

Павлов В.Ф., Сазанов В.П., Вакулюк В.С. К вопросу оценки влияния гидродробеструйной обработки на предел выносливости деталей по первоначальным деформациям образца-свидетеля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 55–62. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.08

Pavlov V.F., Sazanov V.P., Vakulyuk V.S. On the evaluation of hydro blasting influence on the endurance limit of parts by the initial deformations of reference specimen. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 55–62. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.08

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 1, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.08
УДК 629.7.036

В.Ф. Павлов, В.П. Сазанов, В.С. Вакулюк

Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королёва (Самарский университет), Самара, Россия

**К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ
НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПО ПЕРВОНАЧАЛЬНЫМ ДЕФОРМАЦИЯМ
ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ**

В современном машиностроении широко применяются различные методы поверхностного упрочнения, которые приводят к существенному повышению сопротивления усталости деталей, особенно в условиях концентрации напряжений. Многочисленными экспериментами установлено, что основную роль в повышении сопротивления усталости упрочненных деталей играют сжимающие остаточные напряжения, наведенные в поверхностном слое опасного сечения при упрочняющей обработке. Ввиду этого для прогнозирования характеристик сопротивления усталости упрочненных деталей необходимо знать распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения, так как на характеристики сопротивления усталости оказывает влияние не только величина, но и характер распределения остаточных напряжений в опасном сечении деталей. Для определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя приходится пользоваться механическими методами, связанными с разрушением деталей. В связи с этим необходимо разрабатывать методы определения остаточных напряжений, которые не приводят к разрушению деталей. Одним из таких методов является использование образцов-свидетелей, применяемых для контроля качества упрочнения деталей.

На примере сплошных и полых цилиндрических деталей с концентраторами напряжений из стали 30ХГСА, подвергнутых гидродробеструйной обработке одновременно с образцами-свидетелями, показано, что по первоначальным деформациям образцов-свидетелей представляется возможным рассчитывать остаточные напряжения в упрочненных деталях. Различие между наибольшими значениями остаточных напряжений, определенными расчетным и экспериментальным методами, не превышало 10 %. По распределению остаточных напряжений в гладких деталях вычислялись остаточные напряжения в деталях с концентраторами, по которым прогнозировалось приращение предела выносливости этих деталей за счет упрочнения гидродробеструйной обработкой. Установлено, что расчетные и экспериментальные значения приращения пределов выносливости различаются не более чем на 5 %. Это позволяет рекомендовать применение образцов-свидетелей для прогнозирования предела выносливости упрочненных дробью деталей с концентраторами напряжений из стали 30ХГСА.

Ключевые слова: гидродробеструйная обработка, прогнозирование сопротивления усталости, деталь с концентратором, сталь 30ХГСА, опасное сечение, образец-свидетель, первоначальные деформации, остаточные напряжения, предел выносливости, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

V.F. Pavlov, V.P. Sazanov, V.S. Vakulyuk

Samara National Research University (Samara University), Samara, Russian Federation

**ON THE EVALUATION OF HYDRO BLASTING INFLUENCE ON THE ENDURANCE LIMIT
OF PARTS BY THE INITIAL DEFORMATIONS OF REFERENCE SPECIMEN**

Various methods of surface hardening leading to the essential rising of part's fatigue resistance especially under stress concentration conditions are widely applied in modern mechanical engineering. It's experimentally stated that compressive residual stresses made in a surface layer of a dangerous section under surface hardening play a main part in rising of hardened parts fatigue resistance. So it's necessary to know a residual stresses distribution through a surface layer thickness of a dangerous section for a prediction of hardened parts fatigue resistance characteristics because the value as well as the character of residual stresses distribution in a dangerous have an influence on fatigue resistance characteristics. Mechanical methods leading to parts destruction are had to be used for a definition of residual stresses through a surface layer thickness. In this connection it's necessary to work out methods of residual stresses definition that don't lead to the parts destruction. One of these methods is the employment of reference specimens which are applied for the control of parts hardening quality.

