

DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.07

УДК 621.787.6:539.319

М.Н. Саушкин¹, В.П. Сазанов², В.С. Вакулюк²¹Самарский государственный технический университет, Самара, Россия²Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королева (национальный
исследовательский университет), Самара, Россия

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ «ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ»

Рассматриваются критерии оценки влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости сплошных и полых цилиндрических образцов с надрезами при изгибе в случае симметричного цикла нагружения. В настоящем исследовании проверяется возможность использования метода «образца-свидетеля» для прогнозирования предела выносливости испытываемых штатных образцов. Метод «образца-свидетеля» позволяет сохранить штатные образцы от разрушения при экспериментальном определении остаточных напряжений. В этом случае предел выносливости штатных образцов рассчитывается по остаточным напряжениям «образца-свидетеля», который был упрочнен одновременно со штатными образцами по той же самой технологии. При проведении исследований предполагалось, что штатные образцы и «образец-свидетель» при упрочнении получают одинаковые изотропные первоначальные деформации, деформации сдвига считались малыми и при определении первоначальных деформаций не учитывались. Исследования проводились на сплошных и полых цилиндрических образцах различного диаметра из сталей 20 и 45 с круговыми надрезами, которые были упрочнены по технологии опережающего поверхностного пластического деформирования (с использованием пневмо- и гидродробеструйной обработки). Результаты исследования позволяют установить, что сжимающие остаточные напряжения, рассчитанные в гладких цилиндрических образцах по первоначальным деформациям «образца-свидетеля», незначительно (до 7 %) отличаются от определенных экспериментально. С использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений по разработанной ранее методике были вычислены приращения пределов выносливости упрочненных образцов с надрезами. Установлено, что расчетные значения приращений пределов выносливости при изгибе в случае симметричного цикла нагружения для образцов с надрезами отличаются от экспериментальных не более чем на 11 %.

Ключевые слова: остаточные напряжения, поверхностное пластическое деформирование, первоначальные деформации, предел выносливости, симметричный цикл нагружения, цилиндрический образец, «образец-свидетель», сталь 20, сталь 45.

M.N. Saushkin¹, V.P. Sazanov², V.S. Vakulyuk²

¹Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

²Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

**METHOD OF DETERMINING ENDURANCE
LIMIT STRESS OF CYLINDRICAL SPECIMENS MADE
OF STRUCTURAL STEELS BY RESIDUAL STRESSES
OF “CHECK TEST PIECE”**

We consider the criteria of the estimation of surface strengthening influence on the endurance limit stress increase of the solid and hollow cylindrical specimens with cuts under the bend for the symmetrical cycle of loading. We check the possibility of “check test piece” method using forecasting of the tested standard specimens endurance limit stress. The “check test piece” method allows preventing the destruction of standard specimens when the residual stresses are determined experimentally. In this case the endurance limit stress of the standard specimens can be calculated by the residual stresses of “check test piece” that is strengthened simultaneously with the standard specimens by the same technology. We assume the standard specimens and the “check test piece” having the equal isotropic initial strain, the shear strains are small and we do not take them into account for the initial strain determination. We explore the solid and hollow cylindrical specimens of different diameters made of steel 20 and steel 45. The circular cuts of the specimens were strengthened by the anticipatory surface plastic deformation technology using the air/hydraulic shot blasting. The obtained results make it possible to conclude that the compressive residual stresses, calculated for smooth cylindrical specimens by the initial strains of “check test piece”, do not differ much from those that have been determined experimentally (up to 7 %). We compute the increment of the endurance limit stress of the strengthened specimens with cuts by the developed procedure using the mean integral residual stresses criterion. The difference between the calculated increase of the endurance limit stress of cylindrical specimens with cuts under the bend for the symmetrical cycle of loading and the experimental data is not more than 11 %.

Keywords: residual stresses, surface plastic deformation, initial strains, endurance limit stress, symmetrical cycle of loading, cylindrical specimen, check test piece, steel 20, steel 45.

В машиностроении эксплуатационные качества техники в первую очередь определяются ресурсом и надежностью работы, именно эти характеристики являются определяющими для высоконагруженных узлов и деталей, прочность которых зависит от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. При переменных внешних нагрузках и длительной эксплуатации для сопротивления усталости особую значимость приобретает физико-механическое состояние поверхностного слоя деталей в зонах концентрации напряжений. Среди характеристик качества поверхностного слоя наиболее важную роль играют остаточные напряжения, возникающие при различных технологических процессах обработки деталей. В основе образования остаточных напряжений лежат необратимые изменения в материале при поверхностного слоя деталей.

