

УДК 621.787:539.319

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СТАЛЕЙ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

© 2016 В.П. Сазанов, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв, В.К. Шадрин, В.Ф. Павлов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени акад. С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Статья поступила в редакцию 30.03.2016

Исследование посвящено изучению возможности прогнозирования предела выносливости цилиндрических образцов различного диаметра (10-50 мм) из сталей 20, 45, 40Х, 30ХГСА с круговыми надрезами полукруглого профиля радиуса 0,3 мм после опережающего поверхностного пластического деформирования (пневно- и гидродробеструйная обработка) по остаточным напряжениям (первоначальным деформациям) образца-свидетеля (втулка диаметром 51,5х45 мм), упрочнённого одновременно с гладкими образцами. Установлено, что сжимающие остаточные напряжения, рассчитанные в гладких образцах диаметром 10-50 мм по первоначальным деформациям образца-свидетеля, незначительно (до 10%) отличаются от определённых экспериментально. По разработанной ранее методике с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений были вычислены приращения пределов выносливости упрочнённых образцов с надрезами. Установлено, что расчётные значения приращений пределов выносливости при изгибе в случае симметричного цикла образцов с надрезами отличаются от экспериментальных не более, чем на 11%.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, пневнодробеструйная обработка, гидродробеструйная обработка, образец-свидетель, остаточные напряжения, первоначальные деформации, образцы с надрезами, предел выносливости

С целью повышения сопротивления усталости деталей машин в настоящее время широкое применение на практике нашли различные методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД). После обработки ППД в тонком поверхностном слое деталей наводятся сжимающие остаточные напряжения, изменяется структура и увеличивается твёрдость материала. Многочисленными исследованиями [1-8] установлено, что основную роль в повышении характеристик сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей играют сжимающие остаточные напряжения.

Для оценки влияния ППД на предел выносливости поверхностно упрочнённых деталей используются обычно два критерия: осевые остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали $\sigma_z^{нов}$ [9-13] и среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ [1, 4-6, 14, 15], вычисленные по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. Проведенные эксперименты [2-4, 6] показывают, что наиболее точно связь между приращением предела выносливости упрочнённых деталей и остаточными напряжениями отражает критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, предложенный в

работе [1], так как этот 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).

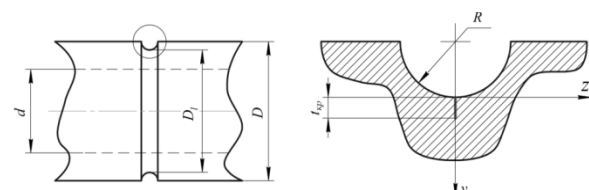


Рис. 1. Цилиндрический образец и нераспространяющаяся трещина усталости

Из формул (1) и (2) видно, что для определения расчётным путём приращения предела выносливости

Сазанов Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов. E-mail: sazanow@mail.ru

Вакулюк Владимир Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов. E-mail: sopromat@ssau.ru

Кирпичёв Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов. E-mail: dean_fla@ssau.ru

Шадрин Валентин Карпович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов. E-mail: shadrinvk@gmail.com

Павлов Валентин Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов. E-mail: sopromat@ssau.ru

$\Delta\sigma_{-1}$ 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 с различными концентраторами напряжений в работах [16, 17] было установлено, что коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ при симметричном цикле нагружения 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 приведенных в исследованиях [2-4, 6] 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 [2, 6]:

$$t_{кр} = 0,0216D_1, \quad (4)$$

Для полых цилиндрических образцов и деталей зависимость для $t_{кр}$ имеет следующий вид [3, 6]:

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

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

Для вычисления приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ поверхностно упрочнённой детали по формуле (1) необходимо знать достаточно точное распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя, которое можно получить только на образцах, вырезанных из обработанной ППД детали. Экспериментальные исследования показывают, что характер распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения оказывает существенное влияние на предел выносливости упрочнённых деталей, особенно в условиях концентрации напряжений [1-8, 12-15]. В связи с этим при экспериментальном измерении остаточных напряжений наилучшими методами являются такие методы, которые позволяют определять их распределение по толщине упрочнённого поверхностного слоя.