On example of solid and hollow cylindrical parts made of steel 30 XГСА with stress concentrators hardened by hydro blasting simultaneously with reference specimens it's been shown that the calculation of residual stresses in hardened parts is possible when the initial deformations of reference specimen are used. The difference between residual stresses found by calculated and experimental methods doesn't exceed 10 %.

The residual stresses in parts with concentrators have been calculated using residual stresses in smooth parts. Then the endurance limit increment of these hardened by hydro blasting parts has been predicted by these residual stresses. It's established that calculated and experimental values of endurance limit increment differ no more than 5 %. So the reference specimens' employment can be recommended for the endurance limit prediction of parts made of steel 30ХГСА with concentrators.

Keywords: hydro blasting, prediction of fatigue resistance, part with a concentrator, steel 30ХГСА, dangerous section, reference specimen, initial deformations, residual stresses, endurance limit, the average integral residual stresses criterion.

Введение

Повышение надежности и долговечности деталей машин является одной из важнейших задач, комплексное и системное решение которой сопровождается, как правило, созданием и эксплуатацию всех изделий современной техники. Известно, что основные виды разрушения деталей машин составляют усталостные поломки, которые приводят к тяжелым последствиям, так как возникают внезапно.

Одной из основных характеристик деталей машин по сопротивлению усталости является предел выносливости, прогнозируемое значение которого в значительной мере зависит от достоверности расчетов, выполненных на этапах проектирования и разработки конструкторской документации. Ввиду этого выбор конструкции, материалов, геометрических параметров деталей с концентраторами напряжений, технологии изготовления представляет собой весьма сложную задачу.

В этих условиях существенно возросло значение расчетно-теоретического и расчетно-экспериментального анализа эксплуатационных характеристик конструкций и деталей. Достижения современной вычислительной (компьютерной) техники обеспечили материальную базу для становления и быстрого развития математического моделирования. Кроме того, появились реальные предпосылки для использования математических моделей не только в качестве расчетного сопровождения на стадии отработки конструктивных решений, но и при проектировании, подборе и оптимизации технологических и эксплуатационных режимов, анализа надежности и прогнозирования отказов и аварийных ситуаций, а также при оценке возможности форсирования характеристик и модернизации изделий.

В настоящее время для моделирования сложных процессов, протекающих в физических объектах, используются вычислительные программные комплексы. Их применение дает возможность проведения многофункционального численного эксперимента для плоских или трехмерных моделей объектов с учетом взаимного влияния протекающих процессов.

Теоретические исследования

В данной работе для исследования распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя и его влияния

на повышение предела выносливости деталей использован расчетно-экспериментальный метод, основными задачами которого являются прогнозирование приращения предела выносливости за счет поверхностного упрочнения, а также оптимизация технологических процессов упрочнения. Основной расчетной базой данного метода является конечно-элементное моделирование с применением комплекса PATRAN/NASTRAN, а в экспериментальную часть входит использование механических методов определения распределения остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя.

Методы определения остаточных напряжений в упрочненных деталях или образцах разделяются обычно на механические и физические [1]. Механические методы основаны на принципе упругой разгрузки объема детали (образца) при ее освобождении от остаточных напряжений. К ним относят метод полосок, метод колец и полосок, метод обтачивания, метод растачивания, метод удаления части поверхности и ряд других. Физические методы основаны на замерах изменений физических свойств материалов в зависимости от степени упругого деформирования. В отличие от механических, физические методы не связаны с обязательным разрушением образца или детали. Несмотря на это достоинство, следует отметить, что точное распределение остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя можно получить только лишь с помощью механических методов с разрушением детали или образца.