Для повышения сопротивления усталости деталей машин на практике широкое применение нашли различные методы поверхностного пластического деформирования (пневмо- и гидродробеструйная обработка, обкатка роликом и др.). После обработки методами поверхностного пластического деформирования в тонком поверхностном слое деталей изменяется структура, повышается твердость материала, и наводятся сжимающие остаточные напряжения. Исследованиями (см., например, [1–11 и др.]) установлено, что основную роль в повышении характеристик сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей играют сжимающие остаточные напряжения.

При оценке влияния поверхностного пластического деформирования на предел выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ поверхностно упрочненных деталей применяются два критерия: осевые остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали $\sigma_z^{\text{нов}}$ [12, 13] и среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ [9–11, 14, 15]. Многочисленные эксперименты (см., например, [10–11, 14, 15 и др.]) показывают, что связь между приращением предела выносливости упрочненных деталей и остаточными напряжениями наиболее точно отражает критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, предложенный в работе [9], так как он 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 нагружения с использованием критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ производится по следующей зависимости [9–11, 14, 15]:

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

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

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

здесь $\sigma_z(\xi)$ – 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 упрочненной детали при работе на пределе выносливости (рис. 1).

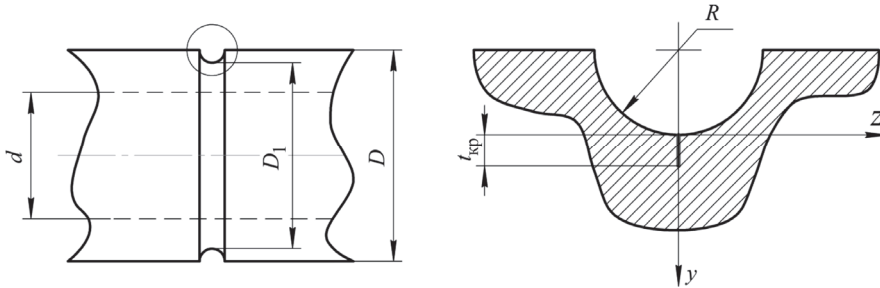


Рис. 1. Цилиндрический образец и нераспространяющаяся трещина усталости: D – внешний диаметр образца; D_1 – диаметр опасного сечения образца; d – внутренний диаметр образца; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости; R – радиус кругового надреза

Из зависимостей (1) и (2) видно, что для определения приращенния 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.

На основании многочисленных экспериментальных данных для образцов и деталей из различных материалов с различными концентраторами напряжений было установлено, что коэффициент $\bar{\Psi}_\sigma$ зависит только от степени концентрации напряжений и вычисляется для случая изгиба по следующей формуле [11, с. 111]:

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

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Из приведенных в исследованиях [11, 15 и др.] результатов испытаний на усталость поверхностно упрочненных 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 цилиндрических образцов и деталей зависимость для $t_{кр}$ имеет вид [11, 15]:

– для сплошного цилиндра

$$t_{кр} = 0,0216D_1, \quad (4)$$

– для полого цилиндра

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

где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали; d – диаметр отверстия образца или детали (см. рис. 1). Вид нераспространяющейся трещины усталости зависит от вида испытания на усталость: при чистом изгибе с вращением трещина является концентрической, а ее критическая глубина $t_{кр}$ является постоянной; при поперечном изгибе в одной плоскости трещина имеет серповидный профиль, а за величину ее критической глубины $t_{кр}$ берется максимальная глубина в точке, наиболее удаленной от нейтральной оси.

Для вычисления приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ по формуле (1) для поверхностно упрочненной детали необходимо знать достаточно точное распределение остаточных напряжений по толщине упрочненного слоя, которое можно получить только на образцах, вырезанных из упрочненной детали.

На основании экспериментальных исследований установлено, что характер распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения оказывает существенное влияние на предел выносливости упрочненных деталей, особенно в условиях концентрации напряжений [9–11, 13–15]. В связи с этим при экспериментальном измерении остаточных напряжений наилучшими методами являются такие, которые позволяют определять их распределение по толщине упрочненного поверхностного слоя.

К настоящему времени разработано большое количество методов измерения остаточных напряжений, которые разделяют на механиче-

ские и физические (см., например, работы [16, 17] и библиографию к ним). Механические методы основаны на измерении деформаций, возникающих в процессе упругой разгрузки деталей и образцов при последовательном удалении поверхностных слоев с остаточными напряжениями. По измеренным деформациям с использованием зависимостей теории упругости вычисляются остаточные напряжения, действующие в поверхностном слое упрочненных деталей и образцов. К механическим методам относятся: метод полосок, метод колец и полосок, метод обтачивания или растачивания, метод снятия части поверхности, метод отверстий, метод канавок, метод коротких столбиков и ряд других методов. Физические методы основаны на измерении изменений физических свойств материалов в зависимости от степени их деформирования. В отличие от механических физические методы не связаны с обязательным разрушением деталей и образцов, однако следует отметить, что достаточно точное распределение остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя можно получить только с помощью механических методов.

