

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ОБРАЗЦОВ С НАДРЕЗОМ ПРИ ИЗГИБЕ И РАСТЯЖЕНИИ-СЖАТИИ

В.Ф. Павлов,
В.А. Кирпичёв,
В.С. Вакулюк,
В.П. Сазанов,
П.А. Шляпников

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
Московское шоссе, 34,
г. Самара, Российская Федерация,
443086

pavlov.vf@ssau.ru

В работе исследовано влияние гидродробеструйной обработки на предел выносливости при изгибе и растяжении-сжатии в случае симметричного цикла цилиндрических образцов с круговым надрезом полукруглого профиля радиуса 0,3 мм. Образцы диаметром 10 мм для испытаний на усталость изготавливались из сталей 30ХГСА, 12Х18Н10Т, ЭИ961, 45 и алюминиевых сплавов В93, Д16Т. Влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов с надрезом оценивалось по двум критериям: остаточным напряжениям на поверхности надреза и среднеинтегральным остаточным напряжениям, вычисленным по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

По результатам определения остаточных напряжений и предела выносливости образцов с надрезом установлено, что коэффициенты влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости при изгибе и растяжении-сжатии по обоим критериям примерно одинаковы. Однако коэффициент влияния по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений изменяется в значительно меньших пределах, чем коэффициент влияния по критерию остаточных напряжений на поверхности концентратора. Поэтому для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами напряжений следует использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

На примере образцов при наличии и отсутствии наклёпа в опасном сечении показано, что в условиях концентрации напряжений наклёп не оказывает влияния на предел выносливости поверхностно упрочнённой детали. На предел выносливости таких деталей оказывают влияние только сжимающие остаточные напряжения.

Ключевые слова: гидродробеструйная обработка, образец с надрезом, предел выносливости, изгиб, растяжение-сжатие, симметричный цикл, остаточные напряжения, критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

1 Введение

В практике современного машиностроения широкое применение находят различные методы поверхностного пластического деформирования (ППД), использование которых приводит к повышению сопротивления усталости деталей. Особенно эффективно применение ППД для деталей с концентраторами напряжений. Основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых деталей играют сжимающие остаточные напряжения, наведённые в

тонком поверхностном слое [1-7], поэтому влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости чаще всего оценивается по остаточным напряжениям в опасном сечении деталей.

Для оценки влияния упрочнения на приращение предела выносливости Δp_{-1} при симметричном цикле в случае изгиба ($\Delta \sigma_{-1}$) и растяжения-сжатия ($\Delta \sigma_{-1p}$) деталей используются два критерия. Первый критерий – осевые остаточные напряжения

на поверхности опасного сечения $\sigma_z^{нов}$; в этом случае приращение предела выносливости определяется по формуле

$$\Delta p_{-1} = \psi_p \cdot |\sigma_z^{нов}|, \quad (1)$$

где ψ_p (ψ_σ) – коэффициент влияния упрочняющей обработки на предел выносливости по критерию $\sigma_z^{нов}$. Второй критерий – среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ [8], вычисленные по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости (рисунок 1); в этом случае приращение предела выносливости определяется по формуле

$$\Delta p_{-1} = \bar{\psi}_p \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (2)$$

где $\bar{\psi}_p$ ($\bar{\psi}_\sigma$) – коэффициент влияния упрочняющей обработки на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$;

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

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали по толщине поверхностного слоя y ; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от поверхности детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$.

Многочисленными экспериментальными исследованиями [9-12] было установлено, что критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$, возникающей в упрочнённой детали с концентратором напряжений при работе на пределе выносливости, зависит только от размера опасного поперечного сечения и определяется по формуле [9-11]

$$t_{кр} = 0,0216 D_1, \quad (4)$$

где D_1 – диаметр опасного поперечного сечения детали (рисунок 1).