В настоящее время известно достаточно большое количество методов измерения остаточных деформаций и напряжений. В зависимости от способов воздействия на исследуемые деталь или образец их разделяют на механические и физические методы. Механические методы основаны на принципе упругой разгрузки детали или образца при последовательном удалении поверхностных слоёв с остаточными напряжениями. Измерив деформации, возникающие после разгрузки, по формулам теории упругости вычисляются остаточные напряжения. 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 упругого деформирования. В отличие от механических, физические методы не связаны с обязательным разрушением деталей и образцов, однако необходимо отметить, что достаточно точное распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя можно получить только лишь с помощью механических методов.

Сохранить исследуемую деталь и получить распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя в любом её сечении позволяет расчётно-экспериментальный метод с использованием образцов-свидетелей и современных расчётных комплексов, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений, причём при определении остаточных напряжений в этом случае разрушению подвергается только образец-свидетель. На практике образцы-свидетели традиционно используются для контроля качества упрочнения деталей различными методами поверхностного пластического деформирования. Образец-свидетель, имеющий определённые размеры и форму, проходит весь технологический цикл упрочняющей обработки вместе со штатной деталью.

В основе расчётно-экспериментального метода определения остаточных напряжений лежит известная гипотеза о том, что обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при ППД получают одинаковые первоначальные деформации. Однако во всех случаях практического применения эта гипотеза требует проведения тщательной экспериментальной и расчётной проверки. Именно с этой целью были проанализированы результаты испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя нескольких партий цилиндрических образцов из различных сталей с наружным диаметром в гладкой части от 10 до 50 мм (рис. 1) [6]. Параметры исследуемых образцов приведены в табл. 1.

Таблица. 1. Параметры образцов

Материал	Сталь 20	Сталь 45	Сталь 40Х	Сталь 30ХГСА
упрочнение	ПДО	ГДО	ГДО	ГДО
размеры образца $D \times d$, мм	10x0 25x0 25x15	15x5 25x15 50x40	25x0 25x10 25x19	10x0 15x0 15x5, 15x10

Все образцы перед испытаниями подвергались пневмодробеструйной (ПДО) и гидродробеструйной обработке (ГДО) стальной дробью. В качестве образца-свидетеля при проведении исследований вышеуказанных партий образцов использовалась втулка с наружным

диаметром 51,5 мм и внутренним диаметром 45 мм. В этой втулке определялись остаточные напряжения по толщине упрочнённого поверхностного слоя методом колец и полосок [18].

Расчётная часть исследований выполнялась методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN / NASTRAN. Конечно-элементные модели гладких образцов в осесимметричной постановке представляли 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 [19-24]. При проведении расчётов были приняты следующие допущения:

- все исследуемые образцы и образец-свидетель (втулка) при упрочнении получали одинаковые первоначальные деформации;
- первоначальные деформации являлись изотропными;
- деформации сдвига малы и при определении первоначальных деформаций они не учитывались.

Расчёты проводились в следующей последовательности:

- определение первоначальных деформаций в образце-свидетеле (втулке) с наружным 51,5 мм и внутренним 45 мм диаметрами;
- расчёт распределения остаточных напряжений в гладких образцах различного диаметра по полученным

значениям первоначальных деформаций образца-свидетеля (втулки);

- сравнение расчётных распределений остаточных напряжений в гладких образцах различного диаметра с экспериментальными 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 упрочнённого поверхностного слоя втулки (рис. 2), полученное методом колец и полосок.

Следующий этап расчёта выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых гладких образцов различного диаметра по первоначальному деформациям образца-свидетеля (втулки). При оценке приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей определяющими являются осевые σ_z остаточные напряжения, поэтому сравнение расчётных и экспериментальных распределений остаточных напряжений для исследуемых гладких образцов выполнялось по осевой компоненте. На рис. 3-6 приведены экспериментальные [6] и расчётные распределения осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a для исследуемых гладких образцов различного диаметра.