Сохранить исследуемую штатную деталь и определить распределение остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя в любом ее сечении позволяет расчетно-экспериментальный метод с использованием «образцов-свидетелей» и современных расчетных комплексов, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений. При определении остаточных напряжений в этом случае разрушению подвергается только «образец-свидетель». В практике современного машиностроения «образцы-свидетели» традиционно используются для контроля качества упрочнения деталей различными методами поверхностного пластического деформирования. «Образец-свидетель», имеющий определенные размеры и форму, проходит весь технологический цикл упрочняющей обработки вместе со штатной деталью.

В основе расчетно-экспериментального метода определения остаточных напряжений лежит известное положение о том, что обрабатываемые совместно деталь и «образец-свидетель» при поверхностном пластическом деформировании получают одинаковые первоначальные деформации. Однако во всех случаях практического применения это положение требует проведения тщательной экспериментальной и расчетной проверки. Поэтому в настоящем исследовании были проанали-

зированы результаты испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя нескольких партий сплошных и полых цилиндрических образцов:

– из стали 20 с диаметрами $D=10$ мм, $d=0$ (чистый изгиб с вращением); $D=25$ мм, $d=0$ и $D=25$ мм, $d=15$ мм (поперечный изгиб в одной плоскости);

– из стали 45 с диаметрами $D=15$ мм, $d=5$ мм (чистый изгиб с вращением); $D=25$ мм, $d=15$ мм и $D=50$ мм, $d=40$ мм (поперечный изгиб в одной плоскости).

Испытания на усталость проводились согласно ГОСТ 25.502–79 и ГОСТ 25.507–85 на 15 образцах с базой испытания $3 \cdot 10^6$ циклов (сравнительные испытания) без статистического анализа. Испытания на усталость при чистом изгибе с вращением проводились на испытательной машине МУИ-6000. Испытания на усталость при поперечном изгибе в одной плоскости проводились на универсальных машинах УММ-01 (для образцов с $D=25$ мм) и УМП-02 (для образцов с $D=50$ мм).

Гладкие образцы из стали 20 подвергались пневмодробеструйной обработке, из стали 45 – гидродробеструйной обработке. В качестве «образцов-свидетелей» использовались втулки с $D=51,5$ мм, $d=45$ мм из тех же материалов, в которых определялись остаточные напряжения по толщине упрочненного поверхностного слоя методом колец и полосок [11, 15, 18, 19]. Технические условия проведения экспериментов аналогичны условиям в работах [11, 15, 19].

Расчетная часть исследований выполнялась с помощью метода конечных элементов с использованием комплекса MSC.NASTRAN/MSC.PATRAN [20]. Первоначальные остаточные пластические деформации по толщине упрочненного поверхностного слоя гладких образцов моделируются псевдотемпературными деформациями.

При проведении расчетов принимались следующие допущения:

– все исследуемые гладкие образцы и «образцы-свидетели» при упрочнении получали одинаковые изотропные первоначальные деформации;

– деформации сдвига считались малыми и при определении первоначальных деформаций не учитывались.

Расчеты распределений остаточных напряжений в гладких образцах проводились в следующей последовательности:

1) определение первоначальных деформаций в «образце-свидетеле»;

2) расчет распределения остаточных напряжений в гладких образцах различного диаметра по полученным значениям первоначальных деформаций «образца-свидетеля»;

3) сравнение расчетных распределений остаточных напряжений в гладких образцах различного диаметра с экспериментально полученными распределениями.

При определении первоначальных деформаций в конечно-элементной модели «образца-свидетеля» в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a упрочненного поверхностного слоя втулки (рис. 2), которое было получено методом колец и полосок.

Следующий этап расчетов выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых гладких образцов различного диаметра по первоначальным деформациям «образца-свидетеля». При оценке приращения предела выносливости поверхностно упрочненных деталей в соответствии с теорией наибольших касательных напряжений (третьей теорией прочности) определяющими являются осевые σ_z остаточные напряжения, поэтому сравнение расчетных и экспериментальных распределений остаточных напряжений для исследуемых гладких образцов выполнялось по осевой компоненте. На рис. 3, 4 представлены экспериментальные [11, с. 67, 68; рис. 1, 2] и расчетные распределения осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя для исследуемых гладких образцов различного диаметра.

