

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

© 2018

- В. П. Сазанов** кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sazanow@mail.ru
- В. Ф. Павлов** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sopromat@ssau.ru
- О. Ю. Семёнова** кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sopromat@ssau.ru
- А. А. Прохоров** кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sopromat@ssau.ru

Объектом исследования являются сплошные и полые цилиндрические образцы из конструкционных сталей с надрезами, подвергнутые поверхностному упрочнению гидродробеструйной и пневмодробеструйной обработками. Предметом исследования являются остаточные напряжения в поверхностном слое образцов после упрочнения. Цель работы – исследование влияния остаточных напряжений на многоцикловую усталость, а также установление возможности использования разработанных расчётных методик для оценки эффективности поверхностного упрочнения. Исследования распределения остаточных напряжений в поверхностном слое, а также сопротивления многоцикловой усталости цилиндрических образцов выполнены расчётными и экспериментальными методами. Применение расчётных методов оценки эффективности упрочняющей обработки показало, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями приращений предела выносливости за счёт упрочнения цилиндрических образцов с полукруглым надрезом не превышает 8% при гидродробеструйной обработке (сталь 40Х) и 11% при пневмодробеструйной обработке (сталь 20). Применение расчётных методик определения приращения предела выносливости позволяет проводить оценку эффективности поверхностного упрочнения с достаточной для практики точностью без проведения длительных и дорогостоящих испытаний на усталость.

Поверхностное упрочнение; гидродробеструйная обработка; пневмодробеструйная обработка; остаточные напряжения; предел выносливости.

Цитирование: Сазанов В.П., Павлов В.Ф., Семёнова О.Ю., Прохоров А.А. Оценка эффективности упрочняющей обработки цилиндрических деталей из конструкционных сталей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 164-173.
DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-164-173

Введение

Надёжность и долговечность деталей машин являются одним из основных факторов, определяющих ресурс изделия в целом. Обеспечение указанных показателей осуществляется путём применения различных способов упрочнения поверхностным пластическим деформированием и химико-термической обработкой деталей. Упрочняющая обработка позволяет значительно повысить предел выносливости деталей, однако различные способы упрочнения обладают рядом особенностей, исследование которых

важно при разработке технологических процессов и оптимизации конструкции ответственных деталей.

Вместе с тем одной из главных задач механики остаточных напряжений является установление связи между остаточными напряжениями и сопротивлением деталей усталости. Наиболее актуально выявление зависимости сопротивления усталости от остаточных напряжений для деталей с концентраторами, так как разрушение этих деталей происходит, как правило, в местах нарушения призматической формы [1-3]. В современном машиностроении у разработчиков конструкций изделий, как правило, существует достаточно широкий выбор методов поверхностного упрочнения деталей и в связи с этим необходимы методики и критерии оценки их эффективности при выборе технологических режимов процесса.

В связи с этим для оценки эффективности упрочняющих технологий и выбора оптимальных режимов процессов уже на стадиях проектирования и разработки конструкторской документации изделий возникает потребность в специализированных расчётно-теоретических и расчётно-экспериментальных методах. Очевидным преимуществом данных методов должен являться тот факт, что выбор вида и параметров технологического процесса упрочнения должен выполняться без проведения дорогостоящих и длительных испытаний деталей или образцов на усталость. В данной работе для исследования применён расчётно-экспериментальный метод, который основан на использовании конечно-элементного моделирования (комплекс PATRAN/NASTRAN), а также экспериментальных механических методов определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя. В качестве апробации рассматривались два метода поверхностного пластического деформирования (ППД), которые наиболее широко применяются в технологических процессах упрочнения деталей – гидродробеструйная обработка (ГДО) и пневмодробеструйная обработка (ПДО).

Постановка задачи

Во многих отраслях промышленности успешно применяются различные методы поверхностного пластического деформирования. Процесс пластического деформирования поверхностного слоя может быть выполнен по различным схемам и зависит от многих факторов, таких как механические характеристики материала, форма, усилие и скорость движения деформирующего элемента. После такого процесса в поверхностном слое происходят структурные изменения и формируются сжимающие остаточные напряжения.