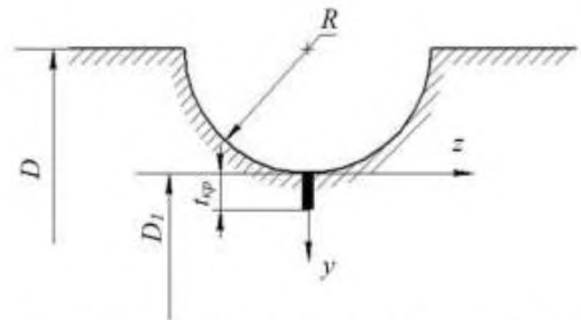


Рисунок 1. Деталь с круговым надрезом полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

В соответствии с формулами (1) – (3) оценка влияния упрочняющей обработки на предел выносливости деталей с концентраторами напряжений производилась по осевым σ_z остаточным напряжениям, действующим в опасном сечении деталей, так как осевые напряжения являются наибольшими по модулю из трёх главных напряжений, действующих в этом сечении, радиальные равны нулю или близки к нулю, а окружные имеют промежуточное значение. Поэтому в соответствии с теорией наибольших касательных напряжений осевые остаточные напряжения являются ответственными за повышение предела выносливости упрочнённых ППД деталей с концентраторами напряжений.

2 Предмет исследования

В исследовании изучалось влияние поверхностного пластического деформирования на предел выносливости при изгибе и растяжении-сжатии в случае симметричного цикла цилиндрических образцов из различных материалов с круговым надрезом полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм. Механические характеристики используемых в исследовании материалов приведены в таблице 1. Цилиндрические гладкие образцы диаметром $D = 10$ мм из сталей 30ХГСА, 12Х18Н10Т, сплава В93 для испытаний на изгиб и из сталей ЭИ961, 45, сплава Д16Т для испытаний на растяжение-сжатие подвергались гидродробеструйной

обработке (ГДО) стальными шариками диаметром 2 мм в течение 8 минут при давлении масла 0,28 МПа (стали), и 0,19 МПа (алюминиевые сплавы В93, В95).

Таблица 1. Механические характеристики материалов

Материал	Механические характеристики				
	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
30ХГСА	788	536	18,9	65,9	1484
12Х18Н10Т	646	281	50,8	65,6	1444
ЭИ961	1090	990	11,3	67,4	2050
сталь 45	610	396	24,2	51,8	1010
В93	334	219	16,3	20,8	358
Д16Т	547	426	14,8	16,5	647

3 Результаты исследования

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись двумя методами: методом колец и полосок [13,14] и методом удаления части цилиндрической поверхности [15]. Необходимо отметить, что распределение остаточных напряжений, определённых двумя методами, имело хорошее совпадение. На рисунке 2 приведены эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя y гладких образцов.

На неупрочнённые и упрочнённые ГДО гладкие образцы безнаклёпным способом (вначале фасонным резцом, а затем электрополированием) наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм (рис. 1). Остаточные напряжения в образцах с надрезом, вызванные перераспределением остаточных усилий гладкого образца при нанесении надреза, определялись аналитическим [16,17] и численным [18-22] методами.

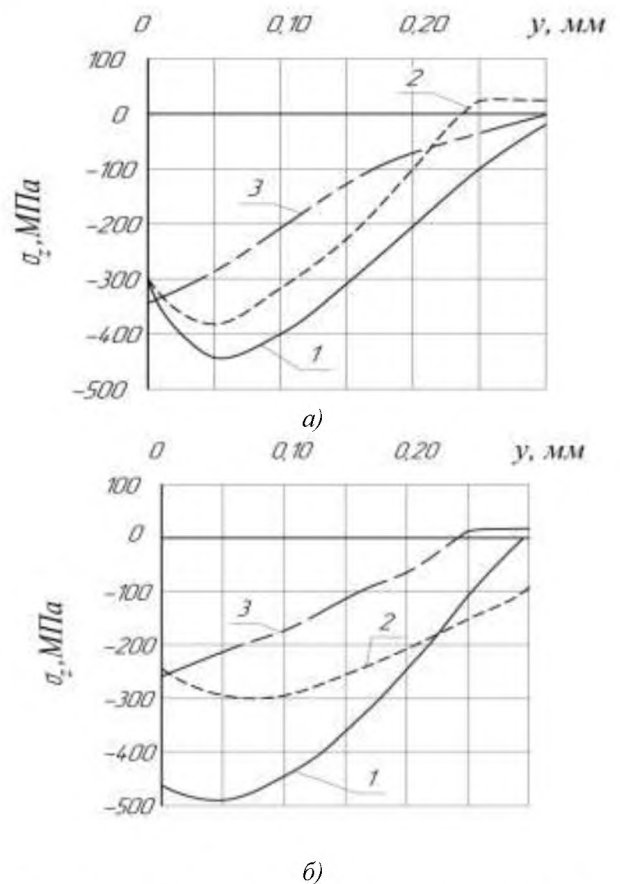


Рисунок 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в гладких образцах для испытаний на изгиб (а) и растяжение-сжатие (б) после ГДО: а) – 1-30ХГСА, 2-12Х18Н10Т, 3-В93; б) – 1-ЭИ961, 2-сталь 45, 3-Д16Т

Результаты расчётов, выполненные двумя методами, практически совпали. На рисунке 3 приведены эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине

поверхностного слоя у наименьшего сечения образцов с надрезом.