Из приведенных на рис. 3 данных видно, что расчетные распределения осевых σ_z остаточных напряжений в гладких образцах незначительно отличаются от экспериментальных – по максимальным сжимающим остаточным напряжениям различие не превышает 7 % для стали 20 и 5 % для стали 45. Этот результат указывает на то, что в цилиндрических деталях из стали 20 и стали 45 остаточные напряжения после пневмо- и гидродробеструйной обработок можно определять расчетным методом по первоначальным деформациям «образца-свидетеля», упрочненного одновременно с гладкими образцами.

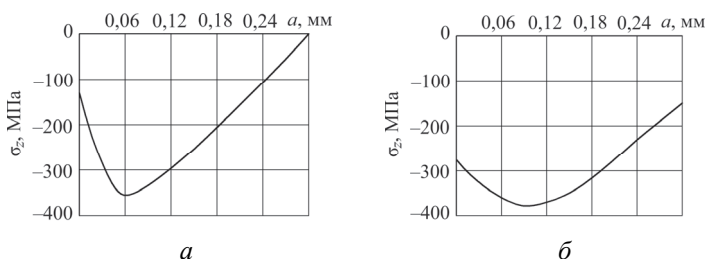


Рис. 2. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в «образцах-свидетелях» (штулки с $D=51,5$ мм, $d=45$ мм) из стали 20 (а) и стали 45 (б) после пневмодробеструйной обработки (а) и гидродробеструйной обработки (б)

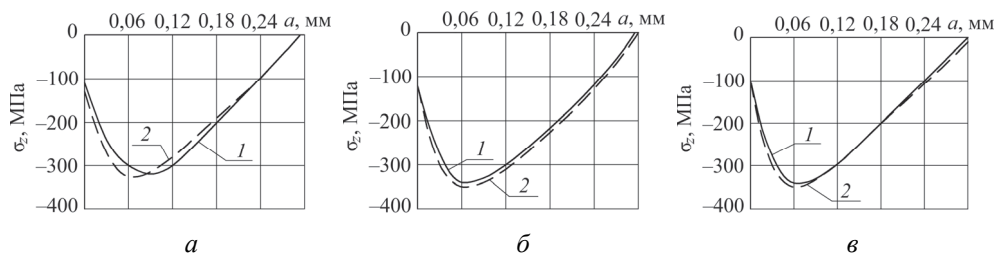


Рис. 3. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений после пневмодробеструйной обработки в гладких образцах из стали 20, определенных экспериментальным (1) и расчетным (2) методами: (а) $D=10$ мм, $d=0$ мм; (б) $D=25$ мм, $d=0$; (в) $D=25$ мм, $d=15$ мм

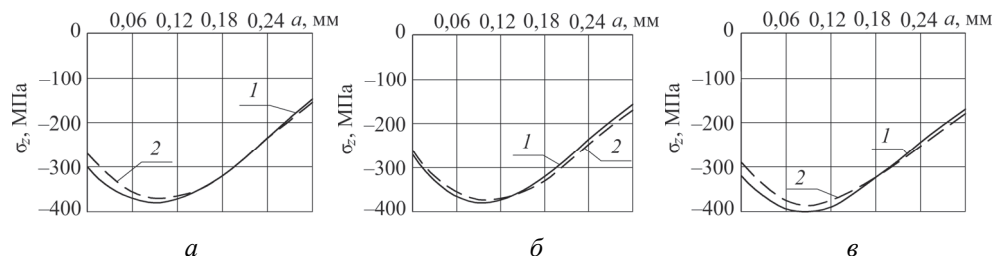


Рис. 4. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений после гидродробеструйной обработки в гладких образцах из стали 45, определенных экспериментальным (1) и расчетным (2) методами: (а) $D=15$ мм, $d=5$ мм; (б) $D=25$ мм, $d=15$ мм; (в) $D=50$ мм, $d=40$ мм

Полученные расчетным методом распределения осевых остаточных напряжений после пневмодробеструйной обработки в гладких образцах из стали 20 и после гидродробеструйной обработки из стали 45 использовались для расчета распределений остаточных напряжений в сплошных и полых образцах с круговыми надрезами радиусом $R=0,3$ мм, нанесенными на гладкие образцы после упрочнения, то

есть после процедуры опережающего поверхностного пластического деформирования. Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись как сумма дополнительных напряжений, возникающих за счет перераспределения остаточных усилий при нанесении надрезов, и остаточных напряжений гладких образцов [20].

