



Влияние различных методов поверхностного пластического деформирования на многоцикловую усталость образцов с надрезами

В. Ф. Павлов	доктор технических наук, профессор; кафедра сопротивления материалов Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва, г. Самара; email: pavlov.vf@ssau.ru
В. П. Сазанов	кандидат технических наук, доцент; кафедра сопротивления материалов Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва, г. Самара; email: sazanow@mail.ru
В. С. Вакулюк	доктор технических наук, профессор; кафедра сопротивления материалов Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва, г. Самара; email: vak.v.s@yandex.ru
О. Ю. Семёнова	кандидат технических наук, доцент; кафедра высшей математики Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва, г. Самара; email: ser-alv@yandex.ru
И. Ю. Коваль	аспирант; кафедра сопротивления материалов Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва, г. Самара; email: koval.ilya@list.ru

В работе приведено исследование влияния различных методов поверхностного упрочнения на предел выносливости ряда образцов. В качестве методов поверхностного пластического деформирования использовались: пневмодробеструйная и гидродробеструйная обработки, алмазное выглаживание, а также обкатка роликом. Анализируются партии образцов круглого поперечного сечения из сталей 30ХГСА, 12Х18Н10Т, ЭИ961, 45 и 20 с концентратором напряжений в виде надреза. Диаметр образцов составлял 10 мм. Установлено, что к большему увеличению предела выносливости образцов с надрезом приводят алмазное выглаживание и обкатка роликом. Данные методы упрочнения обеспечивают более полное распределение сжимающих остаточных напряжений по глубине нераспространяющейся трещины усталости, чем при гидродробеструйной и пневмодробеструйной обработках. При одинаковом методе поверхностного упрочнения в образцах из сталей с большим пределом текучести создаются сжимающие остаточные напряжения большей величины, чем в образцах с меньшим пределом текучести. По результатам данного исследования сделан вывод о том, что для оценки предела выносливости для поверхностно упрочнённых образцов с надрезом следует применять критерий среднеинтегральных остаточных напряжений. Критерий следует определять по толщине опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение; предел выносливости; остаточные напряжения; критерий среднеинтегральных остаточных напряжений

Цитирование: Павлов, В. Ф. Влияние различных методов поверхностного пластического деформирования на многоцикловую усталость образцов с надрезами / В. Ф. Павлов, В. П. Сазанов, В. С. Вакулюк, О. Ю. Семёнова, И. Ю. Коваль // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11, №1. – С. 78-86. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-78-86

Введение

В современном машиностроении при производстве деталей машин с целью повышения сопротивления усталости применяются различные методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Использование ППД приводит к образованию сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое деталей, изменению структуры материала и появлению наклёпа. В работе [1] на основании проведённых экспериментов было показано, что на предел выносливости упрочнённых ППД деталей с концентраторами напряжений значительно влияют остаточные напряжения. Для прогнозирования влияния методов поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей и образцов с концентраторами напряжений используются два критерия. Осевые остаточные напряжения σ_z^{nog} в опасном (наименьшем) сечении детали (образца) служат первым критерием. В качестве второго критерия используются среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ocm}$ [2], вычисленные в том же сечении детали (образца). По нижеприведённым формулам оценивается предел выносливости σ_{-1} деталей (образцов) в случае изгиба при симметричном цикле после упрочнения методами ППД:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^0 + \psi_{\sigma} |\sigma_z^{nog}|, \quad (1)$$

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^0 + \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (2)$$

где σ_{-1}^0 – предел выносливости неупрочнённых деталей (образцов), МПа; ψ_{σ} – коэффициент влияния ППД на предел выносливости по критерию σ_z^{nog} ; $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния ППД на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ocm}$;

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

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном (наименьшем) сечении образцов и деталей по толщине поверхностного слоя a , МПа; $\xi = a/t_{кр}$ – линейный размер от текущего слоя до поверхности опасного сечения упрочнённого образца, выражается в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, которая возникает в упрочнённых методами ППД образцах или деталях при напряжении, сопоставимом с пределом выносливости, мм.

На основании большого числа экспериментов в работах [3, 4] для упрочнённых методами ППД деталей и образцов, с учётом разных типов деформаций и концентраторов напря-

жений, установлено следующее: критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости зависит исключительно от размера опасного (наименьшего) поперечного сечения. Для деталей и образцов цилиндрической формы $t_{кр}$ может быть определена по следующей формуле:

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (4)$$

где D – диаметр наименьшего (опасного) сечения детали или образца, мм.