Объекты и методика исследования

Примененный в данном исследовании расчетно-экспериментальный метод с использованием образцов-свидетелей и современных расчетных комплексов, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений, позволяет сохранить исследуемую деталь и получить распределение остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя в любом ее сечении. В этом случае при определении остаточных напряжений механическими методами разрушению подвергается только образец-свидетель. В производстве образцы-свидетели традиционно используются для контроля технологических процессов упрочнения деталей различными способами поверхностного пластического деформирования (ППД). Такой образец, имеющий определенную

форму и размеры, проходит весь технологический цикл обработки вместе со штатной деталью.

В основе вышеуказанного расчетно-экспериментального метода лежит известное положение о том, что обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при ППД получают одинаковые первоначальные деформации. Однако во всех случаях практического применения это положение требует проведения тщательной экспериментальной и расчетной проверки. В рамках данной работы было проведено исследование результатов испытаний на усталость и экспериментальное определение остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя нескольких партий цилиндрических образцов с надрезами из стали 30ХГСА [2]. Исследуемые партии образцов (рис. 1) с наружным D и внутренним d диаметрами имели следующие размеры: $D/d = 10/0$; $15/0$; $15/5$; $15/10$ мм/мм.

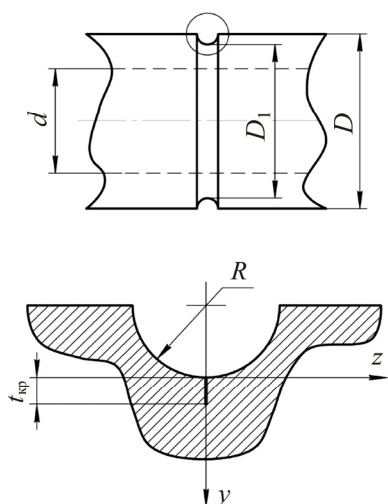


Рис. 1. Цилиндрический образец и нераспространяющаяся трещина усталости

Гладкие образцы до нанесения надрезов подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО) дробью диаметром 2 мм в среде масла при давлении 0,28 МПа. В качестве образца-свидетеля при проведении исследований вышеуказанных партий образцов использовались цилиндрические втулки с размерами 51,5/45 мм/мм, которые обычно применяются для определения остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя методом колец и полосок [3].

Расчетная часть исследований выполнялась методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя выполнялось методом термоупругости [1, 4–6]. При проведении расчетов были приняты следующие допущения:

– все исследуемые гладкие образцы и образец-свидетель при упрочнении получали одинаковые изотропные первоначальные деформации;

– деформации сдвига малы и при определении первоначальных деформаций они не учитывались.

Расчеты выполнялись в следующей последовательности:

– определение первоначальных деформаций на конечно-элементной модели образца-свидетеля (втулки) с размерами 51,5/45 мм/мм;

– расчет распределения остаточных напряжений в исследуемых гладких образцах по полученным значениям первоначальных деформаций образца-свидетеля;

– сравнение расчетных распределений остаточных напряжений в гладких образцах с их экспериментальными распределениями, полученными в работе [2].

При определении первоначальных деформаций после ГДО в конечно-элементной модели образца-свидетеля исходными данными являлось экспериментально определенное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a упрочненного поверхностного слоя, полученное в образце-свидетеле методом колец и полосок (рис. 2).

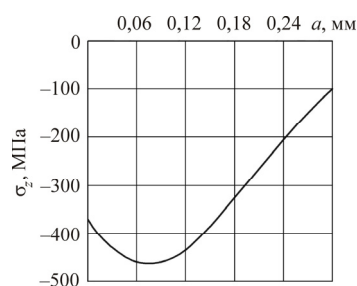


Рис. 2. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образце-свидетеле диаметром 51,5/45 мм/мм после ГДО

Следующий этап расчета выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых гладких образцов по первоначальным деформациям образца-свидетеля. Известно [2, 7–10], что при оценке приращения предела выносливости определяющими являются осевые остаточные напряжения. Исходя из этого сравнение расчетных и экспериментальных распределений остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя для исследуемых образцов выполнено по осевому компоненту. Результаты экспериментального [2] и расчетного распределений остаточных напряжений σ_z по толщине поверхностного слоя для исследуемых гладких образцов приведены на рис. 3.