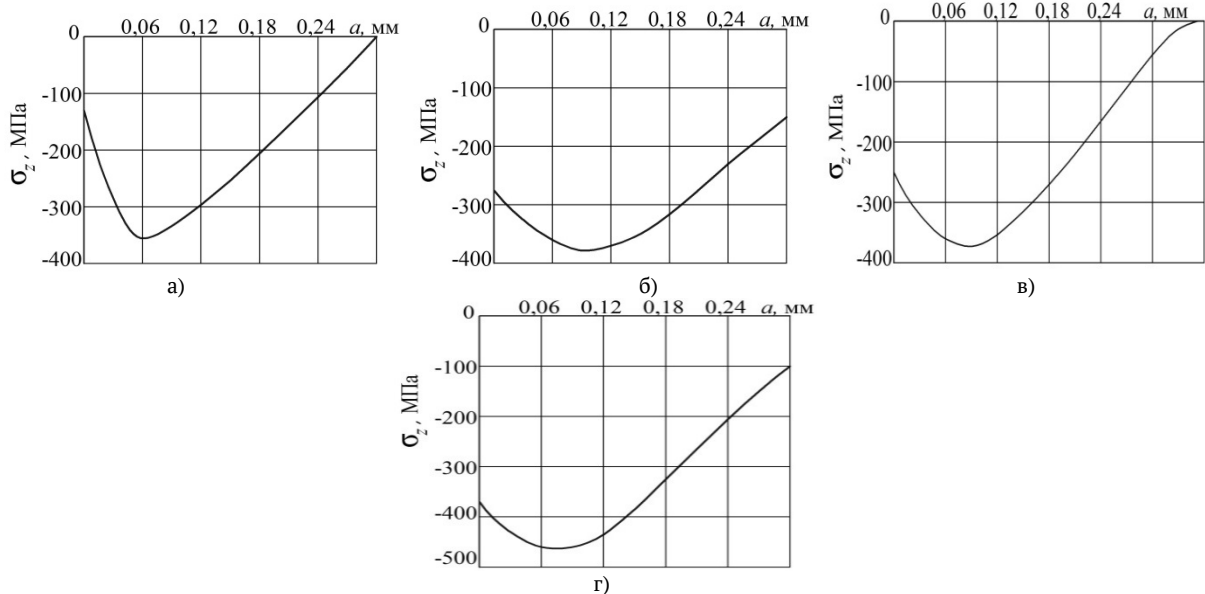


Рис. 2. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в «образцах-свидетелях» (втулки с $D=51,5$ мм, $d=45$ мм) из: а) стали 20, б) стали 45, в) стали 40Х, г) стали 30ХГСА

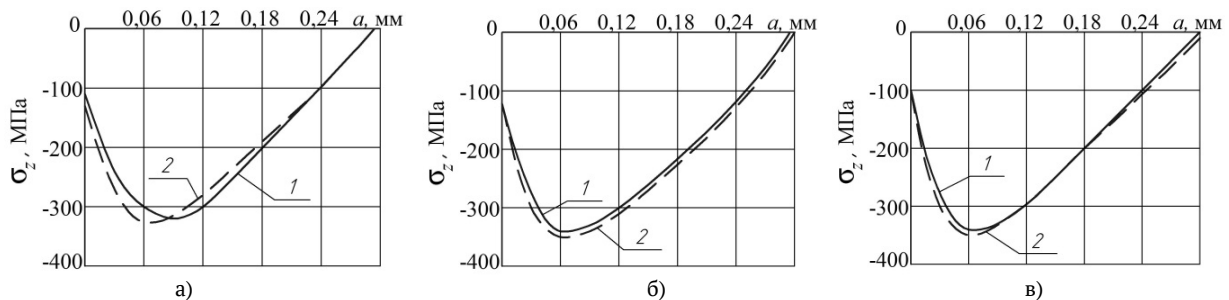


Рис. 3. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений после ПДО в гладких образцах из стали 20, определённых экспериментальным (1) и расчётным (2) методами: а) $D=10$ мм, $d=0$ мм; б) $D=25$ мм, $d=0$; в) $D=25$ мм, $d=15$ мм