1 Цель исследования

Для анализа возможности прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей было проведено несколько экспериментов. Исследовались упрочнённые методами ППД и неупрочнённые цилиндрические образцы диаметром 10 мм. В качестве концентраторов были круговые надрезы полукруглого профиля с радиусом $R=0,3$ мм. Для образцов были выбраны следующие материалы: 30ХГСА, 12Х18Н10Т, ЭИ961, 45 и 20. Методы упрочнения: пневмодробеструйная (ПДО) и гидродробеструйная (ГДО) обработки, алмазное выглаживание (АВ), обкатка роликом (ОР). Прогнозирование предела выносливости проводилось по среднеинтегральным остаточным напряжениям $\bar{\sigma}_{ост}$ в наименьшем (опасном) сечении образцов и по осевым остаточным напряжениям $\sigma_z^{нов}$ на поверхности наименьшего (опасного) сечения. Механические характеристики материалов образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические характеристики материалов

Материал	Механические характеристики				
	$\sigma_T(\sigma_{0,2})$, МПа	σ_s , МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
30ХГСА	536	788	18,9	65,9	1484
12Х18Н10Т	281	646	50,8	65,6	1444
ЭИ961	992	1090	11,3	67,4	2047
сталь 45	411	757	17,4	39,6	1097
сталь 20	395	522	26,1	65,9	1416

2 Результаты исследования

Часть гладких цилиндрических образцов диаметром 10 мм были подвергнуты пластическому поверхностному упрочнению. Режимы упрочнения подбирались с учётом использования деталей в авиационной технике. Затем на образцы с упрочнением и без упрочнения наносились фасонным резцом круговые надрезы полукруглого профиля, радиус которых составлял $R = 0,3$ мм. При помощи последующего электрополирования производилось удаление наклёпанного слоя в зоне надреза от фасонного реза.

Метод колец и полосок [5] и метод удаления части поверхности образцов [6] применялись для определения остаточных напряжений в гладких образцах, которые упрочнялись ППД. Стоит заметить, что эти два метода определения остаточных напряжений имели хорошую сходимость по результатам. На рисунке 1 показаны эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a для гладких образцов. Эпюры на рисунке 1 демонстрируют, что при упрочнении ГДО на одинаковых режимах в образцах из стали ЭИ961 сжимающие остаточные напряжения выше, чем в образцах из других марок сталей

(рисунок 1, а). Это явление вполне объяснимо, так как сталь марки ЭИ961 обладает бóльшим пределом текучести (таблица 1) по отношению к другим материалам. При упрочнении роликом наблюдается то же самое для образцов из стали 30ХГСА: сжимающие остаточные напряжения больше, чем в образцах из других марок сталей (рисунок 1, б).

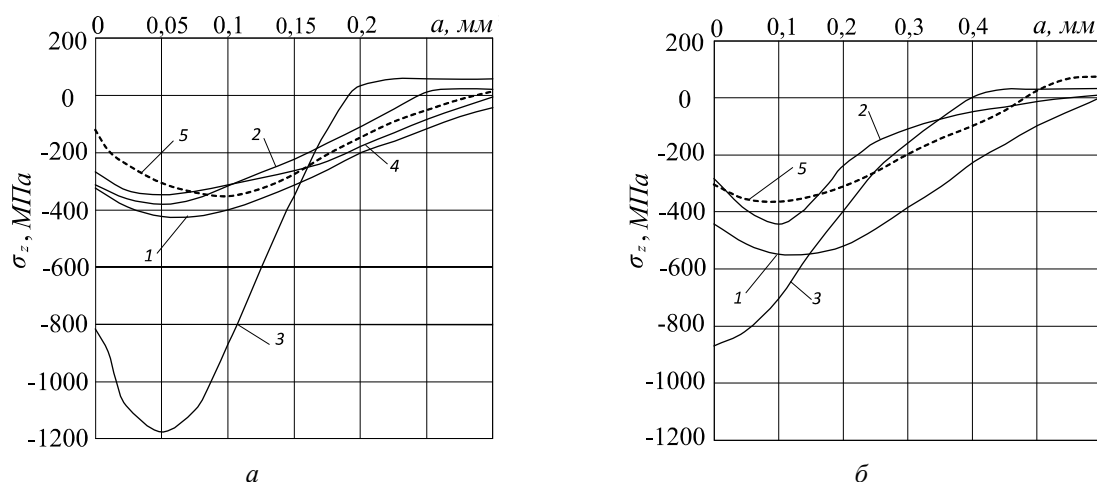


Рисунок 1 – Осевые остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах:

a – после ГДО (1–4); ПДО (5); b – после ОР (1,2,5); АВ (3):

