

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ РАДИАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЁННОМ СЛОЕ

**В.П. Сазанов,  
В.Ф. Павлов,  
В.С. Вакулюк,  
А.В. Письмаров**

Самарский национальный  
исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва  
Московское шоссе, 34,  
г. Самара, Российская Федерация,  
443086  
pavlov.vf@ssau.ru

Проведено исследование влияния первоначальных радиальных деформаций на распределение компонент остаточного напряжённого состояния по толщине упрочнённого слоя при различных видах поверхностного упрочнения. Рассматривались химико-термическая обработка (ХТО) и дробеструйная обработка (ДО) на примере гладких сплошных стальных цилиндрических образцов диаметрами  $D=10$  мм и  $D=25$  мм при линейном распределении первоначальных деформаций по толщине упрочнённого слоя (максимальное значение на поверхности и нулевое на максимальной глубине упрочнения). Расчёты выполнены с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN. Решение проведено в осесимметричной постановке задачи с моделированием остаточного напряжённого состояния методом термоупругости. По результатам исследования установлено, что при ХТО и ДО радиальные напряжения имеют положительные значения по толщине упрочнённого слоя. При этом радиальная составляющая первоначальных деформаций при химико-термической обработке и дробеструйной обработке на распределение окружных и осевых остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя существенного влияния не оказывает. Следовательно, первоначальные радиальные деформации также не играют существенной роли при оценке влияния остаточного напряжённо-деформированного состояния на приращение предела выносливости упрочнённых деталей, определяемого по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений.

**Ключевые слова:** Остаточные напряжения; предел выносливости; упрочнение поверхности; среднеинтегральные остаточные напряжения; первоначальные деформации; химико-термическая обработка; дробеструйная обработка

### 1 Введение

Как известно, предел выносливости упрочнённой детали при использовании критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  [1-3] определяется по формуле:

$$p_R = p_R^0 - \bar{\psi}_p \bar{\sigma}_{ост}, \quad (1)$$

где  $p_R(\sigma_R, \tau_R)$  – предел выносливости упрочнённой детали,  $p_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$  – предел выносливости неупрочнённой детали,  $\bar{\psi}_p$  ( $\bar{\psi}_\sigma$ ,  $\bar{\psi}_\tau$ ) – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ .

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  определяется по следующей зависимости:

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

где  $\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали с концентратором;  $\xi = \frac{y}{t_{кр}}$  – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ . Через  $t_{кр}$  обозначена максимально возможная глубина нераспространяющейся усталостной трещины, возникающей при работе детали на пределе выносливости.

Для оценки влияния сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости детали в расчётах используется теория наибольших касательных напряжений [1]. Учитывая, что после поверхностного упрочнения на поверхности детали  $\sigma_1 = \sigma_r^{ног} = 0$ , а  $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_z^{ног} = \sigma_\theta^{ног}$  (обработка дробью, ультразвуковое упрочнение, химико-термическая обработка (ХТО)) или  $\sigma_2 = \sigma_\theta^{ног}$ ,  $\sigma_3 = \sigma_z^{ног}$  (обкатка роликом, обкатка шариком, алмазное выглаживание), то в этих случаях эквивалентные остаточные напряжения  $\sigma_{ост}^{экв} = \sigma_z$ . Таким образом, для прогнозирования предела выносливости упрочнённой детали требуется только распределение сжимающих осевых остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя.

Известными механическими методами [4,5] в цилиндрических деталях можно определить осевые  $\sigma_z$  и окружные  $\sigma_\theta$  остаточные напряжения по толщине упрочнённого слоя. Радиальные остаточные напряжения  $\sigma_r$  можно определить только лишь аналитическим или численным способом, исходя из определённых соотношений между первоначальными деформациями в зависимости от вида упрочняющей обработки [4]. Из выше изложенного следует, что оценка влияния первоначальных радиальных деформаций на распределение, в первую очередь, осевых остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя представляет определённый научный интерес.