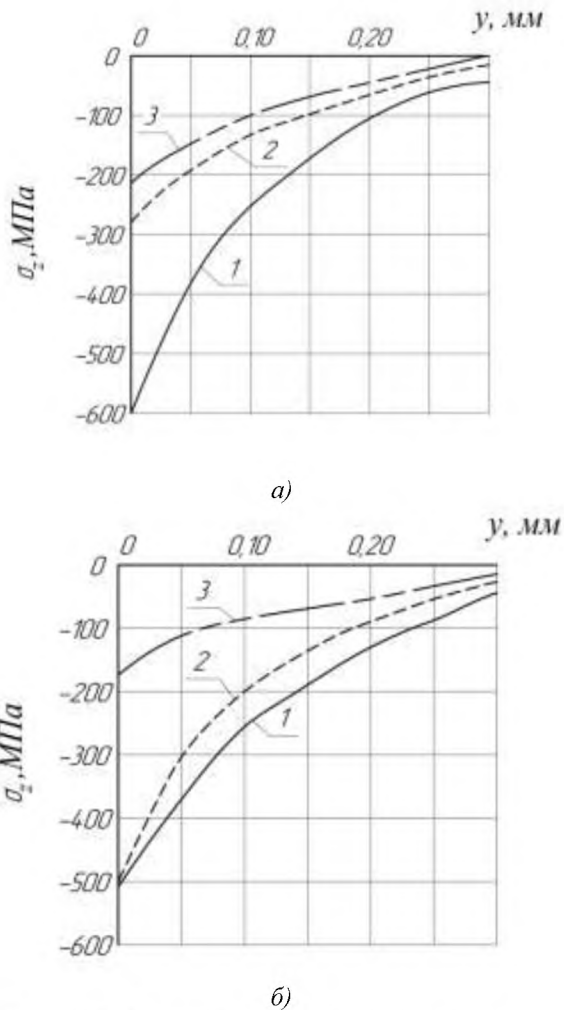


Рисунок 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в образцах для испытаний на изгиб (а) и растяжение-сжатие (б): а) – 1-30ХГСА, 2-12Х18Н10Т, 3-В93; б) – 1-ЭИ961, 2-сталь 45, 3- Д16Т

Из приведённых на рисунке 3 эпюр видно, что в некоторых случаях (стали 30ХГСА, 45) наибольшие сжимающие остаточные напряжения превышают предел текучести $\sigma_{0,2}$ материала (таблица 1). Этому факту дано объяснение в работах [13, 23, 24], где доказано, что в поверхностном слое упрочнённых ППД деталях за счёт повышения механических характеристик материала наибольшая величина остаточных напряжений может даже превышать

сопротивление разрыву S_k на 15%, которая в данном исследовании не достигнута.

Испытания на усталость при симметричном цикле неупрочнённых и упрочнённых ГДО образцов с круговым надрезом полукруглого профиля $R = 0,3$ мм при чистом изгибе с вращением проводились на машине МУИ-6000 и при растяжении-сжатии – на машине УММ-01; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости образцов при изгибе σ_{-1} и при растяжении-сжатии σ_{-1p} представлены в таблицах 2 и 3. Для определения критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости упрочнённые образцы с надрезом, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большем напряжении. Экспериментальные значения $t_{кр}$ представлены в таблицах 2 и 3. Средние значения критической глубины нераспространяющейся трещины усталости ($t_{кр}$)_{ср}, установленные в настоящем исследовании при изгибе ($t_{кр}$)_{ср} = 0,205 мм и при растяжении-сжатии ($t_{кр}$)_{ср} = 0,201 мм практически не отличаются от значений, вычисленных по формуле (4), которые составляют при изгибе и растяжении-сжатии ($D_1 = 9,4$ мм) $t_{кр} = 0,203$ мм. Следовательно, проведённое исследование показывает, что для определения $t_{кр}$ формула (4) справедлива как при изгибе, так и при растяжении-сжатии.