Определяющей задачей процесса упрочнения поверхностного слоя является подбор и оптимизация режимов обработки с целью получения наилучших эксплуатационных характеристик деталей. Необходимо подчеркнуть, что обработка, основанная на пластическом деформировании тонкого поверхностного слоя, имеет по сравнению с механической обработкой со снятием стружки (точение, фрезерование, шлифование) ряд преимуществ: сохраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура поверхностного слоя; плавно и стабильно повышается микротвёрдость поверхности; уменьшается шероховатость поверхности; создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое.

Применение методов поверхностного упрочнения деталей машин, при условии правильного выбора технологического процесса, приводит к значительному повышению их сопротивления усталости.

Задачами данного исследования являются:

– спрогнозировать предел выносливости упрочнённых деталей расчётно-экспериментальным методом, основанным на использовании критерия среднеинте-

гральных остаточных напряжений с применением современных расчётных комплексов (PATRAN/NASTRAN, ANSYS);

– выполнить анализ и сравнить результаты испытаний на усталость с результатами расчётов по прогнозированию предела выносливости деталей;

– оценить возможность применения апробированных методик для оценки эффективности при выборе методов и режимов технологических процессов упрочнения.

В целях объективной оценки исследуются партии сплошных и полых цилиндрических деталей из сталей 20, 45, 40Х, 30ХГСА после поверхностного упрочнения методами гидродробеструйной и пневмодробеструйной обработок.

Методика расчёта

Как показывают многочисленные эксперименты [4-10], наиболее точно связь между приращением предела выносливости упрочнённых деталей и остаточными напряжениями отражает критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, предложенный в работе [1]. Данный критерий учитывает влияние на сопротивление усталости не только величины, но и характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости детали $\Delta\sigma_{-1}$ при изгибе в случае симметричного цикла с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ производится по следующей зависимости:

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

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

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

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали по толщине поверхностного слоя y ; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в опасном сечении упрочнённой детали при работе на пределе выносливости (рис. 1).

Из формул (1) и (2) видно, что для определения расчётным путём приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ необходимо знать коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости, а также распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости.

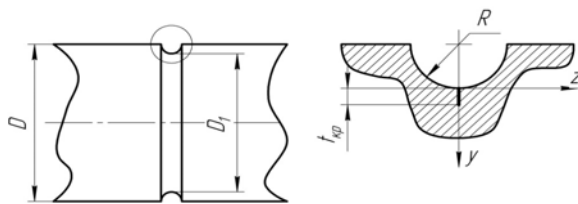


Рис. 1. Цилиндрический образец и нераспространяющаяся трещина усталости

На основании обработки экспериментальных данных для образцов и деталей с различными концентраторами напряжений в работах [4-9] было установлено, что коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ при симметричном цикле зависит только от степени концентрации напряжений и вычисляется по следующей формуле:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \quad (3)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Из приведённых в исследованиях [2-4] результатов испытаний на усталость поверхностно упрочнённых образцов и деталей следует, что критическая глубина 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 сплошных цилиндрических образцов и деталей зависимость для $t_{кр}$ имеет следующий вид:

$$t_{кр} = 0,0216D_1, \quad (4)$$

где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали (рис. 1).

Для полых цилиндрических образцов и деталей зависимость для $t_{кр}$ имеет следующий вид:

$$t_{кр} = 0,0216D_1 \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D_1} \right)^3 \right], \quad (5)$$

где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали; d – диаметр отверстия образца или детали.

Результаты исследований

Для проведения экспериментальной части исследования точением с последующим шлифованием были изготовлены сплошные и полые стандартные образцы различного типоразмера из наиболее применяемых в машиностроении конструкционных сталей [4]. Одна половина образцов после изготовления подвергалась электрополированию, другая – поверхностному упрочнению на режимах, характерных для практики авиационных предприятий. Партии деталей из каждого материала и их образцы-свидетели обрабатывались на одном технологическом режиме процесса упрочнения.