Дополнительные остаточные напряжения рассчитывались двумя методами: аналитическим [21] и численным с использованием программного комплекса MSC.NASTRAN/MSC.PATRAN [20]. Следует отметить, что остаточные напряжения в образцах с надрезами, определенные двумя методами, практически совпадают. На рис. 5, 6 представлены экспериментальные [11, с. 67, 68; рис. 5.11, 5.12] и расчетные эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами после процедуры опережающего поверхностного пластического деформирования. Можно видеть, что распределения сжимающих остаточных напряжений, полученные по экспериментальным и расчетным эпюрам гладких образцов, отличаются по наибольшим значениям не более чем на 7 % для стали 20 и на 4 % для стали 45.

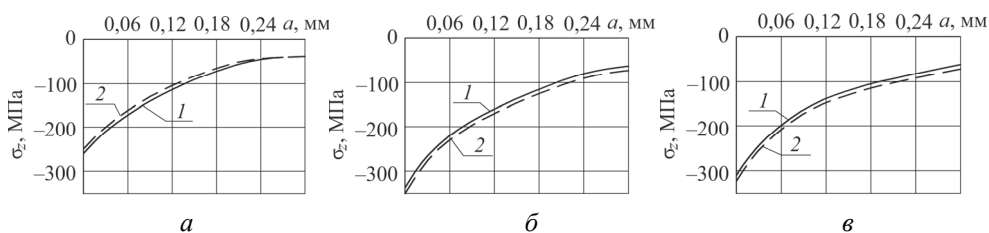


Рис. 5. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из стали 20 с надрезом $R = 0,3$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчетным (2) данным: (а) $D = 10$ мм, $d = 0$; (б) $D = 25$ мм, $d = 0$; (в) $D = 25$ мм, $d = 15$ мм

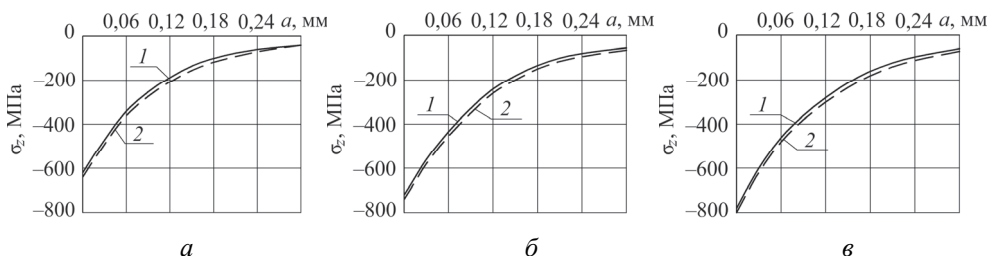


Рис. 6. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из стали 45 с надрезом $R = 0,3$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчетным (2) данным: (а) $D = 15$ мм, $d = 5$ мм; (б) $D = 25$ мм, $d = 15$ мм; (в) $D = 50$ мм, $d = 40$ мм

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ вычислялись 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. 5, 6. Критическая глубина $t_{\text{кр}}$ нераспространяющейся трещины усталости определялась по зависимостям (4) и (5).

Значения критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ и глубины трещины $t_{\text{кр}}$ представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты расчетного и экспериментального определения пределов выносливости образцов с надрезами из стали 20

D , мм	d , мм	D_1 , мм	$t_{\text{кр}}$, мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	α_{σ}	$\bar{\psi}_{\sigma}$	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{экс}}$, МПа	Расхождение, %
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

Таблица 2

Результаты расчетного и экспериментального определения пределов выносливости образцов с надрезами из стали 45

D , мм	d , мм	D_1 , мм	$t_{\text{кр}}$, мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	α_{σ}	$\bar{\psi}_{\sigma}$	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{экс}}$, МПа	Расхождение, %
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

Из представленных в табл. 1 и 2 данных видно, что, несмотря на повышение осевых σ_z сжимающих остаточных напряжений с увеличением диаметра надрезанных образцов, среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ уменьшаются. Эта закономерность объясняется тем, что с увеличением диаметра опасного сечения образца увеличивается критическая глубина $t_{\text{кр}}$ нераспространяющейся трещины усталости.

сти, а это в соответствии с формулой (2) влечет за собой уменьшение критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$.

Значения коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ рассчитывались по формуле (3). При этом теоретический коэффициент концентрации напряжений α_{σ} образцов с надрезами определялся по данным справочника [22]. Коэффициенты α_{σ} и $\bar{\psi}_{\sigma}$ также представлены в табл. 1 и 2.