В таблицах 2 и 3 приведены также значения осевых остаточных напряжений на поверхности надрезов $\sigma_z^{нов}$, среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, вычисленных по формуле (3), коэффициентов влияния упрочняющей обработки ψ_σ и $(\bar{\psi}_\sigma)^{эксн}$ по критериям $\sigma_z^{нов}$ и $\bar{\sigma}_{ост}$, вычисленных по формулам (1) и (2).

Таблица 2. Результаты испытаний образцов с надрезом $R = 0,3$ мм на усталость при изгибе и определения остаточных напряжений

Материал	K_σ	Неупрочн. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
			σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$(\bar{\psi}_\sigma)^{эксн}$	$(\bar{\psi}_\sigma)^{расч}$
30ХГСА	2,11	180	270	-620	0,145	0,204	-233	0,386	0,377
12Х18Н10Т	2,01	175	220	-268	0,168	0,207	-126	0,356	0,383
В93	474	67,5	100	-213	0,153	0,203	-96	0,339	0,401

Таблица 3. Результаты испытаний образцов с надрезом $R = 0,3$ мм на усталость при растяжении-сжатии и определения остаточных напряжений

Материал	K_σ	Неупрочн. образцы σ_{-1p} , МПа	Упрочнённые образцы						
			σ_{-1p} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$(\bar{\psi}_\sigma)^{эксн}$	$(\bar{\psi}_\sigma)^{расч}$
ЭИ961	2,57	151,3	233,4	-500	0,164	0,198	-258	0,357	0,347
сталь 45	2,08	152,5	200	-478	0,099	0,206	-134	0,355	0,379
Д16Т	2,04	78,4	105	-160	0,166	0,200	-75,3	0,353	0,381

Из представленных в таблицах 2 и 3 данных следует, что среднее значение коэффициента влияния упрочняющей обработки на предел выносливости при изгибе по критерию $\sigma_z^{нов}$ составляет $(\psi_\sigma)_{cp} = 0,155$, а при растяжении-сжатии – $(\psi_\sigma)_{cp} = 0,143$, то есть средние значения коэффициента ψ_σ различаются незначительно. Однако следует отметить, что в настоящем исследовании крайние значения коэффициента ψ_σ составляют 0,099 (сталь 45) и 0,168 (12Х18Н10Т), то есть отличаются в 1,7 раза. Для исследованных в монографии [11] образцов и деталей, подобное различие составляет 38 раз. Этот факт объясняется тем, что в настоящем исследовании распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине опасного поперечного сечения образцов с надрезом, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$, аналогичны (рис. 3), в отличие от многообразия характера распределения остаточных напряжений в работе [11].

Среднее значение коэффициента влияния упрочняющей обработки на предел выносливости при изгибе по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$

составляет $(\bar{\psi}_\sigma)_{cp}^{эксн} = 0,360$, а при растяжении-сжатии – $(\bar{\psi}_\sigma)_{cp} = 0,355$, то есть в настоящем исследовании (также как и с коэффициентами ψ_σ) коэффициенты $\bar{\psi}_\sigma$ при изгибе и растяжении-сжатии практически одинаковы. Следует отметить, что коэффициенты $\bar{\psi}_\sigma$ изменяются в меньших пределах, чем коэффициенты ψ_σ , то есть оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе и растяжении-сжатии образцов (деталей) в условиях концентрации напряжений по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ является более точной, чем по критерию $\sigma_z^{нов}$.

Анализируя эпюры остаточных напряжений для упрочнённых ГДО гладких образцов (рис. 2), можно видеть, что толщина поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями в образцах из сталей 30ХГСА и 45 превышает 0,3 мм. Поэтому после нанесения на гладкие образцы надреза с радиусом $R = 0,3$ мм поверхностный слой опасного сечения этих образцов находится в наклёпанном состоянии в отличие от образцов с надрезом из сталей 12Х18Н10Т, ЭИ961 и сплавов В93,

Д16Т, в поверхностном слое которых наклёп отсутствует. Однако по результатам определения коэффициентов ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ можно сделать заключение о том, что наличие наклёпа в опасном сечении не оказывает влияние на предел выносливости образцов с концентраторами напряжений. Это заключение соответствует выводам работ [1-3], в которых экспериментально установлено, что в условиях концентрации напряжений наклёп не влияет на предел выносливости деталей.