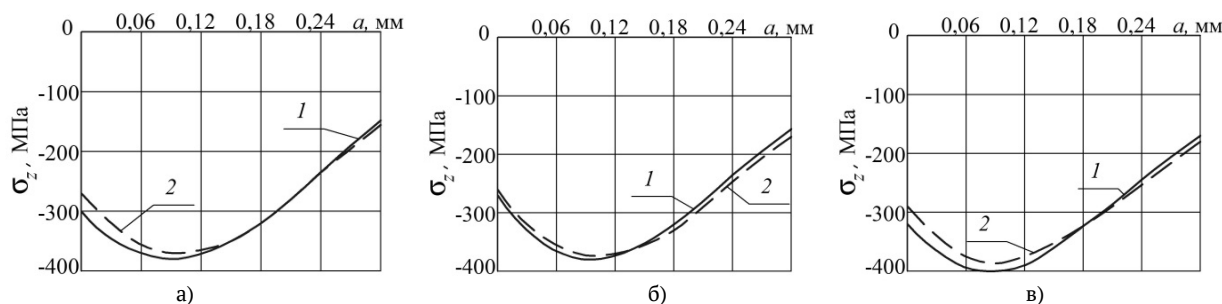


Рис. 4. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений после ГДО в гладких образцах из стали 45, определённых экспериментальным (1) и расчётным (2) методами:
а) $D=15$ мм, $d=5$ мм; б) $D=25$ мм, $d=15$ мм; в) $D=50$ мм, $d=40$ мм

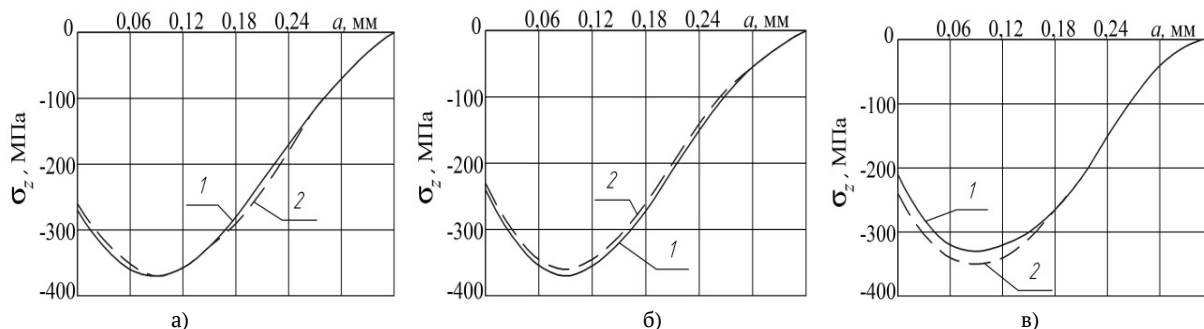


Рис. 5. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений после ГДО в гладких образцах из стали 40X, определённых экспериментальным (1) и расчётным (2) методами:
а) $D=25$ мм, $d=0$ мм; б) $D=25$ мм, $d=10$ мм; в) $D=25$ мм, $d=19$ мм