## 2 Методы исследования

Одним из наиболее важных практических способов, применяемых в расчётах по исследованию остаточного напряжённо-деформированного состояния в деталях различной формы, является использование метода так называемых первоначальных

деформаций [4]. Что же такое первоначальные деформации? Они возникают в твёрдом деформируемом теле, в материале которого произошли необратимые изменения линейных размеров. Эти изменения происходят вследствие пластических деформаций, фазовых превращений, термического, химико-термического, радиационного и других воздействий. По изменению линейных размеров свободных от связей и подверженных воздействиям элементов тела и определяются первоначальные деформации [4, 6-9]. В этом случае компоненты тензора первоначальных деформаций не удовлетворяют условиям совместности Сен-Венана и поэтому в сплошной среде данные деформации не могут быть реализованы, так как в ней могут существовать и находиться в равновесии только совместные деформации. Таким образом, после появления первоначальных деформаций в теле возникают препятствующие нарушению условий сплошности силы, которые в итоге представляются в виде самоуравновешенного поля напряжений. Такие напряжения называются остаточными и им соответствуют деформации, которые измеряются на практике с помощью различных методов и способов [4,5]. При этом считается, что остаточные напряжения не превышают предела текучести материала и вызванная ими деформация является упругой. Отметим, что положительные первоначальные деформации в возмущённых частях тела вызывают сжимающие остаточные напряжения, а отрицательные – растягивающие.

Метод первоначальных деформаций имеет аналогию с предложенным ранее С.П. Тимошенко методом начальных напряжений [10]. Весьма важным является сформулированный им вывод о том, что для деформируемых тел задачи о начальных напряжениях и термоупругости имеют аналогию. Это означает, в свою очередь, что в исследованиях остаточного напряжённо-деформированного состояния

первоначальные деформации при определённых условиях можно заменять температурными деформациями.

Развитие современных методов расчёта остаточных напряжений, особенно в упрочнённых деталях, а также разработка методов прогнозирования их предела выносливости потребовали новых подходов к решению этих задач. В настоящее время значительное расширение возможностей исследования остаточного напряжённо-деформированного состояния связано с применением современных расчётных комплексов, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений (NASTRAN, ANSYS).

В данном исследовании для задания условий упрочнения был использован метод первоначальных деформаций, а моделирование остаточного напряжённо-деформированного состояния выполнено методом термоупругости [9-14]. Сущность метода термоупругости заключается в том, что на основании аналогии задач температурных и первоначальных деформаций последние заменяются соответствующим неравномерным температурным полем по толщине упрочнённого слоя детали. Определение параметров температурного поля и соответствующих им первоначальных деформаций выполняется методом последовательных итераций, исходя из распределений остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя, полученных экспериментально одним из механических способов. Критерием завершения подбора первоначальных деформаций является полная аналогия экспериментальных и расчётных эпюр остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя.

Расчёты в проведённом исследовании выполнены с применением расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN. Для сравнения влияния первоначальных радиальных деформаций на распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя цилиндра рассмотрены два варианта их соотношения с осевыми и

окружными первоначальными деформациями после упрочнения поверхности.

### 3 Результаты исследования

Конечно-элементные модели цилиндрических образцов в осесимметричной постановке представляют собой осевое сечение четверти цилиндра с наложением соответствующих граничных условий. При моделировании был использован треугольный шестиузловой осесимметричный конечный элемент типа 2D-Solid [6-8].

Исследование выполнено для двух вариантов задания первоначальных деформаций.

Вариант 1 принят из условия всестороннего объёмного расширения [4]:

$$\varepsilon_{or} = \varepsilon_{o\theta} = \varepsilon_{oz} = \varepsilon_o.$$

Вариант 2 принят из условия радиального приложения нагрузки, вызывающей поверхностное пластическое деформирование в материале, и неизменности начального объёма (несжимаемости) [4]:

$$\varepsilon_{o\theta} = \varepsilon_{oz} = \varepsilon_o, \varepsilon_{or} = -2\varepsilon_o.$$

Приведенные выше параметры  $\varepsilon_{or}$ ,  $\varepsilon_{o\theta}$ ,  $\varepsilon_{oz}$  – это соответственно радиальные, окружные и осевые первоначальные деформации.

В расчётах были приняты следующие численные значения параметров: модуль продольной упругости  $E = 200000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ . Первоначальная деформация задана по линейному закону распределения:  $\varepsilon_o = 0,0025$  на поверхности цилиндрического образца и  $\varepsilon_o = 0$  на нижней границе упрочнённого слоя, толщина которого составляет 0,4 мм.