В таблицах 2 и 3 приведены значения эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ , определённого для цилиндрических образцов с круговым надрезом полукруглого профиля по данным работы [25] в зависимости от предела прочности материала образцов. В работе [11] на основании многочисленных экспериментов была установлена зависимость между коэффициентом влияния $(\bar{\psi}_\sigma)^{расч}$ и эффективным коэффициентом концентрации напряжений K_σ в виде

$$(\bar{\psi}_\sigma)^{расч} = 0,514 - 0,065K_\sigma. \quad (5)$$

Значения коэффициента $(\bar{\psi}_\sigma)^{расч}$, вычисленные по зависимости (5), приведены в таблицах 2 и 3. Средние величины коэффициента $(\bar{\psi}_\sigma)^{расч}$ составили: при изгибе $(\bar{\psi}_\sigma)^{расч} = 0,387$, при растяжении-сжатии $(\bar{\psi}_\sigma)^{расч} = 0,369$, что незначительно отличается от средних значений коэффициентов $(\bar{\psi}_\sigma)_{ср}^{эксп}$, полученных на основании эксперимента (при изгибе $(\bar{\psi}_\sigma)_{ср}^{эксп} = 0,360$, при растяжении-сжатии $(\bar{\psi}_\sigma)_{ср}^{эксп} = 0,355$). Следовательно, формулы (2) и (5) можно использовать для прогнозирования приращения предела выносливости поверхностно-упрочнённых цилиндрических деталей с надрезами полукруглого профиля при изгибе и растяжении-сжатии.

4 Выводы

1. При оценке влияния гидродробеструйной обработки на предел выносливости при изгибе и растяжении-сжатии образцов с надрезом по критерию осевых остаточных напряжений на поверхности надреза и критерию среднеинтегральных остаточных напряжений экспериментально установлено, что соответствующие этим критериям коэффициенты влияния при изгибе и растяжении-сжатии практически одинаковы.
2. Проведённые эксперименты подтвердили выявленную ранее закономерность, что в условиях концентрации напряжений повышение предела выносливости деталей за счёт поверхностного пластического деформирования связано с наличием сжимающих остаточных напряжений, а наклёп не оказывает влияние на сопротивление усталости.
3. Глубина нераспространяющейся трещины усталости при изгибе и растяжении-сжатии, измеренная на выстоявших базу испытаний образцах при напряжениях, равных пределу выносливости, соответствует зависимости, установленной ранее.
4. В исследовании показано, что для прогнозирования предела выносливости при изгибе и растяжении-сжатии упрочнённых ППД деталей в условиях концентрации напряжений представляется возможным использовать вычисленный с учётом эффективного коэффициента концентрации напряжений коэффициент влияния упрочняющей обработки на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений.

Список использованных источников

- [1] Иванов С.И., Павлов В.Ф. О влиянии остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность образцов из стали 45 // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев: КуАИ. 1974. Вып.1. С. 96-100.
- [2] Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность // Проблемы прочности. 1976. №5. С. 25-27.