Из приведенных на рис. 3 данных видно, что максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями наибольших сжимающих осевых остаточных напряжений составляет 10 % при $D/d = 10/0$ мм/мм, в остальных случаях расхождение не превышает 2 %. Ввиду этого на основании полученных результатов следует сделать вывод о том, что использованный расчетно-экспериментальный метод определения остаточных напряжений в исследованных образцах из стали 30ХГСА после ГДО по первоначальным деформациям образца-свидетеля вполне обоснован

и может быть рекомендован для применения на практике.

На неупрочненные и упрочненные гладкие образцы перед испытаниями на усталость наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиусом $R = 0,3$ мм (см. рис. 1). Осевые σ_z остаточные напряжения по толщине a наименьшего (опасного) сечения образцов определялись аналитическим [11, 12] и численным [13, 14] методами. Распределения осевых σ_z остаточных напряжений в опасном сечении образцов с надрезом $R = 0,3$ мм представлены на рис. 4.

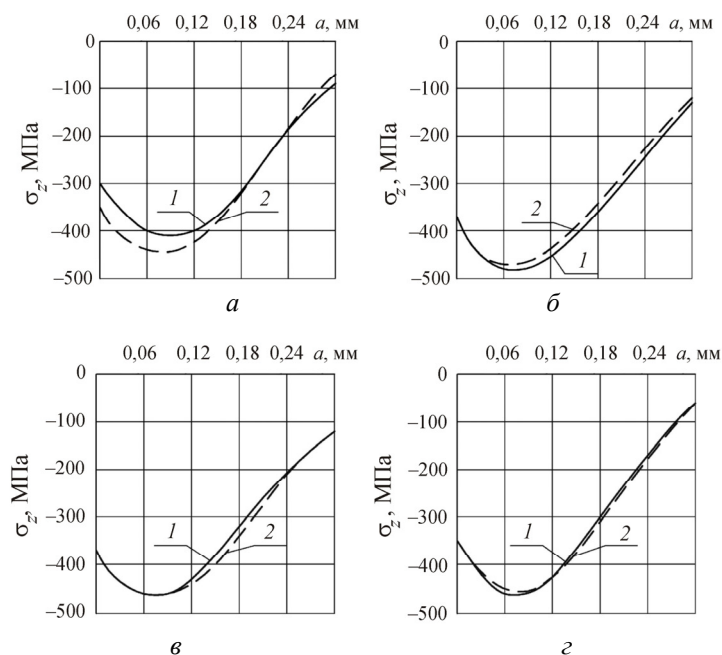


Рис. 3. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений, определенных экспериментальным (1) и расчетным (2) методами, в гладких цилиндрических образцах после ГДО: а – $D/d = 10/0$ мм/мм; б – $D/d = 15/0$ мм/мм; в – $D/d = 15/5$ мм/мм; г – $D/d = 15/10$ мм/мм