Эпюры осевых остаточных напряжений σ_z по толщине a поверхностного слоя в гладких образцах (полые втулки размером 51,5×45 мм) после гидродробеструйной и пневмодробеструйной обработок, определённые методом колец и полосок [11], приведены на рис. 2, 3. Также определялись и окружные остаточные напряжения σ_θ , но в настоящей работе они не приведены, так как в используемые критерии оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости эти напряжения не входят [1]. Однако следует отметить, что после гидродробеструйной и пневмодробеструйной обработок выполняется условие $\sigma_\theta = \sigma_z$ [4].

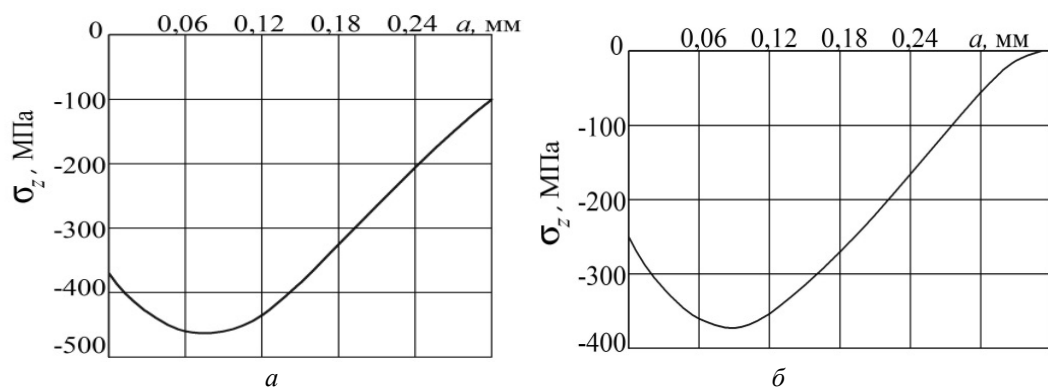


Рис. 2. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образце-свидетеле диаметром $51,5 \times 45$ мм/мм после ГДО: а – 30ХГСА; б – 40Х

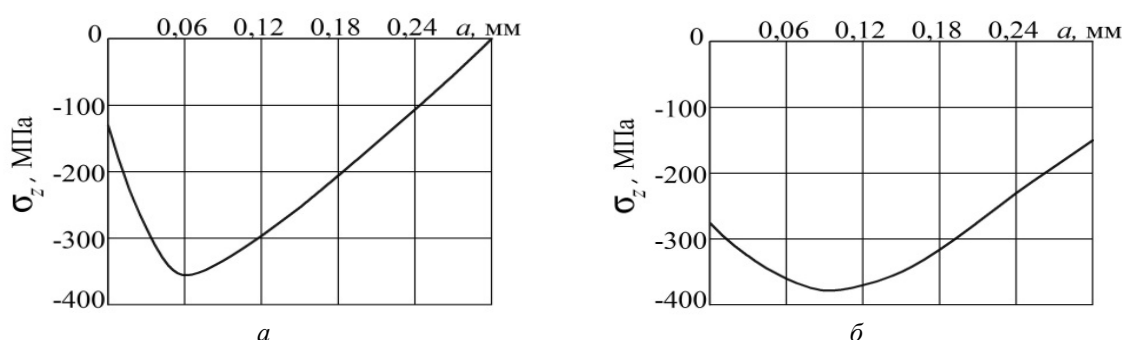


Рис. 3. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образце-свидетеле диаметром $51,5 \times 45$ мм/мм: а – сталь 20 после ПДО; б – сталь 45 после ГДО

Из рис. 2, 3 видно, что сжимающие остаточные напряжения после упрочнения ГДО в образцах не превышают -450 МПа, а после ПДО не превышают -350 МПа и все зависимости имеют подповерхностный максимум. Толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями для рассматриваемых сталей имеет небольшой разброс по его размеру.