Результаты расчётов распределения радиальных  $\sigma_r$ , окружных  $\sigma_\theta$ , осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  в цилиндрических

образцах диаметрами  $D=10$  мм и  $D=25$  мм для вариантов упрочнения 1 и 2 приведены на рисунках 1-3.

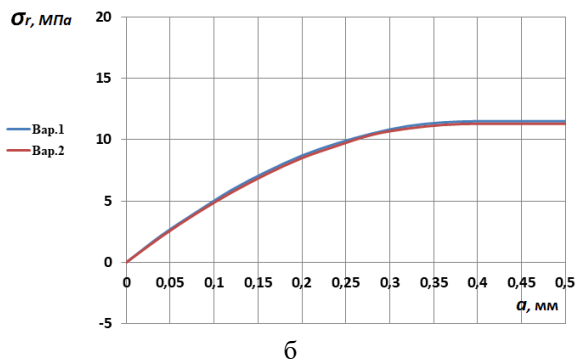
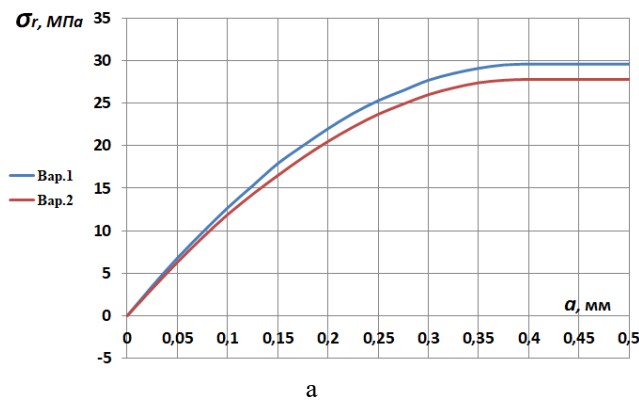


Рисунок 1. Распределение радиальных  $\sigma_r$  остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя цилиндрического образца: а –  $D = 10$  мм, б –  $D = 25$  мм

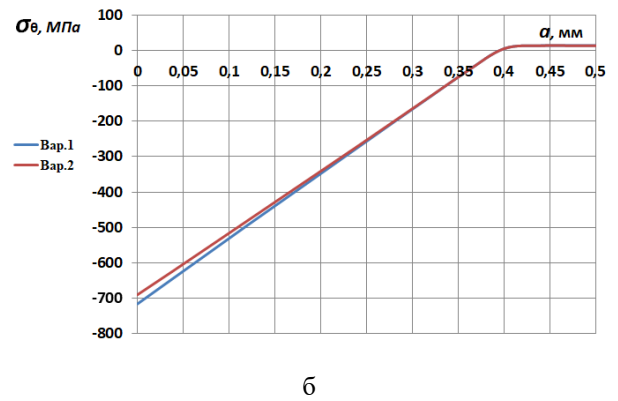
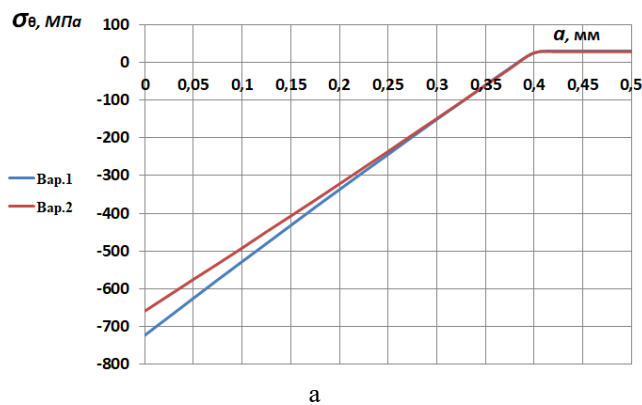


Рисунок 2. Распределение окружных  $\sigma_\theta$  остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя цилиндрического образца: а –  $D = 10$  мм, б –  $D = 25$  мм