- [3] Иванов С.И., Павлов В.Ф., Прохоров А.А. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. 1988. №5. С. 31-33.
- [4] Вакулук В.С. Сопротивление усталости детали в зависимости от толщины упрочнённого слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник СГАУ, 2012. №3(34). С. 172-176.
- [5] Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Чирков А.В. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых гладких деталей // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки, 2012. №3(23). С. 102-107.
- [6] Богуслав В.А., Муравченко Ф.М. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД // Запорожье, 2003.
- [7] Prummer R. Residual stress relief treatment by shock waves / R. Prammer // Metall(Osterr.). 1998 – Vol.52, no. 10-11. P. 633-635.
- [8] Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29-32.
- [9] Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. №8. С. 22-26.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Иванов С.И., Павлов В.Ф., Минин Б.В., Кирпичёв В.А., Кочеров Е.П., Головкин В.В. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2015. 170 с.
- [13] Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
- [14] Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения // Куйбышев: КуАИ. 1971. Вып. 53. С. 32-42.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Тру-ды КуАИ. Куйбышев: КуАИ, 1973. Вып. 66. С. 160-170.
- [18] Сазанов В.П., Чирков А.В., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник СГАУ, 2011. №3(27). Ч. 3. С. 171-174.
- [19] Сазанов В.П. Исследование распределения компонентов остаточного напряжённого состояния в области наименьшего сечения поверхностно упрочнённой детали с кольцевым надрезом методом конечно-элементного моделирования // Вестник СГАУ. 2012. № 3(34). С. 158-161.
- [20] Сазанов В.П., Чирков А.В., Семёнова О.Ю., Иванова А.В. Моделирование остаточного напряжённого состояния детали в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса PATRAN/ NASTRAN // Вестник СамГТУ. Сер.: Тех-нич. науки. 2012. №1 (33). С. 106-114.
- [21] Сазанов В.П., Кирпичёв В.А., Вакулук В.С., Павлов В.Ф. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. №2 (68). С. 35-40.
- [22] Павлов В.Ф., Сазанов В.П., Вакулук В.С. К вопросу оценки влияния гидродробеструйной обработки на предел выносливости детали по первоначальным деформациям образца-свидетеля // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение, 2019. №1. Т. 21. С. 55-62.
- [23] Радченко В.П., Павлов В.Ф. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений и механические характеристики материала поверхностно упрочнённой детали // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. Самара: СамГТУ, 2010. Ч. 1. С. 249-252.
- [24] 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.
- [25] Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.

THE INFLUENCE OF HYDRO BLASTING ON THE ENDURANCE LIMIT OF SPECIMENS WITH A CUT UNDER BENDING AND STRETCHING-COMPRESSION

**Valentin F. Pavlov,
Viktor A. Kirpichyov,
Vladimir S. Vakulyuk,
Vyacheslav P. Sazanov,
Pavel A. Shlyapnikov**

Samara National Research University
34, Moskovskoye shosse, Samara,
443086, Russian Federation

pavlov.vf@ssau.ru

The hydro blasting influence on an endurance limit of cylindrical specimens with circular cuts of a semicircular profile of 0,3 mm radius under bending and stretching-compression in a case of symmetric cycle has been examined. Specimens of 10 mm diameter for fatigue tests were made of steels 30ХГСА, 12Х18Н10Т, ЭИ961,45 and aluminum alloys В93, Д16Т. The influence of surface hardening on an endurance limit of specimens with cuts was valuated by two criteria: residual stresses on the concentrator surface and the average integral residual stresses calculated through the part's dangerous section surface layer thickness equal the critical depth of a non-propagating fatigue crack.

On results of residual stresses and specimens with cuts endurance limits determination it's been stated that coefficients of surface hardening influence on an endurance limit increase under bending and stretching-compression by two criteria are approximately equal. Besides, the coefficient of the influence by the average integral residual stresses criterion changes within essentially lesser limits than the coefficient of the influence by the residual stresses on the concentrator surface criterion. So the average integral residual stresses criterion should be used for the evaluation of a surface hardening influence on an endurance limit of parts with concentrators.

On an example of specimens within and without peening in a dangerous section it's been shown that peening doesn't influence the endurance limit of a surface hardened part. The compressive residual stresses only influence the endurance limit of these parts.

Keywords: *hydro blasting, specimen with a cut, endurance limit, bending, stretching-compression, symmetric cycle, residual stresses, critical depth of a non-propagating fatigue crack, average integral residual stresses criterion.*