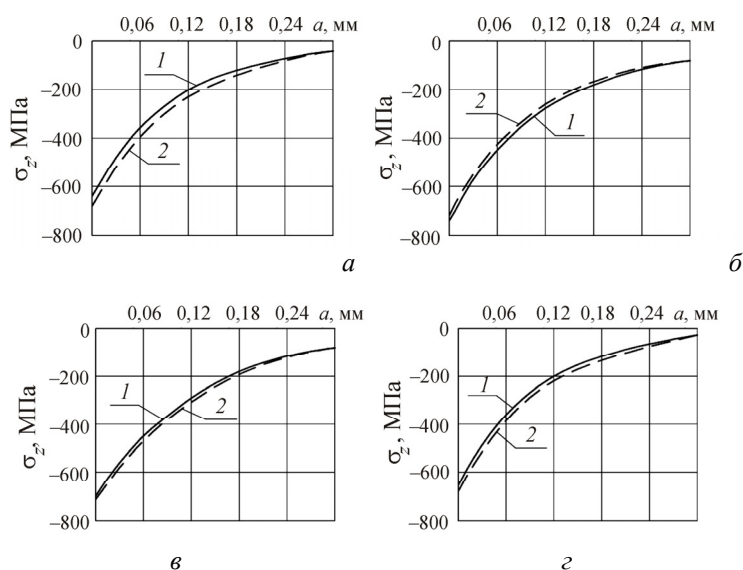


Рис. 4. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в опасном сечении упрочненных образцов с надрезом $R = 0,3$ мм, рассчитанных по экспериментальным (1) и расчетным (2) остаточным напряжениям гладких образцов: а – $D/d = 10/0$ мм/мм; б – $D/d = 15/0$ мм/мм; в – $D/d = 15/5$ мм/мм; г – $D/d = 15/10$ мм/мм

Из представленных на рис. 4 данных видно, что расхождение по наибольшим значениям сжимающих остаточных напряжений в образцах с надрезом $R = 0,3$ мм, вычисленным по экспериментальным и расчетным распределениям остаточных напряжений гладких образцов, не превышает 6 % ($D/d = 10/0$ мм/мм).

Прогнозирование предела выносливости

Полученные расчетным методом распределения осевых остаточных напряжений (см. рис. 4) использовались для оценки влияния гидродробеструйной обработки на приращение предела выносливости образцов с надрезами при изгибе в случае симметричного цикла $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$ с применением критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ [2, 15–18] по следующей формуле:

$$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}} = \bar{\Psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{\text{ост}}|, \quad (1)$$

где $\bar{\Psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$;

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

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца по толщине поверхностного слоя a ; ξ – расстояние от поверхности опасного сечения образца до текущего слоя, выраженное в долях $t_{\text{кр}}$, $\xi = a/t_{\text{кр}}$, $t_{\text{кр}}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в опасном сечении упрочненного образца (детали) при работе на пределе выносливости.

На основании многочисленных экспериментальных данных для образцов и деталей из различных материалов с различными концентраторами напряжений в работе [19] было установлено, что коэффициент $\bar{\Psi}_{\sigma}$ зависит только от степени концентрации напряжений и вычисляется для случая изгиба по следующей формуле:

$$\bar{\Psi}_{\sigma} = 0,612 - 0,081\alpha_{\sigma},$$

где α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который определялся по данным справочника [20] и представлен в таблице.

В работах [2, 16, 21] установлено, что критическая глубина $t_{\text{кр}}$ нераспространяющейся трещины усталости не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации, асимметрии цикла напряжений и определяется только размерами опасного поперечного сечения. Для цилиндрических образцов и деталей зависимость для $t_{\text{кр}}$ имеет следующий вид [2, 21]:

$$t_{\text{кр}} = 0,0216D_1 \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D_1} \right)^3 \right], \quad (3)$$

где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали, d – диаметр отверстия образца или детали (см. рис. 1). Расчетные значения $t_{\text{кр}}$, вычисленные по формуле (3), приведены в таблице.

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, значения которого представлены в таблице, вычислялся по формуле (2) по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами, равной критической глубине $t_{\text{кр}}$ нераспространяющейся трещины усталости. При расчете критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ использовались распределения осевых σ_z остаточных напряжений в образцах с надрезами $R = 0,3$ мм, приведенные на рис. 4.

После вычисления критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ и коэффициента $\bar{\Psi}_{\sigma}$ по формуле (1) определялись расчетные значения приращения пределов выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$ упрочненных гидродробеструйной обработкой образцов с надрезами радиусом $R = 0,3$ мм (см. таблицу) и сравнивались с экспериментальными значениями $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$, приведенными в работе [2].