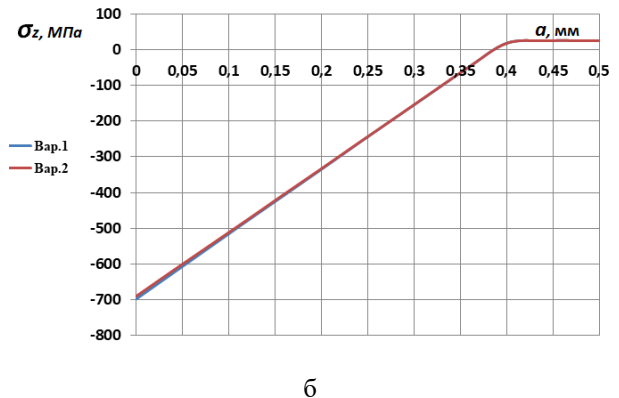
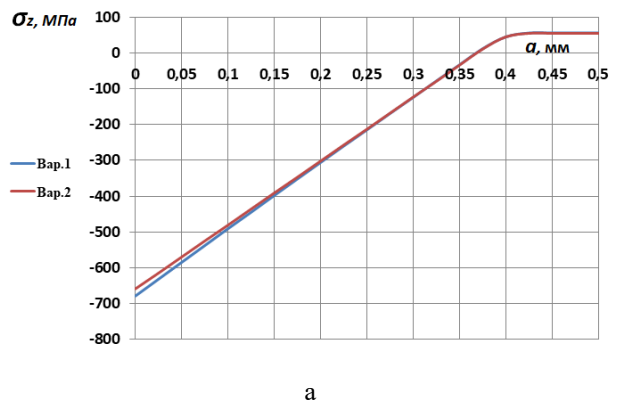


Рисунок 3. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя цилиндрического образца: а –  $D = 10$  мм, б –  $D = 25$  мм

#### 4 Выводы

Анализ приведённых на рис. 1-3 результатов расчёта распределения остаточных напряжений позволяет сделать ряд важных выводов, которые будут

характерными и для многих видов поверхностного упрочнения деталей.

4.1 Радиальные остаточные напряжения  $\sigma_r$  по толщине упрочнённого поверхностного слоя (рис. 1) являются растягивающими, а их максимальная величина по модулю не превышает 5% от максимальной величины осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений. При этом с увеличением диаметра цилиндра уменьшается величина радиальных напряжений, а также различие между их распределением для рассматриваемых вариантов соотношения первоначальных деформаций. Максимальное различие между наибольшими значениями радиальных напряжений для рассматриваемых случаев в упрочнённом слое составляет 6,5% для диаметра цилиндра  $D = 10$  мм и 1,8% для  $D = 25$  мм.

4.2 Исходя из графиков рис. 2-3, следует отметить, что первоначальные радиальные деформации наибольшее влияние оказывают на распределение окружных остаточных напряжений  $\sigma_\theta$ , чем на распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_z$ . Наибольшее различие для вариантов 1 и 2 составляет:

- по окружным остаточным напряжениям 9,7% для  $D = 10$  мм и 3,0% для  $D = 25$  мм;
- по осевым остаточным напряжениям 3,8% для  $D = 10$  мм и 1,1% для  $D = 25$  мм.

4.3 С увеличением диаметра цилиндрического образца различие между соответствующими остаточными напряжениями для рассматриваемых вариантов соотношения первоначальных деформаций при упрочнении существенно снижается. Смена с отрицательного знака в упрочнённом слое на положительный в сердцевине для окружных и осевых остаточных напряжений в образцах диаметром  $D = 10$  мм происходит на несколько меньшей глубине, чем в образцах диаметром  $D = 25$  мм. Эта закономерность объясняется разницей в соотношениях жёсткостей упрочнённого поверхностного

слоя со сжимающими остаточными напряжениями и сердцевиной цилиндра с реактивными растягивающими остаточными напряжениями.

4.4 Рассмотренный в данном исследовании диапазон изменения первоначальных радиальных деформаций от  $\varepsilon_{or} = -2\varepsilon_o$  до  $\varepsilon_{or} = \varepsilon_o$  относительно первоначальной осевой деформации  $\varepsilon_{oz} = \varepsilon_o$  охватывает их соотношения практически для всех остальных видов поверхностного упрочнения деталей. Поэтому из выше изложенного следует, что величина первоначальных радиальных деформаций не оказывает существенного влияния на распределение осевых остаточных напряжений и, что весьма важно, на величину среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ , используемых в качестве критерия влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей.

