / С.И. Иванов, И.В. Григорьева // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып.48. – С.179-183.

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

7. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С.22-25.

8. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.Б. Иванов //– Самара: Из-во СНЦ РАН, 2008. – 64 с.

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

10. Серенсен, С.В. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости [Текст] / С.В. Серенсен, С.П. Борисов, Н.А. Бородин // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.

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

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

INFLUENCE OF NOTCH RADIUS AT ADVANCING SURFACE PLASTIC DEFORMING ON ENDURANCE LIMIT OF DETAIL

©2011 V. S. Vakuljuk, V. A. Kirpichyev, V. F. Pavlov, A. V. Chirkov

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

It is experimentally established that with notch size increase at advancing surface plastic forming, the increment of an endurance limit in connection with reduction of compressing residual stresses in the minimal section of detail decreases.

Advancing surface plastic forming, notch radius, residual stresses, endurance limit.

Информация об авторах

Вакулюк Владимир Степанович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Кирпичёв Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Павлов Валентин Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846)267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Чирков Алексей Викторович, ассистент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Vakuljuk Vladimir Stepanovich, candidate of technical science, associate professor of department «strength of materials», Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.

Kirpichyev Victor Alekseevich, doctor of technical science, professor, decan of aircraft faculty, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.

Pavlov Valentin Fjodorovich, doctor of technical science, professor, Head of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846)267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.

Chirkov Alexey Viktorovich, assistant of department «strength of materials», Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.