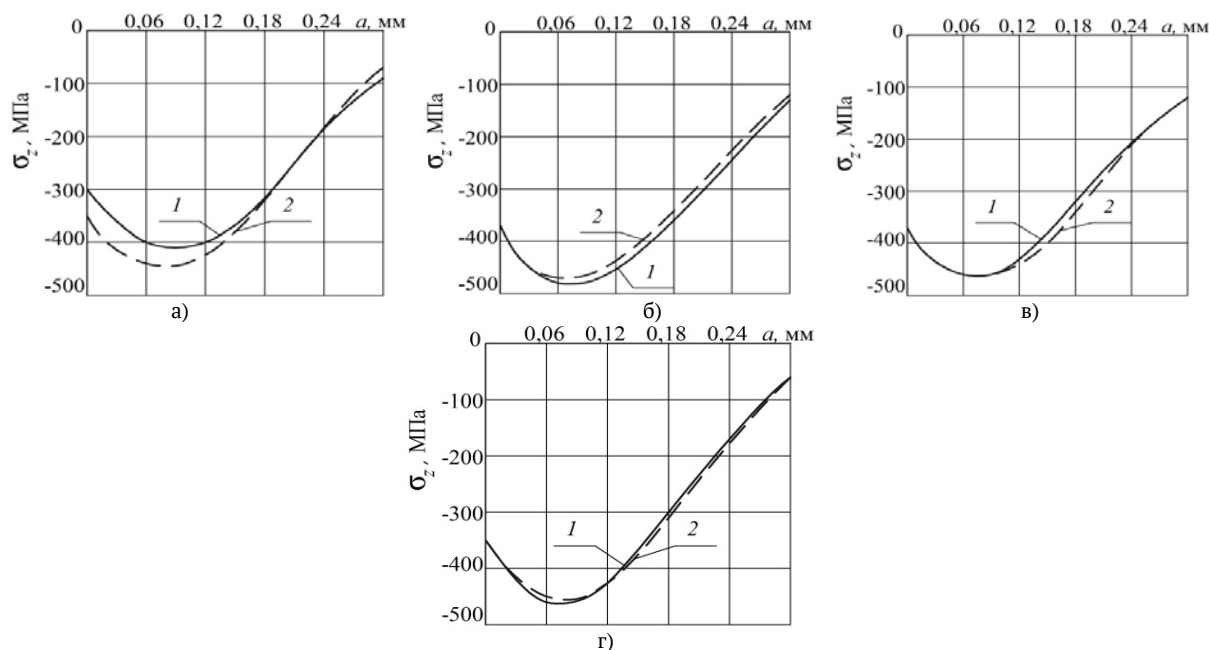


Рис. 6. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений после ГДО в гладких образцах из стали 30XГСА, определённых экспериментальным (1) и расчётным (2) методами:
а) $D=10$ мм, $d=0$ мм; б) $D=15$ мм, $d=0$ мм; в) $D=15$ мм, $d=5$ мм; г) $D=15$ мм, $d=10$ мм

Из приведенных на рис. 3-6 данных видно, что расчётные распределения осевых σ_z остаточных напряжений в гладких образцах незначительно отличаются от экспериментальных – по максимальным сжимающим остаточным напряжениям различие не превышает 10% (сталь 30XГСА, образец диаметром 10 мм). Этот результат указывает на то, что в сплошных цилиндрических деталях из сталей диаметром от 10 до 50 мм остаточные напряжения после ПДО и ГДО можно определять расчётным методом по первоначальным

деформациям образца-свидетеля, упрочнённого одновременно с гладкими образцами. Полученные расчётным методом распределения осевых остаточных напряжений после ПДО и ГДО в гладких образцах различного диаметра 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 (ОППД). Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись как сумма

дополнительных напряжений, возникающих за счёт перераспределения остаточных усилий гладких образцов при нанесении надрезов, и остаточных напряжений гладких образцов. Дополнительные остаточные напряжения рассчитывались двумя методами: аналитическим [25] и численным с использованием программного комплекса PATRAN / NASTRAN [21]. Необходимо отметить, что остаточные напряжения в образцах с надрезами, определённые двумя методами, были практически одинаковыми. На рис. 7-10

приведены экспериментальные [6] и расчётные эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами после ОППД. Установлено, что распределения сжимающих остаточных напряжений, полученные по экспериментальным и расчётным эпюрам гладких образцов, отличаются по наибольшим значениям не более, чем на 7%.

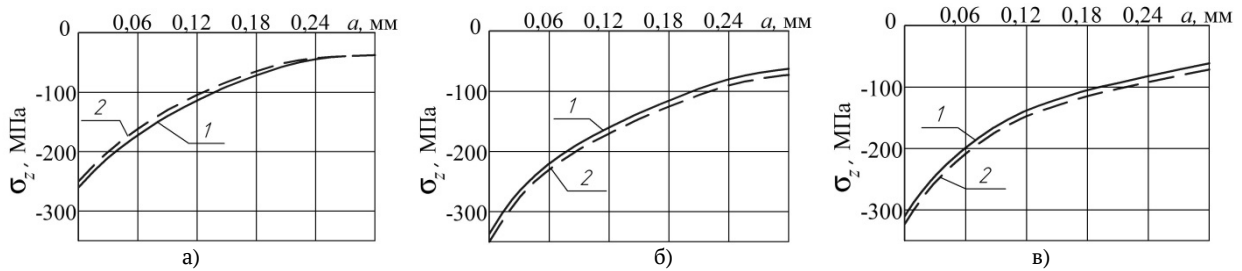


Рис. 7. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из стали 20 с надрезом $R=0,3$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным:
а) $D=10$ мм, $d=0$; б) $D=25$ мм, $d=0$; в) $D=25$ мм, $d=15$ мм