#### Список использованных источников

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Павлов В. Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, В. С. Вакулюк. - Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. - 125 с.
- [4] Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. - М.: Машгиз, 1963. - 232 с.
- [5] Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения / С. И. Иванов. - Куйбышев: КуАИ, 1971. - Вып. 53. - С. 32-42.
- [6] 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.

[7] Сазанов В. П. Исследование распределения компонентов остаточного напряжённого состояния в области наименьшего сечения поверхностно упрочнённой детали с кольцевым надрезом методом конечно-элементного моделирования / В. П. Сазанов // Вестник СГАУ. - 2012. - № 3(34). - С. 158-161.

[8] Сазанов В. П. Моделирование остаточного напряжённого состояния детали в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса PATRAN/ NASTRAN / В. П. Сазанов, А. В. Чирков, О. Ю. Семёнова, А. В. Иванова // Вестник СамГТУ: Технич. науки. - 2012. - №1 (33). - С. 106-114.

[9] Павлов В. Ф. Влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости цилиндрических деталей различного диаметра / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, В. С. Вакулюк, В. П. Сазанов // Известия вузов. Авиационная техника. - 2014. - №3. - С. 324-326.

[10] Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. - М.: Наука, 1979. - 341 с.

[11] Радченко В. П. Исследование влияния анизотропии поверхностного пластического

упрочнения на распределение остаточных напряжений в полых и сплошных цилиндрических образцах / В. П. Радченко, В. Ф. Павлов, М. Н. Саушкин // Вестник Пермского национального исследовательского университета: Механика. - 2015. №1. - С. 130-147. doi: 10.15593.perm/mech/2015.1.09

[12] Саушкин М. Н. Метод расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учётом анизотропии процесса поверхностного упрочнения / М. Н. Саушкин, В. П. Радченко, В. Ф. Павлов // ПМТФ. - 2011. - Т. 52. - № 2. - С. 173-182.

[13] Виндокуров И. В. К вопросу о реконструкции остаточных напряжений и деформаций пластины после дробеструйной обработки / И. В. Виндокуров, А. В. Владыкин, И. Э. Келлер, Д. С. Петухов, В. В. Плюснин, В. Н. Трофимов // Вестник Самарского государственного технического университета: Физмат науки. - 2018. - Т. 22. - № 3. - С. 40-64. doi: 10.14498/vsgtu1602

[14] Радченко В. П. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин. - М.: Машиностроение –1. - 2005. - 226 с.

## THE INFLUENCE OF INITIAL RADIAL DEFORMATIONS ON THE RESIDUAL STRESSES DISTRIBUTION IN THE HARDENED LAYER

Vyacheslav P. Sazanov,  
Valentin F. Pavlov,  
Vladimir S. Vakulyuk,  
Andrej V. Pismarov

Samara National  
Research University  
34, Moskovskoe shosse, Samara,  
443086, Russian Federation  
[pavlov.vf@ssau.ru](mailto:pavlov.vf@ssau.ru)

*The study of the initial radial deformations influence on the residual strained state components distribution through the hardened layer thickness under various types of surface hardening has been conducted. Chemical thermal machining (CTM) and shot blasting (SB) have been examined on the example of smooth solid steel cylindrical specimens with diameters  $D=10$  mm and  $D=25$  mm under a linear distribution of initial deformations through the hardened layer thickness (the maximum value is on the surface and zero on the maximum depth of hardening). The calculation has been conducted with use of the program complex PATRAN/NASTRAN. The solution has been carried out in axial symmetric positing by thermo elasticity method. On study results it's been stated that the radial stresses through the hardened layer thickness under CTM and SB are positive. Incidentally the radial component of initial deformations under chemical thermal machining and shot blasting doesn't exercise essential influence on the radial and axial residual stresses distribution through the hardened layer thickness. Hence the initial radial deformations haven't much significance at the evaluation of the residual strained stress state influence on the hardened parts endurance limit increment calculated by the average integral residual stresses criterion.*

**Key words:** Residual stresses; endurance limit; surface hardening; average integral residual stresses; initial deformations; chemical-thermal machining; shot-blasting