Расчетные и экспериментальные значения пределов выносливости образцов с надрезами

D , мм	d , мм	D_1 , мм	α_{σ}	$\bar{\Psi}_{\sigma}$	$t_{\text{кр}}$, мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$, МПа	Расхождение, %
10	0	9,4	2,7	0,393	0,203	–240	94	90	5
15	0	14,4	2,8	0,385	0,311	–196	75,5	77,5	3
15	5	14,4	2,8	0,385	0,303	–211	81,3	77,5	5
15	10	14,4	2,9	0,377	0,249	–218	82,1	80	3

Из представленных в таблице данных видно, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями приращения пределов выносливости за счет ГДО не превышает 5 %. Таким образом, используя результаты определения осевых остаточных напряжений в образцах-свидетелях, можно прогнозировать предел выносливости упрочненных гидродробеструйной обработкой цилиндрических деталей из стали 30ХГСА в условиях концентрации напряжений с достаточной для многоциклового усталости точностью.

Выводы

Проведенное исследование показало, что для прогнозирования предела выносливости упрочненных гидродробеструйной обработкой цилиндрических деталей с концентраторами напряжений из стали 30ХГСА представляется возможным использовать образцы-свидетели, обработанные одновременно с деталями. Далее по полученному распределению этих напряжений можно вычислить критерий среднеинтегральных остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. И, наконец, по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений с использованием коэффициента концентрации можно рассчитать приращение предела выносливости детали за счет поверхностного упрочнения.

Список литературы

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
2. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
3. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения / КуАИ. – Куйбышев, 1971. – Вып. 53. – С. 32–42.
4. Стружанов В.В. Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоении двухслойных полос // Вестник СамГТУ. Физико-математические науки. – 2010. – № 5(21). – С. 55–63.
5. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – № 3(27), ч. 3. – С. 171–174.
6. Определение первоначальных деформаций в упрочненном слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчетного 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. Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 25–27.

8. 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.

9. Вакулюк В.С. Сопротивление усталости детали в зависимости от толщины упрочненного слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник СГАУ. – 2012. – № 3(34). – С. 172–176.

10. Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Чирков А.В. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных гладких деталей // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3(23). – С. 102–107.

11. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: межвуз. сб. / КуАИ. – Куйбышев, 1974. – Вып. 3. – С. 88–95.

12. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: тр. КуАИ / КуАИ. – Куйбышев, 1973. – Вып. 66. – С. 160–170.

13. Сазанов В.П. Исследование распределения компонентов остаточного напряженного состояния в области наименьшего сечения поверхностно упрочненной детали с кольцевым надрезом методом конечно-элементного моделирования // Вестник СГАУ. – 2012. – № 3(34). – С. 158–161.

14. Моделирование остаточного напряженного 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. Технические науки. – 2012. – № 1(33). – С. 106–114.

15. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Изв. вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29–32.

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

17. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей с концентраторами по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, Н.А. Сургутанов, В.В. Сазанов, В.Э. Костичев, П.А. Шляпников // Изв. СНЦ РАН. – 2014. – Т. 16, № 6(2). – С. 550–554.

18. Влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости цилиндрических деталей различного диаметра / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2014. – № 3. – С. 324–326.

19. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.С. Бу-

катый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 4(44). – С. 81–85.

20. Петерсон Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1977. – 304 с.

21. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37–40.

References

1. Birger I.A. Ostatochnye napriazheniia [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz, 1963, 232 p.

2. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakuliuk V.S. Prognozirovanie soprotivleniia ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detalei po ostatochnym napriazheniiam [Prediction of fatigue resistance of surface hardened parts by residual stresses]. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiiskoi Akademii Nauk, 2012, 125 p.

3. Ivanov S.I. K opredeleniiu ostatochnykh napriazhenii v tsilindre metodom kolets i polosok. Ostatochnye napriazheniia [To determination of residual stresses in the cylinder by the method of rings and strips. Residual stresses]. KuAI. Kuibyshev, 1971, iss. 53, pp. 32–42.