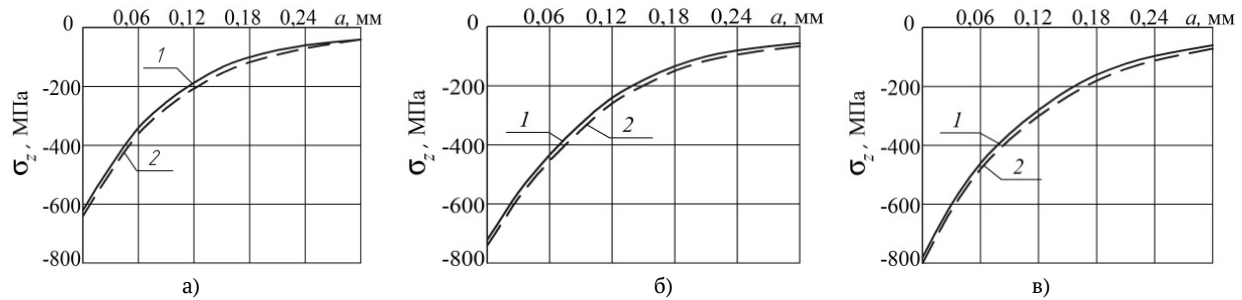


Рис. 8. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из стали 45 с надрезом $R=0,3$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным:
а) $D=15$ мм, $d=5$ мм; б) $D=25$ мм, $d=15$ мм; в) $D=50$ мм, $d=40$ мм

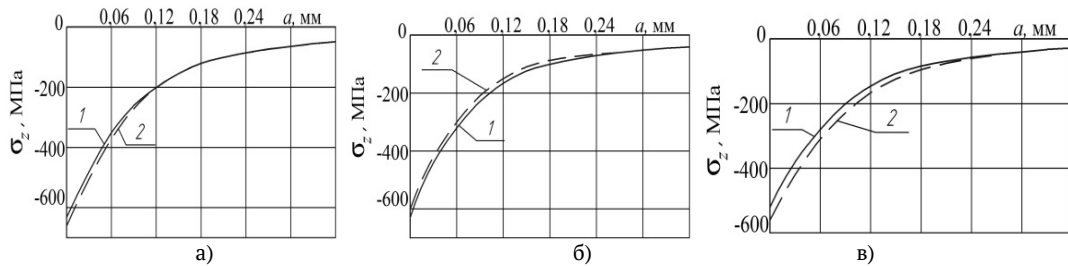
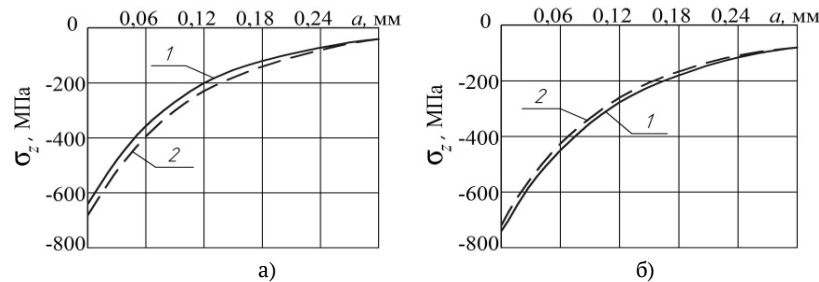


Рис. 9. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из стали 40Х с надрезом $R=0,3$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным:
а) $D=25$ мм, $d=0$ мм; б) $D=25$ мм, $d=10$ мм; в) $D=25$ мм, $d=19$ мм



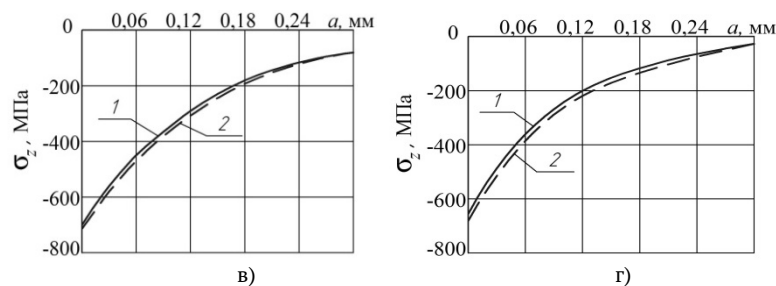


Рис. 10. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из стали 30ХГСА с надрезом $R=0,3$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: а) $D=10$ мм, $d=0$ мм; б) $D=15$ мм, $d=0$ мм; в) $D=15$ мм, $d=5$ мм; г) $D=15$ мм, $d=10$ мм

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, приведенные на рис. 7-10. Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости определялась по зависимостям (4) и (5). Значения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ и глубины трещины $t_{кр}$ содержатся в табл. 2-5.