На гладкие неупрочнённые и упрочнённые образцы безнаклёпным способом с использованием электрополирования наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиусом $R=0,3$ мм.

Расчётная часть исследований выполнялась методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. Конечно-элементные модели гладких образцов и образцов с надрезами в осесимметричной постановке представляют собой четверть сечения цилиндра с наложением соответствующих граничных условий. Для моделирования использовался плоский треугольный элемент типа 2D-Solid с шестью узлами. Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов было выполнено методом термоупругости [12].

При определении первоначальных деформаций [13] в конечно-элементной модели гладкого образца в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a упрочнённого поверхностного слоя (рис. 2, 3), определённое методом колец и полосок. Полученные расчётным методом распределения первоначальных деформаций в гладких образцах использовались для расчёта распределения остаточных напряжений в образцах с круговыми

надрезами полукруглого профиля радиуса $R=0,3$ мм, нанесёнными на гладкие образцы после упрочнения, то есть после опережающего поверхностного пластического деформирования.

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ вычислялись по формуле (2) по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. При расчёте критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ использовались распределения осевых σ_z остаточных напряжений в образцах с надрезами $R=0,3$ мм. Данные распределения были получены расчётным путём с применением соответствующих конечно-элементных моделей образцов с надрезами. Значения критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости определялись по зависимостям (4) и (5).

Значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ рассчитывались по формуле (3). При этом величина теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ образцов с надрезами при изгибе определялась методом конечных элементов с использованием расчётного комплекса ANSYS.

После вычисления критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ по формуле (1) определялись расчётные значения приращений пределов выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ упрочнённых ГДО и ПДО образцов с надрезами радиуса $R=0,3$ мм.

Значения приращений пределов выносливости при изгибе в случае симметричного цикла σ_{-1} , теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ , коэффициента влияния $\bar{\psi}_\sigma$, среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, приращений предела выносливости за счёт упрочнения по результатам эксперимента $(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$ и расчёта $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$, глубин нераспространяющихся трещин усталости $t_{кр}$ приведены в таблице.

Таблица. Результаты расчётного и экспериментального определения приращений пределов выносливости упрочнённых образцов с надрезами из конструкционных сталей

	D , мм	d , мм	D_1 , мм	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$, МПа	Расхождение, %
Сталь 20 (ПДО)	10	0	9,4	0,203	-122	2,7	0,393	48,0	45,0	6
	25	0	24,4	0,527	-89	2,9	0,377	33,6	30,0	11
	25	15	24,4	0,453	-91	3,0	0,369	33,5	32,5	3
Сталь 45 (ГДО)	15	5	14,4	0,303	-159	2,8	0,385	61,2	57,5	6
	25	15	24,4	0,453	-131	3,0	0,369	48,3	45,0	7
	50	40	49,4	0,733	-87	3,1	0,361	31,4	30,0	4
40Х (ГДО)	25	0	24,4	0,527	-109	2,9	0,377	41,1	42,5	3
	25	10	24,4	0,504	-110	2,9	0,377	41,4	42,5	3
	25	19	24,4	0,380	-117	3,0	0,369	43,2	40,0	8
30ХГСА (ГДО)	10	0	9,4	0,203	-240	2,7	0,393	94,0	90,0	5
	15	0	14,4	0,311	-196	2,8	0,385	75,5	77,5	3
	15	5	14,4	0,303	-211	2,8	0,385	81,3	77,5	5
	15	10	14,4	0,249	-218	2,9	0,377	82,1	80,0	3

Из представленных в таблице данных следует, что эффективность упрочняющей обработки тем выше, чем выше значение среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, определённых на критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. Также очевидно, что большее значение $\bar{\sigma}_{ост}$ объясняется более полной эпюрой остаточных напряжений за счёт больших величин сжимающих остаточных напряжений и толщины упрочнённого слоя (рис. 2, 3).