После вычисления критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ и коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ по формуле (1) определялись расчетные значения приращений пределов выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$ упрочненных образцов с надрезами радиусом $R=0,3$ мм (см. табл. 1 и 2) и сравнивались с экспериментальными значениями $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$, взятыми из работы [11].

Из представленных данных видно, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями приращений пределов выносливости не превышает 11 % для стали 20 и 7 % для стали 45. Следовательно, используя результаты определения остаточных напряжений в «образцах-свидетелях», можно с достаточной (для многоциклового усталости в условиях концентрации напряжений) точностью прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочненных цилиндрических деталей из стали 20 и из стали 45 с достаточно широким диапазоном изменения диаметров (10–50 мм), которые прошли пневмо- и гидродробеструйную обработку.

Выводы

1. Использованный в работе метод расчета остаточных напряжений в цилиндрических образцах с диапазоном диаметров 10–25 мм из стали 20 после пневмодробеструйной обработки и с диапазоном диаметров 15–50 мм из стали 45 после гидродробеструйной обработки по первоначальным деформациям «образцов-свидетелей» показал, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями остаточных напряжений в гладких образцах и в образцах с надрезами не превышает 7 %.

2. При оценке влияния упрочняющих обработок на сопротивление усталости при изгибе в случае симметричного цикла нагружения цилиндрических образцов с надрезами из стали 20 и стали 45 установ-

лено, что использование рассчитанных по первоначальным деформациям «образцов-свидетелей» распределений остаточных напряжений позволяет прогнозировать приращение предела выносливости образцов в условиях концентрации напряжений с точностью до 11 %.

3. Для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненной детали с концентратором напряжений вначале необходимо определить первоначальные деформации «образца-свидетеля», обработанного одновременно с упрочняемой деталью. По первоначальным деформациям «образца-свидетеля» производится расчет остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали. Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости вычисляется по формулам (4) или (5), критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ – по формуле (2), коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния упрочнения на предел выносливости – по зависимости (3). После определения значений критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ по формуле (1) рассчитывается приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ поверхностно упрочненной детали с концентратором напряжений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-01-00699-а) и при государственной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности СГАУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 годы.

Библиографический список

1. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550 °C / I. Altenberger, R.K. Nalla, Y. Sano, L. Wagner, R.O. Ritchie // International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 44. – P. 292–302. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.03.008
2. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening / R.A. Brockman, W.R. Braisted, S.E. Olson, R.D. Tenaglia, A.H. Clauer, K. Langer, M.J. Shepard // International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 36. – No. 1. – P. 96–108. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.08.011

3. Dai K., Shaw L. Analysis of fatigue resistance improvements via surface severe plastic deformation // International Journal of Fatigue. – 2008. – Vol. 30. – No. 8. – P. 1398–1408. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.10.010

4. Residual stresses and fatigue performance / M.N. James, D.J. Hughes, Z. Chen, H. Lombard, D.G. Hattingh, D. Asquith, J.R. Yates, P.J. Webster // Engineering Failure Analysis. – 2007. – Vol. 14. – No. 2. – P. 384–395. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.02.011

5. Majzoobi G.H., Azadikhah K., Nemati J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6 // Materials Science and Engineering A. – 2009. – Vol. 516. – No. 1–2. – P. 235–247. DOI: 10.1016/j.msea.2009.03.020

6. McClung R.C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2007. – Vol. 30. – No. 3. – P. 173–205. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2007.01102.x

7. Soady K.A. Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: Mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening. Part 1. Effect of shot peening on fatigue resistance // Materials Science and Technology (United Kingdom). – 2013. – Vol. 29. – No. 6. – P. 637–651. DOI: 10.1179/1743284713Y.0000000222

8. Terres M.A., Laalai N., Sidhom H. Effect of nitriding and shot-peening on the fatigue behavior of 42CrMo4 steel: Experimental analysis and predictive approach // Materials and Design. – 2012. – Vol. 35. – P. 741–748. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.055

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

10. Радченко В.П., Афанасьева О.С. Методика расчета предела выносливости упрочненных цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Физ.-мат. науки. – 2009. – Т. 2(19). – С. 264–268. DOI: 10.14498/vsgtu733

11. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2012. – 125 с.

12. Серенсен С.В., Борисов С.П., Бородин Н.А. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочненных образцов с учетом кинетики остаточной напряженности // Проблемы прочности. – 1969. – № 2. – С. 3–7.

13. 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.