1 – 30ХГСА; 2 – 12Х18Н10Т; 3 – ЭИ961, 4 – сталь 45; 5 – сталь 20

Для упрочнённых образцов с круговым надрезом радиусом $R = 0,3$ мм остаточные напряжения определялись через суммирование остаточных напряжений, которые возникают при нанесении надрезов на поверхность с упрочнением, и остаточных напряжений для гладких образцов. Расчёт дополнительных остаточных напряжений производился аналитическим [7] и численным [8] методами. Значения дополнительных остаточных напряжений являются схожими для двух вышеописанных методов и различаются незначительно.

На рисунке 2 представлены эпюры осевых σ_z остаточных напряжений в опасном сечении (для образцов с надрезами $R=0,3$ мм), распределённых по толщине поверхностного слоя a . В таблице 2 приведены значения остаточных напряжений на поверхности нижней части надреза $\sigma_z^{нов}$.

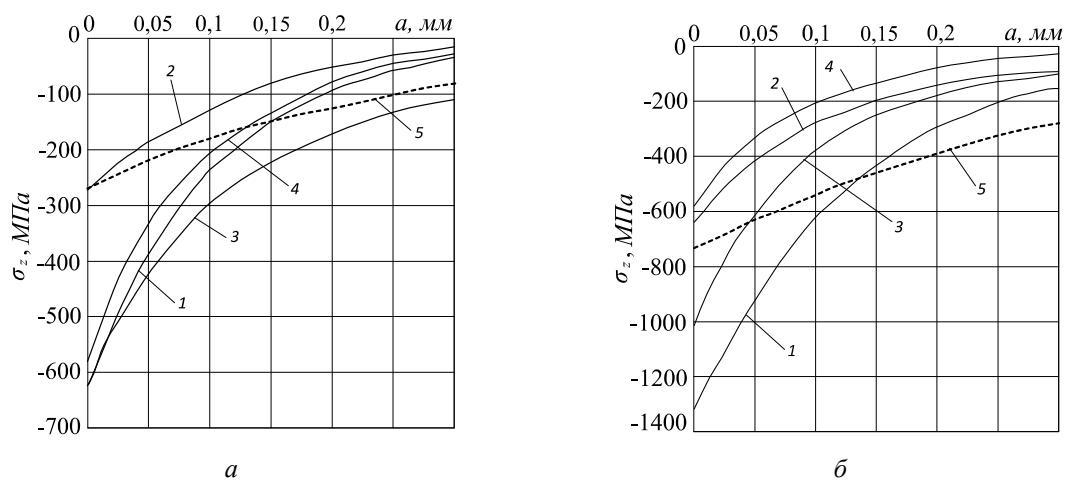


Рисунок 2 – Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезом $R=0,3$ мм:

a – после ГДО (1-4), ПДО (5); b – после ОР (1,2,5), АВ (3):

1 – 30ХГСА, 2 – 12Х18Н10Т, 3 – ЭИ961, 4 – сталь 45, 5 – сталь 20

Таблица 2 – Результаты испытаний образцов с надрезом на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Неупрочнённые образцы σ_{-1}^0 , МПа	Упрочнённые образцы						
		ППД	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
30ХГСА	180	ГДО	270	-620	0,145	0,204	-233	0,386
		ОР	400	-1320	0,167	0,202	-576	0,382
12Х18Н10Т	175	ГДО	220	-268	0,168	0,207	-126	0,356
		ОР	280	-640	0,164	0,198	-273	0,384
ЭИ961	230	ГДО	330	-616	0,163	0,200	-302	0,331
		АВ	380	-1034	0,145	0,198	-408	0,368
сталь 45	155	ГДО	225	-590	0,119	0,197	-204	0,343
сталь 20	110	ПДО	155	-263	0,171	0,203	-126	0,357
		ОР	230	-732	0,164	0,195	-337	0,356

Исходя из данных в таблице 2 следует, что значения осевых остаточных напряжений на поверхности надрезов $\sigma_z^{нов}$ в некоторых случаях выше предела текучести $\sigma_T(\sigma_{0,2})$ и предела прочности σ_σ (таблица 1). Это касается образцов из сталей 30ХГСА и 20. Стоит отметить, что согласно статье [9] при плоском напряжённом состоянии остаточные напряжения в наклёпанном (упрочнённом) слое могут превышать показатели сопротивления разрыву S_k на 15%. В настоящем исследовании этот предел не превышен.