В соответствии с таблицей результаты испытаний на усталость неупрочнённых и упрочнённых образцов показали их достаточно высокую сходимость с результатами расчёта приращений пределов выносливости. Из этих результатов следует, что для всех типоразмеров образцов из различных сталей приращение предела выносливости за счёт упрочнения пропорционально значению среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, определённых на критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. Поэтому выбор метода упрочнения и назначения его технологических режимов следует выполнять из условия получения максимального значения среднеинтегральных остаточных напряжений.

Заключение

Проведённые исследования по определению пределов выносливости при изгибе в случае симметричного цикла цилиндрических образцов различного типоразмера из конструкционных сталей 20, 45, 40Х, 30ХГСА показали, что эффективность упрочнения поверхности дробеструйной обработкой определяется значением среднеинтегральных остаточных напряжений, определённых на критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

Использованный в исследовании метод расчёта показал, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями приращений предела выносливости за счёт упрочнения цилиндрических образцов с полукруглым надрезом не превышает 11% при ПДО и 8% при ГДО.

Проведённые исследования показали, что применение расчётно-экспериментальных методов прогнозирования предела выносливости позволит назначать оптимальные по сопротивлению многоциклового усталости режимы и методы поверхностного пластического деформирования деталей сложной формы без проведения длительных и дорогостоящих испытаний на усталость натуральных деталей.

Библиографический список

1. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия высших учебных заведений. 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 // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1988. № 8. С. 22-26.
3. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1988. № 12. С. 37-40.

4. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. 125 с.

5. Вакулюк В.С. Сопротивление усталости детали в зависимости от толщины упрочнённого слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3 (34), ч. 3. С. 172-176.

6. Кирпичёв В.А., Саушкин М.Н., Сазанов В.П., Семёнова О.Ю. Остаточные напряжения и сопротивление усталости образцов с V-образными надрезами из стали ВНС40 // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 5 (36), ч. 1. С. 95-99.

7. Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Чирков А.В. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых гладких деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 3 (23). С. 102-109.

8. Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранаева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений // Сб. трудов международной научно-технической конференции «Прочность материалов и элементов конструкций». Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. С. 678-685.

9. Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Филатов А.П., Чирков А.В. Прогнозирование предела выносливости деталей при различной степени концентрации напряжений // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15, № 4 (44). С. 81-85.

10. Вакулюк В.С. Исследование влияния толщины упрочнённого слоя на остаточные напряжения во впадине концентратора методом первоначальных деформаций // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2010. № 1 (20). С. 222-225.

11. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Сб. трудов «Остаточные напряжения». Вып. 53. Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1971. С. 32-42.

12. Чирков А.В., Сазанов В.П., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 3 (27), ч. 3. С. 171-174.

13. Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулюк В.С., Кирпичёв В.А. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. Самара: Самарский научный центр РАН, 2008. 124 с.

EVALUATING THE EFFICIENCY OF HARDENING TREATMENT OF CYLINDRICAL PARTS MADE OF STRUCTURAL STEELS

© 2018

V. P. Sazanov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Strength of Materials; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; sazanow@mail.ru

V. F. Pavlov Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Strength of Materials; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; sopromat@ssau.ru

O. Yu. Semyonova Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; sopromat@ssau.ru

A. A. Prokhorov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Strength of Materials; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; sazanow@mail.ru

The investigated objects are solid and hollow notched cylindrical specimens made of structural steels surface-hardened with the use of two techniques: hydraulic shot blasting and air shot blasting. The subject of the investigation is the residual stresses in the surface layer of the specimens after hardening. The purpose of the work is to investigate the influence of residual stresses on high-cycle fatigue and to establish the possibility of using the developed calculation methods for the evaluation of surface hardening efficiency. Residual stress distribution in the surface layer and high-cycle fatigue resistance of cylindrical specimens were analyzed using calculation and experimental methods. The use of calculation methods for evaluating the efficiency of hardening treatment showed that the difference between the calculated and experimental values of the endurance limit increments due to hardening of cylindrical specimens with semicircular notches does not exceed 8% in the case of hydraulic shot blasting (steel 40X) and 11% in the case of air shot blasting (steel 20). The use of calculation methods for defining the endurance limit increment makes it possible to evaluate the efficiency of surface hardening with practical accuracy without long- run and expensive fatigue tests.