14. Остаточные напряжения и сопротивление усталости при растяжении–сжатии в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичев, Н.И. Яковенко, Д.И. Иванов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2007. – № 4. – С. 66–67.

15. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2008. – 64 с.

16. Methods of measuring residual stresses in components (Review) / N.S. Rossini, M. Dassisti, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi // Materials and Design. – 2012. – Vol. 35. – P. 572–588. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022

17. Recent advances in residual stress measurement / P.J. Withers, M. Turski, L. Edwards, P.J. Bouchard, D.J. Buttle // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2008. – Vol. 85. – No. 3. – P. 118–127. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2007.10.007

18. Shaik J., Bailey J.A. Residual stress distribution in machining annealed 18 percent nickel maraging steel // J. Eng. Mater. Technol. – 1986. – Vol. 108. – No. 2. – P. 93–98. DOI:10.1115/1.3225865

19. Саушкин М.Н., Радченко В.П., Павлов В.Ф. Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, № 2. – С. 173–182.

20. Моделирование остаточного напряженного состояния деталей в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса MSC.NASTRAN/MSC.PATRAN / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, О.Ю. Семенова, А.В. Иванова // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Техн. науки. – 2012. – № 1(33). – С. 106–113.

21. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях // Вопросы прочности элементов конструкций / Куйбышев. авиац. ин-т. – Куйбышев, 1973. – Вып. 60. – С. 160–170.

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

References

1. Altenberger I., Nalla R.K., Sano Y., Wagner L., Ritchie R.O. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550 °C. *International Journal of Fatigue*, 2012, vol. 44, pp. 292-302. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.03.008

2. Brockman R.A., Braisted W.R., Olson S.E., Tenaglia R.D., Clauer A.H., Langer K., Shepard M.J. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening, *International Journal of Fatigue*, 2012, vol. 36, no. 1, pp. 96-108. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.08.011

3. Dai K., Shaw L. Analysis of fatigue resistance improvements via surface severe plastic deformation, *International Journal of Fatigue*, 2008, vol. 30, no. 8, pp. 1398-1408. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.10.010

4. James M.N., Hughes D.J., Chen Z., Lombard H., Hattingh D.G., Asquith D., Yates J.R., Webster P.J. Residual stresses and fatigue performance, *Engineering Failure Analysis*, 2007, vol. 14, no. 2, pp. 384-395. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.02.011

5. Majzoobi G.H., Azadikhah K., Nemati J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6. *Materials Science and Engineering A*, 2009, vol. 516, no. 1-2, pp. 235-247. DOI: 10.1016/j.msea.2009.03.020

6. McClung R.C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2007, vol. 30, no. 3, pp. 173-205. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2007.01102.x

7. Soady K.A. Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: Mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening: Part 1 – Effect of shot peening on fatigue resistance. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 2013, vol. 29, no. 6, pp. 637-651. DOI: 10.1179/1743284713Y.0000000222

8. Terres M.A., Laalai N., Sidhom H. Effect of nitriding and shot-peening on the fatigue behavior of 42CrMo4 steel: Experimental analysis and predictive approach. *Materials and Design*, 2012, vol. 35, pp. 741-748. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.055

9. Pavlov V.F. O sviazi ostatochnykh napriazhenii i predela vynoslivosti pri izgibe v usloviakh kontsentratsii napriazhenii [On the relationship of residual stress and fatigue limit in bending under the stress concentration]. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie*, 1986, no. 8, pp. 29-32.

10. Radchenko V.P., Afanas'eva O.S. Metodika rascheta predela vynoslivosti uprochnennykh tsilindricheskikh obraztsov s kontsentratorami napriazhenii pri temperaturnykh vyderzhkakh v usloviakh polzuchesti [Calculation procedure of a fatigue point for strengthened cylindrical specimen with pressure concentrators at temperature endurances in the creep conditions]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki = Journal of the Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2009, vol. 2(19), pp. 264-268. DOI: 10.14498/vsgtu733

11. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakuliuk V.S. Prognozirovaniie soprotivleniia ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detalei po ostatochnym napriazheniiam [Predicting the Fatigue Resistance of Surface-Hardened Parts From Residual Stresses]. Samarskii nauchnyi tsentr Rossiiskoi akademii nauk, 2012. 125 p.