Испытания на усталость проводились на установке МУИ-6000. Эксперименты осуществлялись при изгибе в случае симметричного цикла. Подвергались испытаниям как упрочнённые ППД, так и неупрочнённые образцы с надрезами; база испытаний – 3×10^6 циклов нагружения. В таблице 2 показаны значения пределов выносливости неупрочнённых σ_{-1}^0 и упрочнённых σ_{-1} образцов с надрезами. Выстоявшие базу испытаний упрочнённые образцы испытывались при больших напряжениях до разрушения.

Нераспространяющиеся трещины усталости с глубиной $t_{кр}$, согласно формуле (4), были обнаружены на изломах вышеописанных образцов. В таблице 2 показаны опытные значения $t_{кр}$.

По данным из таблицы 2 видно, что использование методов ППД приводит к значительному увеличению предела выносливости для образцов с надрезом. Алмазное выглаживание и обкатка роликом обеспечивают наибольший прирост предела выносливости. Данный факт объясняется более полным распределением остаточных напряжений сжимающего характера для гладких образцов, упрочнённых этими методами ППД (рисунок 2, б), по сравнению с гидро- и дробеструйной обработками (рисунок 2, а) по толщине поверхностного слоя, равной глубине надреза $R = 0,3$ мм. Остаточные сжимающие напряжения в образцах с надрезами по глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ после ППД обкаткой роликом и алмазным выглаживанием выше, чем после гидро- и пневмодробеструйной обработок и, как следствие, происходит большее увеличение предела выносливости.

При вычислении критерия среднеинтегральных остаточных напряжений по формуле (3) для образцов с надрезами, упрочнённых ППД, использовались эпюры осевых остаточных напряжений, которые отображены на рисунке 2; в таблице 2 приведены значения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$. Согласно данным в таблице 2 можно заметить, что увеличение среднеинтеграль-

ных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ приводит к повышению значений предела выносливости для образцов с надрезами.

Коэффициент влияния ППД на предел выносливости ψ_{σ} по критерию $\sigma_z^{нов}$ (формула (1)) изменяет величину от 0,119 до 0,171 (таблица 2). При этом коэффициент влияния ППД на предел выносливости $\bar{\psi}_{\sigma}$ по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ (формула (2)) изменяется в меньших пределах – от 0,331 до 0,386. Поэтому для прогнозирования предела выносливости при изгибе упрочнённых методами ППД деталей с концентраторами напряжений следует рекомендовать критерий $\bar{\sigma}_{ост}$.

Заключение

1. На основании проведённого исследования видно, что методы ППД (алмазное выглаживание и обкатка роликом) для деталей с надрезами приводят к большему приращению предела выносливости, чем при гидро- и пневмодробеструйной обработках. Этот факт объясняется тем, что распределение сжимающих остаточных напряжений по толщине опасного сечения образцов является более полным.

2. При гидродробеструйной обработке и обкатке роликом на одинаковых режимах остаточные напряжения и глубина их залегания в гладких образцах тем выше, чем выше предел текучести материала, из которого изготовлены образцы.

3. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости для образцов с надрезом по среднеинтегральным остаточным напряжениям $\bar{\sigma}_{ост}$ приводит к меньшему диапазону значений соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ по сравнению с оценкой по критерию осевых $\sigma_z^{нов}$ остаточных напряжений на поверхности опасного сечения, где диапазон значений соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ выше. Поэтому на практике для оценки предела выносливости упрочнённых деталей рекомендуется использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$.

Список использованных источников

1. Иванов, С. И. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.
2. 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
3. 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.
4. Павлов, В. Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, В. С. Вакулук. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
5. Иванов, С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения / С. И. Иванов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций : сб. ст. кафедр „Прочность летательных аппаратов” и „Сопротивление материалов” / Куйбышев : КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32 - 42.
6. Иванов, С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности / С. И. Иванов, И. В. Григорьева // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций : сб. ст. кафедр „Прочность летательных аппаратов” и „Сопротивление материалов” / Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 179-183.

7. 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 : сб. ст. кафедр „Прочность летательных аппаратов” и „Сопrotивление материалов” / Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып. 3. – С. 88-95.

8. Сазанов, В. П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN / В. П. Сазанов, В. А. Кирпичёв, В. С. Вакулюк, В. Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19, №2(68). – С. 35-40.