Surface hardening; hydraulic shot blasting; air shot blasting; residual stresses; endurance limit.

Citation: Sazanov V.P., Pavlov V.F., Semyonova O.Yu., Prokhorov A.A. Evaluating the efficiency of hardening treatment of cylindrical parts made of structural steels. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 2. P. 164-173. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-164-173

References

1. Pavlov V.F. On connection between residual stresses and the endurance limit under bending in stresses concentration conditions. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1986. No. 8. P. 29-32. (In Russ.)
2. Pavlov V.F. Influence of a value and a distribution of residual stresses in the surface layer of a part with a concentrator on the endurance limit. Report 1. Solid parts. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1988. No. 8. P. 22-26. (In Russ.)
3. Pavlov V.F. The influence of a value and a distribution of residual stresses in the surface layer of a part with a concentrator on the endurance limit. Report II. Hollow parts. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1988. No. 12. P. 37-40. (In Russ.)
4. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakulyuk V.S. *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam* [Prediction of fatigue strength of surface hardened components by residual stresses]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2012. 125 p.

5. Vakuljuk V.S. The dependence of detail fatigue resistance on the thickness of hardening layer under outstripping superficial plastic deforming. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 3 (34), part 3. P. 172-176. (In Russ.)
6. Kirpichev V.A., Saushkin M.N., Sazanov V.P., Semyonova O.Yu. Residual stresses and endurance strength in the specimens with V-shaped notches made of BHC40 steel. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 5 (36), part 1. P. 95-99. (In Russ.)
7. Kirpichyov V.A., Bukaty A.S., Chirkov A.V. Anticipating fatigue resistance of surface hardened smooth parts. *University proceedings. Volga region. Technical sciences*. 2012. No. 3 (23). P. 102-109. (In Russ.)
8. Kirpichev V.A., Filatov A.P., Karanaeva O.V., Chirkov A.V., Semenova O.Yu. Surface hardened parts endurance limit prediction under stresses concentration various degree. *Proceedings of the International Conference «Strength of Materials and Structural Elements»*. Kiev: G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2011. P. 678-685. (In Russ.)
9. Kirpichev V.A., Bukaty A.S., Filatov A.P., Chirkov A.V. Prediction of the endurance limit of superficially strengthened details at various degree of stress concentration. *Vestnik UGATU*. 2011. V. 15, no. 4 (44). P. 81-85. (In Russ.)
10. Vakuljuk V.S. Investigation of influence of thickness hardened layer on the residual stresses in basin concentrator using initial strain. *Journal of Samara State Technical University. Seriya: Physical and Mathematical Sciences*. 2010. No. 1 (20). P. 222-225. (In Russ.)
11. Ivanov S.I. K opredeleniyu ostatochnykh napryazheniy v tsilindre metodom kolets i polosok. *Sb. trudov «Ostatochnye napryazheniya»*. Iss. 53. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1971. P. 32-42. (In Russ.)
12. Chirkov A.V., Sazanov V.P., Samoylov V.A., Larionova Y.S. Modeling of redistribution of residual stresses in the cylindrical specimens after advancing surface plastic forming. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2011. No. 3 (27), part 3. P. 171-174. (In Russ.)
13. Pavlov V.F., Stolyarov A.K., Vakulyuk V.S., Kirpichev V.A. *Raschet ostatochnykh napryazhenii v detalyakh s kontsentradorami napryazhenii po pervonachal'nyim deformatsiyam* [Residual stresses calculation in parts with stress concentrators on initial deformations]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2008. 124 p.