## References

- [1] Pavlov, V.F. (1986), "O svyazi ostatochnyh 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.
- [2] Pavlov, V.F. (1988), "Vliyanie na predel vynoslivosti velichiny i raspredeleniya ostatochnyh napryazhenij v poverhnostnom sloe detali s koncentratorom. Soobshchenie I. Sploshnye detaili" [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.
- [3] Pavlov, V.F., Kirpichev, V.A. and Vakulyuk, V.S. (2012), *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverhnostno uprochnyonnyh detalej po ostatochnym napryazheniyam* [The prediction of surface hardened parts fatigue resistance by residual stresses]. Samara: Izdatel'stvo SNC RAN [Samara: Samara scientific centre Publishing House of the Russian Academy of Sciences], 125 pp.
- [4] Birger, I.A. (1963), *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses], Mashgiz, Moscow, Russia, 232 pp.
- [5] Ivanov, S.I. (1971), "K opredeleniyu ostatochnyh 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.
- [6] Sazanov, V.P., Kirpichev, V. A., Vakulyuk, V.S. and Pavlov, V.F. (2015), "Opredelenie pervonachal'nyh deformatsij v uprochnyonnom sloe cilindricheskoj detali metodom konechno-ehlementnogo modelirovaniya s ispol'zovaniem raschyotnogo 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, Issue 68, pp. 35-40.
- [7] Sazanov, V.P. (2012), "Issledovanie raspredeleniya komponentov ostatochnogo napryazhyonnogo sostoyaniya v oblasti naimen'shego secheniya poverhnostno uprochnyonnoj detali s kol'cevim 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, Issue 34, pp. 158-161.
- [8] Sazanov, V.P., Chirkov, A.V., Semenova, O.Yu. and Ivanova, A.V. (2012), "Modelirovanie ostatochnogo napryazhyonnogo sostoyaniya detali v usloviyah koncentracii napryazhenij s ispol'zovaniem programmogo 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, Issue 33, pp. 106-114.

[9] Pavlov, V.F., Kirpichev, V. A., Vakulyuk, V.S. and Sazanov, V.P. (2014), “Vliyanie poverhnostnogo uprochneniya na predel vynoslivosti cilindricheskikh detalej razlichnogo diametra” [The influence of surface hardening on the endurance limit of cylindrical parts of various diameter], *Izvestiya vusov* [Universities News. Aviation technique], no. 3, pp. 324-326.

[10] Timoshenko, S.P. and Goodier, G. (1979), *Teoriya uprugosti* [Elastic theory], Science, Moscow, Russia, 341 p.

[11] Radchenko, V.P., Pavlov, V.F. and Saushkin, M.N. (2015), “Issledovanie vliyaniya anizotropii poverhnostnogo plasticheskogo uprochneniya na raspredelenie ostatochnyh napryazhenij v polyh i sploshnyh cilindricheskikh obrazcakh” [The study of surface plastic hardening anisotropy influence on residual stresses distribution in hollow and solid cylindrical specimens], *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta. Mekhanika* [Perm' national research university bulletin. Mechanics], no.1, pp. 130-147. doi: 10.15593.perm/mech/2015.1.09

[12] Saushkin, M.N., Radchenko, V.P. and Pavlov, V.F. (2011), ‘Metod raschyota polej ostatochnyh napryazhenij i plasticheskikh deformacij v cilindricheskikh obrazcah s uchyotom anizotropii processa poverhnostnogo uprochneniya” [The method of residual stresses fields' and plastic deformations in cylindrical specimens calculation taking into account surface hardening anisotropy], *PMTF* [Applied mathematics and technical physics], vol. 52, no. 2, pp. 173-182.

[13] Vindokurov, I.V., Vladykin, A.V., Keller, I.E., Petukhov, D.S., Plyusnin, V.V. and Trofimov, V.N. (2018), “K voprosu o rekonstrukcii ostatochnyh napryazhenij i deformacij plastiny posle drobestrujnoj obrabotki” [On a residual stresses and deformations of a plate reconstruction after shot blasting], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Fizmat nauki* [Samara State Technical University], vol. 22, no. 3, pp. 40-64. doi: 10.14498/vsgtu1602

[14] Radchenko, V.P. and Saushkin, M.N. (2005), *Polzuchest' i relaksaciya ostatochnyh napryazhenij v uprochnyonykh konstrukciyah* [Creep and relaxation of residual stresses in hardened constructions], Mechanical Engineering – 1, Moscow, Russia, 226 pp.