Следующий этап расчёта выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых гладких образцов различного диаметра по первоначальным деформациям образца-свидетеля (втулки). При оценке приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей определяющими являются осевые σ_z остаточные напряжения, поэтому сравнение расчётных и экспериментальных распределений остаточных напряжений для исследуемых гладких образцов выполнялось по осевой компоненте. На рис. 3-6 приведены экспериментальные [6] и расчётные распределения осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a для исследуемых гладких образцов различного диаметра.

Таблица 2. Расчётные и экспериментальные значения приращений пределов выносливости образцов с надрезами из стали 20

D , мм	d , мм	D_1 , мм	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$, МПа	Расхождение, %
10	0	9.4	2.7	0.393	0.203	-122	48.0	45.0	6
25	0	24.4	2.9	0.377	0.527	-89	33.6	30.0	11
25	15	24.4	3.0	0.369	0.453	-91	33.5	32.5	3

Таблица 3. Расчётные и экспериментальные значения приращений пределов выносливости образцов с надрезами из стали 45

D , мм	d , мм	D_1 , мм	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$, МПа	Расхождение, %
15	5	14.4	2.8	0.385	0.303	-159	61.2	57.5	6
25	15	24.4	3.0	0.369	0.453	-131	48.3	45.0	7
50	40	49.4	3.1	0.361	0.733	-87	31.4	30.0	4

Таблица 4. Расчётные и экспериментальные значения приращений пределов выносливости образцов с надрезами из стали 40Х

D , мм	d , мм	D_1 , мм	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$, МПа	Расхождение, %
25	0	24,4	2,9	0,377	0,527	-109	41,1	42,5	3
25	10	24,4	2,9	0,377	0,504	-110	41,4	42,5	3
25	19	24,4	3,0	0,369	0,380	-117	43,2	40	8

Таблица 5. Расчётные и экспериментальные значения приращений пределов выносливости образцов с надрезами из стали 30ХГСА

D , мм	d , мм	D_1 , мм	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{он}$, 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 данных табл. 2-5 видно, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями приращений пределов выносливости за счёт ПДО и ГДО не превышает 11%. Следовательно, используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, представляется возможным прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых деталей из исследуемых сталей различного диаметра (10-50 мм) в условиях концентрации напряжений с достаточной для многоциклового усталости точностью. Кроме того, использование образцов-свидетелей позволит назначать наиболее оптимальные, по сопротивлению усталости, режимы и методы поверхностного пластического деформирования деталей сложной формы, что приведёт к значительному сокращению длительных и дорогостоящих испытаний на усталость.

Выводы:

1. Апробированный в исследовании метод расчёта остаточных напряжений в сплошных цилиндрических образцах диаметром 10-50 мм из сталей 20, 45, 40Х, 30ХГСА после ПДО и ГДО по первоначальным деформациям образца-свидетеля показал, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями остаточных напряжений в гладких образцах не превышает 10%, в образцах с надрезами – 7%.

2. При оценке влияния поверхностного упрочнения ПДО и ГДО на сопротивление усталости при изгибе в случае симметричного цикла сплошных цилиндрических образцов из исследуемых сталей с надрезами установлено, что использование рассчитанных по первоначальным деформациям образца-свидетеля распределений остаточных напряжений позволяет прогнозировать приращение предела выносливости образцов в условиях концентрации напряжений с точностью до 11%.

3. Проведенные расчётно-экспериментальные исследования показали, что применение образцов-свидетелей позволит назначать оптимальные по сопротивлению многоциклового усталости режимы и методы поверхностного пластического деформирования деталей сложной формы без проведения испытаний на усталость натурных деталей. Поэтому предлагаемый в настоящем исследовании метод прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям образца-свидетеля приведёт к существенному сокращению длительных и дорогостоящих испытаний на многоцикловую усталость.