References

- [1] Ivanov, S.I., Pavlov, V.F., (1974) O vliyaniy ostatochnykh napryazheniy i naklepa na ustalostnuyu prochnost' obratzov iz stali 45 [On residual stresses and peening influence on fatigue resistance of specimens made of steel 45]. Voprosy prochnosti elementov aviacionnykh konstrukcij. Kujbyshev: KuAI [Problems of aircraft constructions elements strength. Kuibyshev Aviation Institute], issue 1, pp. 96-100. (in Russian).
- [2] Ivanov, S.I., Pavlov, V.F., (1976) Vliyaniye ostatochnykh napryazheniy na ustalostnuyu prochnost' [Residual stresses influence on fatigue strength]. Problemy prochnosti [Strength problems], no. 5, pp. 25-27. (in Russian).
- [3] Ivanov, S.I., Pavlov, V.F., Prokhorov, A.A., (1988) Vliyaniye ostatochnykh napryazheniy na soprotivleniye ustalosti pri kruchenii v usloviyah koncentracii napryazheniy [Residual stresses influence on fatigue resistance under torsion in stresses concentration conditions]. Problemy prochnosti [Strength problems], no. 5, pp. 31-33. (in Russian).
- [4] Vakulyuk, V.S., (2012) Soprotivleniye ustalosti detali v zavisimosti ot tolshchiny uprochnyonnogo sloya pri ope-rezhayushchem poverhnostnom plasticheskom deformirovani [Fatigue resistance of a part depending on surface layer thickness under outstripping superficial plastic deforming]. Vestnik SGAU [Samara State Aerospace University bulletin], no.3 (34), part 1, pp. 172-176. (in Russian).
- [5] Kirpichyov, V.A., Bukaty, A.S., Chirkov, A.V., (2012) Prognozirovaniye soprotivleniya ustalosti poverhnostno up-rochnyonnykh gladkiykh detalей [Surface hardened smooth parts fatigue resistance prediction]. Izvestiya vuzov. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki [Universities News, Technical Sciences], no.3 (23), pp. 102-107. (in Russian).
- [6] Boguslaev V.A., Muravchenko F.M. (2003) Engineering Support of Operational Features of Turbine Engine Pieces, Zaporozhe.
- [7] Prummer R. Residual stress relief treatment by shock waves / R. Prammer // Metall(Osterr.). 1998 – Vol.52, no. 10-11. P. 633-635.

[8] 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).

[9] Pavlov, V.F., (1988) Vliyanie na predel vynoslivosti velichiny i raspredeleniya ostatochnykh napryazhenij v pover-hnostnom sloe detali s koncentratorom. Soobshchenie I. Sploshnye detali [The influence of residual stresses in a part with a concentrator surface layer value and distribution on the endurance limit. Report 1. Solid parts]. Izvestiya vusov. Mashinostroeniye [Universities News. Mechanical Engineering], no. 8, pp. 22-26. (in Russian).

[10] Pavlov, V.F., (1988) Vliyanie na predel vynoslivosti velichiny i raspredeleniya ostatochnykh napryazhenij v pover-hnostnom sloe detali s koncentratorom. Soobshchenie II. Polye detali [The influence of residual stresses in a part with a concentrator surface layer value and distribution on the endurance limit. Report 2. Hollow parts]. Izvestiya vusov. Mashinostroeniye [Universities News. Mechanical Engineering], no. 12, pp. 37-40. (in Russian).

[11] Pavlov, V.F., Kirpichev, V.A., Vakulyuk, V.S., (2012) Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverhnostno up-rochnyonykh detaley po ostatochnym napryazheniyam [The prediction of surface hardened parts fatigue resistance by residual stresses]. Samara: Izdatel'stvo SNC RAN [Samara: Samara scientific center. Publishing House of the Russian Academy of Sciences], 125 pp. (in Russian).

[12] Ivanov, S.I., Pavlov, V.F., Minin, B.V., Kirpichev, V.A., Kocherov, E.P., Golovkin, V.V., (2015) Ostatochnye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti vysokoprochnykh rez'bovykh detaley [Residual stresses and fatigue resistance of high-strength threaded parts]. Samara: Izdatel'stvo SNC RAN [Samara: Samara scientific center. Publishing House of the Russian Academy of Sciences], 170 pp. (in Russian).

[13] Birger, I.A., (1963) Ostatochnye napryazheniya [Residual stresses]. M.: Mashgiz [Moscow, State Publishing House of Engineering Literature], 232 pp. (in Russian).

[14] 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).

[15] Ivanov, S.I., Grigoryeva, I.V., (1971) K opredeleniyu ostatochnykh napryazhenij v cilindre metodom snyatiya chasti poverkhnosti [On determination of residual stresses in a cylinder by removing a part of surface]. Voprosy prochnosti elementov aviacionnykh konstrukcij. Kujbyshev: KuAI [Problems of aircraft constructions elements strength. Kuibyshev Aviation Institute], issue 48, pp.179-183. (in Russian).

[16] 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).