4. Struzhanov V.V. Ob ostatochnykh napriazheniiakh posle prokatki i rassloeniia dvukhsloinykh polos [Residual stresses after rolling and separation of two-layer strips]. Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki, 2010, no. 5(21), pp. 55–63.

5. Sazanov V.P., Chirkov A.V., Samoilov V.A., Larionova Iu.S. Modelirovanie pereraspredeleniia ostatochnykh napriazhenii v uprochnennykh tsilindricheskikh obraztsakh pri operezhaiushchem poverkhnostnom plasticheskom deformirovanii [Modelling of redistribution of residual stresses in reinforced cylindrical specimens at anticipatory surface plastic deformation]. Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta, 2011, no. 3(27), part 3, pp. 171–174.

6. Sazanov V.P., Kirpichev V.A., Vakuliuk V.S., Pavlov V.F. Opredelenie pervonachal'nykh deformatsii v uprochnennom sloe tsilindricheskoi detali metodom konechno-elementnogo modelirovaniia s ispol'zovaniem raschetnogo kompleksa PATRAN/NASTRAN [Determination of initial deformations in the hardened layer of a cylindrical part by the method of finite element modeling with the use of the calculation complex PATRAN/NASTRAN]. Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviationsionnogo tekhnicheskogo universiteta, 2015, vol. 19, no. 2(68), pp. 35–40.

7. Ivanov S.I., Pavlov V.F. Vliianie ostatochnykh napriazhenii i naklepa na ustalostnuiu prochnost' [Influence of residual stresses and adhesion on fatigue resistance]. Problemy prochnosti, 1976, no. 5, pp. 25–27.

8. Ivanov S.I., Pavlov V.F., Prokhorov A.A. Vliianie ostatochnykh napriazhenii na soprotivlenie ustalosti pri kruchenii v usloviakh kontsentratsii napriazhenii [Influence of residual stresses on torsional fatigue resistance under stress concentration conditions]. Problemy prochnosti, 1988, no. 5, pp. 31–33.

9. Vakuliuk V.S. Soprotivlenie ustalosti detali v zavismosti ot tolschiny uprochnennogo sloia pri operezhaiushchem poverkhnostnom plasticheskom deformirovanii [Fatigue resistance of the part depending on the thickness of the hardened layer at of anticipating surface plastic deformation]. Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta, 2012, no. 3(34), pp. 172–176.

10. Kirpichev V.A., Bukaty A.S., Chirkov A.V. Prognozirovanie soprotivleniia ustalosti poverkhnostno uprochnennykh gladkikh detalei [Prediction of fatigue resistance of surface hardened smooth parts]. Izvestiia vuzov. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki, 2012, no. 3(23), pp. 102–107.

11. Ivanov S.I., Shatunov M.P., Pavlov V.F. Vliianie ostatochnykh napriazhenii na vynoslivost' obraztsov s nadrezom [Influence of residual stresses on the resistibility of notched specimens]. Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruksii: mezhvuzovskii sbornik. Kuibyshev, 1974, iss. 3, pp. 88–95.

12. Ivanov S.I., Shatunov M.P., Pavlov V.F. Opredelenie dopolnitel'nykh ostatochnykh napriazhenii v nadrezakh na tsilindricheskikh detaliakh [Determination of additional residual stresses in notches on cylindrical parts]. Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruksii: trudy KuAI. Kuibyshev, 1973, iss. 66, pp. 160–170.

13. Sazanov V.P. Issledovanie raspredeleniia komponentov ostatochnogo napriazheniia v oblasti naimen'shego secheniia poverkhnostno uprochnennoi detali s kol'tsevim nadrezom metodom konechno-elementnogo modelirovaniia [Investigation of the distribution of residual stress state components in the area of the smallest section of the surface hardened part with a ring cut by the method of finite-element modeling]. Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta, 2012, no. 3(34), pp. 158–161.