4. Для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённой детали с концентратором напряжений вначале необходимо определить первоначальные деформации образца-свидетеля, обработанного одновременно с упрочняемой деталью. По первоначальным деформациям образца-свидетеля производится расчёт 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 упрочнённой детали с концентратором напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29-32.
2. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия вузов. 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 вузов. Машиностроение. 1988. №12. С. 37-40.
4. Иванов, С.И. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, Б.В. Минин и др. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2015. 171 с.
5. Радченко, В.П. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести / В.П. Радченко, О.С. Афанасьева // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки. 2009. №2 (19). С. 264-268.
6. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.
7. Вакулюк, В.С. Сопротивление усталости детали в зависимости от толщины упрочнённого слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник СГАУ. 2012. №3(34). С. 172-176.
8. Кирпичёв, В.А. Остаточные напряжения и сопротивление усталости образцов с V-образными надрезами из стали ВНС40 / В.А. Кирпичёв, М.Н. Саушкин, В.П. Сазанов, О.Ю. Семёнова // Вестник СГАУ. 2012. №5(36). Ч. 1. С. 95-99.
9. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. 131 с.
10. Серенсен, С.В. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости / С.В. Серенсен, С.П. Борисов, Н.А. Бородин // Проблемы прочности. 1969. №2. С. 3-7.
11. Туровский, М.Л. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали / М.Л. Туровский, Н.М. Шифрин // Вестник машиностроения. 1970. №11. С. 37-40.
12. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. 1976. №5. С. 25-27.
13. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, А.А. Прохоров // Проблемы прочности. 1988. №5. С. 31-33.
14. Павлов, В.Ф. Связь остаточных напряжений и предела выносливости при кручении в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов, А.А. Прохоров // Проблемы прочности. 1991. №5. С. 43-46.
15. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых гладких деталей / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.В. Чирков // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2012. №3(23). С. 102-107.
16. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.П. Филатов, О.В. Каранаева и др. // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. С. 678-685.
17. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.С.

- Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. 2011. Т.15. №4(44). С. 81-85.
18. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 53. С. 32-42.
19. Биргер, И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. 232 с.
20. Стружанов, В.В. Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоении двухслойных полос // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки. 2010. №5(21). С. 55-65.
21. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых 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.
22. Павлов, В.Ф. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. 124 с.
23. Вакулюк, В.С. Исследование влияния толщины упрочнённого слоя на остаточные напряжения во впадине концентратора методом первоначальных деформаций // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки. 2010. №1 (20). С. 222-225.
24. Саушкин, М.Н. Метод расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учётом анизотропии поверхностного упрочнения / М.Н. Саушкин, В.П. Радченко, В.Ф. Павлов // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. №2. С. 173-182.
25. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Межвузовский сборник. – Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып. 3. С. 88-95.
26. Петерсон, Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1977. 304 с.

RESEARCH THE INFLUENCE OF SURFACE HARDENING ON THE ENDURANCE LIMIT OF CYLINDRICAL SPECIMENS FROM VARIOUS STEELS ON THE RESIDUAL STRESSES OF REFERENCE SPECIMEN

© 2016 V.P. Sazanov, V.S. Vakulyuk, V.A. Kirpichyov, V.K. Shadrin, V.F. Pavlov

Samara State Aerospace University named after acad. S.P. Korolyov
(National Research University)

Research is devoted to studying the possibility of forecasting the endurance limit of cylindrical specimens of various diameter (10-50 mm) from steels 20, 45, 40H, 30HGSA with circular cuts of semicircular profile of 0,3 mm radius after advancing superficial plastic deformation (pneumo - and hydroshot-blasting processing) on the residual stresses (initial deformations) of the reference specimens (the plug with diameter of 51,5x45 mm) hardened simultaneously with smooth specimens. It is established that the compressive residual stresses calculated in smooth specimens with a diameter of 10-50 mm on initial deformations of reference specimen, slightly (to 10%) differs from defined experimentally. By the method developed earlier with use of the average integral residual stresses criterion the endurance limits increments of hardened specimens with cuts have been calculated. It is established that calculated values of endurance limits increments under bending in a case of symmetric cycle for specimens with cuts differ from experimental no more, than for 11%.

Key words: *superficial plastic deformation, pneumoshot-blasting processing, hydroshot-blasting processing, reference specimen, residual stresses, initial deformations, specimens with cuts, endurance limit*

Vyacheslav Sazanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Materials Resistance Department. E-mail: sazanow@mail.ru

Vladimir Vakulyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Materials Resistance Department. E-mail: sopromat@ssau.ru

Viktor Kirpichyov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Materials Resistance Department. E-mail: dean_fla@ssau.ru

Valentin Shadrin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Materials Resistance Department. E-mail: shadrinvk@gmail.com

Valentin Pavlov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Materials Resistance Department. E-mail: sopromat@ssau.ru