[17] Ivanov, S.I., Shatunov, M.P., Pavlov, V.F., (1973) Opredeleniye dopolnitel'nykh ostatochnykh napryazhenij v nadrezah na cilindricheskikh detalyah [The determination of additional residual stresses in cuts on cylindrical parts]. Voprosy prochnosti elementov aviacionnykh konstrukcij. Kujbyshev: KuAI [Problems of aircraft constructions elements strength. Kuibyshev Aviation Institute], issue 66, pp. 160-170. (in Russian).

[18] Sazanov, V.P., Chirkov, A.V., Samoylov, V.A., Larionova, Yu.S., (2011) Modelirovanie pereraspredeleniya ostatochnykh napryazhenij v uprochnyonykh cilindricheskikh obrazcah pri operezhayushchem poverhnostnom plasticheskom deformirovani [Modeling of residual stresses redistribution in hardened cylindrical specimens under outstripping superficial plastic deforming]. Vestnik SGAU [Samara State Aerospace University bulletin] no. 3 (27), part 3, pp. 171-174. (in Russian).

[19] Sazanov, V.P., (2012) Issledovanie raspredeleniya komponentov ostatochnogo napryazhyonnogo sostoyaniya v oblasti naimen'shego secheniya poverhnostno uprochnyonnoj detali s kol'cevyim nadrezom metodom konechno-ehlementnogo modelirovaniya [The study of residual strain state components distribution in the area of the smallest section of a surface hardened part with a circular cut by the finite elements modeling method]. Vestnik SGAU [Samara State Aerospace University bulletin], no. 3 (34), pp. 158-161. (in Russian).

[20] Sazanov, V.P., Chirkov, A.V., Semenova, O.Yu., Ivanova, A.V., (2012) Modelirovanie ostatochnogo napryazhy-onnogo sostoyaniya detali v usloviyah koncentracii napryazhenij s ispol'zovaniem programmno kompleksa PATRAN/ NASTRAN [The residual strain state of parts modeling under stress concentration conditions using the calculation program complex NASTRAN/PATRAN]. Vestnik SamGTU [Samara State Technical University bulletin. Part: technical sciences], no. 1 (33), pp. 106-114. (in Russian).

[21] Sazanov, V.P., Kirpichev, V. A., Vakulyuk, V.S., Pavlov, V.F., (2015) Opredelenie pervonachal'nykh deformacij v uprochnyonnom sloe cilindricheskoj detali metodom konechno-ehlementnogo modelirovaniya s ispol'zovaniem raschy-otnogo kompleksa PATRAN/NASTRAN [The determination of initial deformations in the surface layer of a cylindrical part by the finite elements modeling method with use of the calculation program complex PATRAN/NASTRAN]. Vestnik UGATU [Ufa State Aviation Technical University bulletin], vol. 19, no. 2 (68), pp. 35-40. (in Russian).

[22] Pavlov, V.F., Sazanov, V.P., Vakulyuk, V.S., (2019) К вопросу отзенки vliyaniya hidrodobestruynoy obrabotki na predel vynoslivosti detaley po pervonachal'nym deformatziyam obraztza-svidetelya [On hydro blasting influence on the endurance limit of parts by initial deformations of a reference specimen]. Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materi-alovedenie [Perm' national research polytechnic university bulletin. Mechanical Engineering, Materials technology], no.1, vol. 21, pp. 55-62. (in Russian).

[23] Radchenko, V.P., Pavlov, V.F., (2010) Naibol'shaya velichina sjimayutschikh ostatochnyh napryazhenij i mekhanicheskie kharakteristiki materiala poverkhnostno uprochnyonnoj detali [Maximum value of compressive residual stresses and mechanical characteristics of a surface hardened part's material]. Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi. Trudy sed'moj Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Samara: SamGTU [Mathematical modeling and boundary-value problems. Proceedings of the seventh All-Russian scientific conference with international participation. Samara: Samara State Technical University], part. 1, pp. 249-252. (in Russian).

[24] Radchenko, V.P., Pavlov, V.F., (2011) Naibol'shaya velichina sjimayutschych ostatochnyh napryazhenij pri poverkhnostnom 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 [Proceedings 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).

[25] Serensen, S.V., Kogayev, V.P., Shneyderovich, R.M., (1975) Nesutchaya sposobnost' i raschet detaley mashin na prochnost' [Carrying capacity and strength analysis of machine elements]. Moscow: Machinostroyeniye (Mechanical Engi-neering), 488 pp. (in Russian).