14. Sazanov V.P., Chirkov A.V., Semenova O.Iu., Ivanova A.V. Modelirovanie ostatochnogo napriazheniia sostoianii detali v usloviakh kontsentratsii napriazhenii s ispol'zovaniem programmno kompleksa PATRAN/NASTRAN [Simulation of residual stress the state of the workpiece under conditions of stress concentration using the PATRAN/NASTRAN software]. Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskie nauki, 2012, no. 1(33), pp. 106–114.

15. Pavlov V.F. O sviazi ostatochnykh napriazhenii i predela vynoslivosti pri izgibe v usloviakh kontsentratsii napriazhenii [On the relationship between residual stresses and bending endurance under stress concentration conditions]. Izvestiia vuzov. Mashinostroenie, 1986, no. 8, pp. 29–32.

16. Pavlov V.F. Vliianie na predel vynoslivosti velichiny i raspredeleniia ostatochnykh napriazhenii v poverkhnostnom sloe detali s kontsentratorom. Soobshchenie I. Sploshnye detali [Influence on the endurance limit of the value and distribution of residual stresses in the surface layer of the part with the concentrator]. Izvestiia vuzov. Mashinostroenie, 1988, no. 8, pp. 22–26.

17. Pavlov V.F., Surgutanov N.A., Sazanov V.V., Kostichev V.E., Shliapnikov P.A. Prognozirovanie predela vynoslivosti poverkhnostno uprochnennykh detalei s kontsentratorami po ostatochnym napriazheniiam [Prediction of

the endurance limit of surface hardened parts with concentrators by residual stresses]. *Izvestia SNTs RAN*, 2014, vol. 16, no. 6(2), pp. 550–554.

18. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakuliuk V.S., Sazanov V.P. Vliianie poverkhnostnogo uprochneniia na predel vynoslivosti tsilindricheskikh detalei razlichnogo diametra [Influence of surface hardening on the endurance limit of cylindrical parts of different diameters]. *Izvestiia vuzov. Aviatsonnaia tekhnika*, 2014, no. 3, pp. 324–326.

19. Kirpichev V.A., Bukatyi A.S., Filatov A.P., Chirkov A.V. Prognozirovanie predela vynoslivosti poverkhnostno uprochnennykh detalei pri razlichnoi stepeni kontsentratsii napriazhenii [Prediction of the endurance limit of surface hardened parts at different stress concentrations]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 15, no. 4(44), pp. 81–85.

20. Peterson R.E. Koeffitsienty kontsentratsii napriazhenii [Stress concentration coefficients], Moscow: Mir, 1977, 304 p.

21. Pavlov V.F. Vliianie na predel vynoslivosti velichiny i raspredeleniia ostatochnykh napriazhenii v poverkhnostnom sloe detali s kontsentratorom. Soobshchenie II. Polye detali [Influence on the endurance limit of the value and distribution of residual stresses in the surface layer of the part with the concentrator]. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie*, 1988, no. 12, pp. 37–40.

Получено 21.01.19

Опубликовано 21.03.19

Сведения об авторах

Павлов Валентин Федорович (Самара, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королёва; e-mail: pavlov.vf@ssau.ru.

Сазанов Вячеслав Петрович (Самара, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королёва; e-mail: sopromat@ssau.ru.

Вакулюк Владимир Степанович (Самара, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королёва; e-mail: sopromat@ssau.ru.

About the authors

Valentin F. Pavlov (Samara, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Strength of Materials, Samara National Research University (Samara University); e-mail: pavlov.vf@ssau.ru.

Vyacheslav P. Sazanov (Samara, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Strength of Materials, Samara National Research University (Samara University); e-mail: sopromat@ssau.ru.

Vladimir S. Vakulyuk (Samara, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Strength of Materials, Samara National Research University (Samara University); e-mail: sopromat@ssau.ru.