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

Effect of different surface plastic deformation methods on high-cycle fatigue of notched specimens

V. F. Pavlov	Doctor of Science (Engineering), Professor of Strength of Materials Department of Samara National Research University (Samara University), Samara, Russian Federation; email: pavlov.vf@ssau.ru
V. P. Sazanov	Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of Strength of Materials Department of Samara National Research University (Samara University), Samara, Russian Federation; email: sazanow@mail.ru
V. S. Vakulyuk	Doctor of Science (Engineering), Professor of Strength of Materials Department of Samara National Research University (Samara University), Samara, Russian Federation; email: vak.v.s@yandex.ru
O. Y. Semenova	Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of Further Mathematics Department of Samara National Research University (Samara University), Samara, Russian Federation; email: ser-alv@yandex.ru
I. Y. Koval'	Postgraduate Student of Strength of Materials Department of Samara National Research University (Samara University), Samara, Russian Federation; email: koval.ilya@list.ru

The paper presents a study of the effect of different surface hardening methods on the fatigue limit of a number of specimens. The following surface plastic deformation methods were used: pneumatic shot peening, hydro-shot peening, diamond burnishing, and roller rolling. The analyzed batches of circular cross-section specimens made of 30KhGSA, 12Kh18N10T, EI961, 45, and 20 steels with a stress concentrator in the form of a notch. The specimen diameter was 10 mm. It was found that diamond burnishing and roller rolling resulted in a greater increase in the fatigue limit of notched specimens. These hardening methods ensure a more complete distribution of compressive residual stresses along the depth of a non-propagating fatigue crack than with hydro-shot peening and pneumatic shot peening. With the same method of surface hardening, compressive residual stresses of greater magnitude are created in samples made of steels with a higher yield point than in samples with a lower yield point. Based on the results of this study, it was concluded that the criterion of average integral residual stresses should be used to assess the fatigue limit for surface-hardened notched samples. The criterion should be determined by the thickness of the dangerous section, equal to the critical depth of a non-propagating fatigue crack.

Keywords: surface hardening; fatigue limit; residual stresses; criterion of average integral residual stresses

Citation: Pavlov, V. F., Sazanov, V. P., Vakulyuk, V. S., Semenova, O. Y. and Koval', I. Y. (2025), "Effect of different surface plastic deformation methods on high-cycle fatigue of notched specimens", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 11, no. 1, pp. 78-86. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-78-86. (In Russian; abstract in English)

References

1. Ivanov, S. I. and Pavlov, V. F. (1976), "Residual stresses influence on fatigue strength", *Strength problems*, no. 5, pp. 25-27. (in Russian)

2. Pavlov, V. F. (1986), "On connection between residual stresses and endurance limit under bending in stresses concentration conditions", *Universities News. Mechanical Engineering*, no. 8, pp. 29-32. (in Russian)
3. 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)
4. 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], Samara scientific center. Publishing House of the Russian Academy of Sciences, Samara, 125 pp. (in Russian)
5. Ivanov, S. I. (1971), "On determination of residual stresses in cylinder by rings-and-stripes method. Residual stresses" (1971), *Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruktsiy : sbornik statey kafedr „Prochnost' letatel'nykh apparatov” i „Soprotivlenie materialov”* [Questions of strength of aircraft design elements: collection of articles of departments "Strength of aircraft" and "Strength of materials"], Kuibyshev Aviation Institute, issue 53, pp. 32-42. (in Russian)
6. Ivanov, S. I. and Grigorieva, I. V. (1971), "To determine the residual stresses in the cylinder by removing part of the surface", *Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruktsiy : sbornik statey kafedr „Prochnost' letatel'nykh apparatov” i „Soprotivlenie materialov”* [Questions of strength of aircraft design elements: collection of articles of departments "Strength of aircraft" and "Strength of materials"], Kuibyshev Aviation Institute, issue 48, pp. 179-183. (in Russian)
7. Ivanov, S. I., Shatunov, M. P. and Pavlov, V. F. (1974), "The influence of residual stresses on the endurance of notched specimens", *Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruktsiy : sbornik statey kafedr „Prochnost' letatel'nykh apparatov” i „Soprotivlenie materialov”* [Questions of strength of aircraft design elements: collection of articles of departments "Strength of aircraft" and "Strength of materials"], Kuibyshev Aviation Institute, issue 3, pp. 88-95. (in Russian)
8. Sazanov, V. P., Kirpichev, V. A., Vakulyuk, V. S. and Pavlov, V. F. (2015), "The definition of initial deformations in the cylindrical parts surface layer by Finite Elements Modeling method using PATRAN/NASTRAN program complex", *Vestnik USATU*, vol. 19, no. 2 (68), pp. 35-40. (in Russian)
9. 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)