12. Serensen S.V., Borisov S.P., Borodin N.A. Evaluation of the fatigue resistance of surface-hardened specimens with residual-stress kinetics taken into account. *Strength of Materials*, 1969, vol. 1, no. 2, pp. 113-116. DOI: 10.1007/BF01526828

13. Ivanov S.I., Pavlov V.F., Prokhorov A.A. Effect of residual stresses on fatigue strength in torsion in conditions with stress concentration. *Strength of Materials*, 1988, vol. 20, no. 5, pp. 597-599. DOI: 10.1007/BF01528546

14. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Yakovenko N.I., Ivanov D.V. Residual stresses and endurance strength under tension-compression in the conditions of stress concentration. *Russian Aeronautics*, 2007, vol. 50, no. 4, pp. 442-445. DOI: 10.3103/S1068799807040174

15. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Ivanov V.B. Ostatochnye napriazheniia i soprotivlenie ustalosti uprochnennykh detalei s kontsentratorami napriazhenii [Residual Stresses and Fatigue Resistance of Hardened Parts with Stress Concentrators]. Samarskii nauchnyi tsentr Rossiiskoi akademii nauk, 2008. 64 p.

16. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review). *Materials and Design*, 2012, vol. 35, pp. 572-588. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022

17. Withers P.J., Turski M., Edwards L., Bouchard P.J., Buttle D.J. Recent advances in residual stress measurement. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, vol. 85, no. 3, pp. 118-127. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2007.10.007

18. Shaik J., Bailey J.A. Residual stress distribution in machining annealed 18 percent nickel maraging steel. *J. Eng. Mater. Technol.*, 1986, vol. 108, no. 2, pp. 93-98. DOI:10.1115/1.3225865

19. Saushkin M.N., Radchenko V.P., Pavlov V.F. Method of calculating the fields of residual stresses and plastic strains in cylindrical specimens with allowance for surface hardening anisotropy. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2011, vol. 52, no. 2, pp. 303-310. DOI: 10.1134/S0021894411020180

20. Sazanov V.P., Chirkov A.V., Semenova O.Iu., Ivanova A.V. Modelirovanie ostatochnogo napriazhennogo sostoianiia detalei v usloviakh kontsentratsii napriazhenii s ispol'zovaniem programmnoogo kompleksa MSC.NASTRAN/MSC.PATRAN [Residual stress condition modeling of parts in contexts of stress concentration with the use of the 'MSC.NASTRAN\MSC.Patran' software complex]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki = Journal of the Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2012, no. 1(33), pp. 106-113.

21. Ivanov S.I., Shatunov M.P., Pavlov V.F. Opredelenie dopolnitel'nykh ostatochnykh napriazhenii v nadrezakh na tsilindricheskikh detaliakh [Identification of Additional Residual Stresses at Notches in Cylindrical Parts]. *Voprosy prochnosti elementov konstruksii. Kuibyshevskii aviatsionnyi institut*, 1973, no. 60, pp. 160-170.

22. Pilkey Walter D. Peterson's Stress Concentration Factors, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1997, 508+xxxii p. DOI: 10.1002/9780470172674

Об авторах

Саушкин Михаил Николаевич (Самара, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и информатики Самарского государственного технического университета (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, e-mail: saushkin.mn@samgtu.ru).

Сазанов Вячеслав Петрович (Самара, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов Самарского государственного авиационного университета (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, e-mail: sopromat@ssau.ru).

Вакулюк Владимир Степанович (Самара, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов Самарского государственного авиационного университета (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, e-mail: sopromat@ssau.ru).

About the authors

Mikhail N. Saushkin (Samara, Russian Federation) – PhD in Physical & Mathematical Sciences, Assistant Professor, Department of Applied Mathematics & Computer Sciences, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya str., 443100, Samara, Russian Federation, e-mail: saushkin.mn@samgtu.ru).

Vyacheslav P. Sazanov (Samara, Russian Federation) – PhD in Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Strength of Materials, Samara State Aerospace University (34, Moskovskoe shosse, 443086, Samara, Russian Federation, e-mail: sopromat@ssau.ru).

Vladimir S. Vakulyuk (Samara, Russian Federation) – PhD in Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Strength of Materials, Samara State Aerospace University (34, Moskovskoe shosse, 443086, Samara, Russian Federation, e-mail: sopromat@ssau.ru).

Получено 28.10.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Саушкин М.Н., Сазанов В.П., Вакулюк В.С. Метод определения предела выносливости цилиндрических образцов из конструкционных сталей по остаточным напряжениям «образца-свидетеля» // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 4. – С. 178–196. DOI: [10.15593/perm.mech/2014.4.07](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2014.4.07)

Please cite this article in English as:

Saushkin M.N., Sazanov V.P., Vakulyuk V.S. Method of determining endurance limit stress of cylindrical specimens made of structural steels by residual stresses of “check test piece”. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 4. Pp. 178-196. DOI: [10.15593/perm.mech/2014.4.07](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2014.4.07)