

Машиностроение

УДК 621.787:539.319

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

В.П. Сазанов

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королева
Россия, 443086, г. Самара, Московское ш., 34

E-mail: sopromat@ssau.ru

Методом конечно-элементного моделирования исследовано влияние гидродробеструйной обработки на предел выносливости цилиндрических образцов с надрезом из стали 12Х18Н10Т по остаточным напряжениям образца-свидетеля. По результатам исследования разработана методика оценки приращеня предела выносливости упрочненных опережающим поверхностным пластическим деформированием деталей в условиях концентрации напряжений с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений.

Ключевые слова: гидродробеструйная обработка, образец-свидетель, первоначальные деформации, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, предел выносливости.

Применение различных методов поверхностного упрочнения при правильном выборе технологического процесса приводит к значительному повышению сопротивления усталости деталей машин. К таким методам поверхностного пластического деформирования деталей относится и гидродробеструйная обработка (ГДО). Положительное влияние технологической обработки поверхностного слоя деталей связано в первую очередь с созданием в этом слое сжимающих остаточных напряжений [1], которые затрудняют развитие трещин, в результате чего повышаются характеристики сопротивления усталости деталей.

К настоящему времени разработано достаточно большое количество методов измерения остаточных напряжений и деформаций. В зависимости от способов воздействия на исследуемую деталь или исследуемый образец их разделяют обычно на механические и физические. Механические методы основаны на принципе упругой разгрузки объема металла при его освобождении от остаточных напряжений. Измеряя деформации, возникающие в процессе разгрузки, по формулам теории упругости вычисляют остаточные напряжения. К таким методам относятся метод полосок, метод колец и полосок, метод обтачивания, метод растачивания, метод коротких столбиков и ряд других. Физические методы основаны на замерах изменений физических свойств материалов в зависимости от степени упругого деформирования. В отличие от механических методов они не

связаны с обязательным разрушением детали. Однако следует отметить тот факт, что достаточно точное распределение остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя можно получить только лишь с помощью механических методов с частичным или полным разрушением детали.

На практике, особенно в серийном производстве, широко используются проты в изготовлении образцы-свидетели, которые вместе с деталями проходят один и тот же технологический процесс упрочнения. Контроль стабильности технологии поверхностной обработки осуществляется на образцах-свидетелях физическими или механическими методами без разрушения деталей.

Одной из важных задач механики остаточных напряжений является установление связи между остаточными напряжениями, возникающими в поверхностном слое при упрочнении, и сопротивлением деталей усталости. Особую значимость эта задача приобрела в связи с широким применением различных методов поверхностного упрочнения, приводящих к существенному повышению предела выносливости деталей, особенно в условиях концентрации напряжений.

Наиболее известные методики прогнозирования приращения предела выносливости за счет поверхностного пластического деформирования основываются на том, что критерий оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости деталей должен базироваться на учете остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя. При этом необходимо установить толщину поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями, ответственную за приращение предела выносливости.

Однако определение распределения остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя, полученное механическим методом с разрушением образцов-свидетелей, не решает всех проблем, касающихся оптимальности технологического процесса упрочнения. К таким проблемам относятся задачи определения достаточности зоны упрочнения в окрестности концентратора напряжений и распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения. Решить подобные задачи, не разрушая исследуемую деталь, и получить распределение остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя в любом ее сечении позволяют расчетно-экспериментальные методы с использованием образцов-свидетелей и применением современных расчетных комплексов, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений (PATRAN/NASTRAN, ANSYS). При этом определение остаточных напряжений механическими методами производится только на образцах-свидетелях.

В основе представленного в данном исследовании расчетно-экспериментального метода лежит известная в механике остаточных напряжений концепция, что обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при поверхностном пластическом деформировании получают одинаковые первоначальные деформации [2]. Однако во всех случаях практического применения эта концепция требует проведения тщательной экспериментальной и расчетной проверки. Для этой цели было выполнено исследование результатов испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя нескольких партий цилиндрических образцов из стали 12X18H10T [3]. В исследуемые партии цилиндрических образцов с наружным диаметром D и диаметром отверстия d (рис. 1) входили следующие образцы: $D/d = 10/0$; $D/d = 15/0$; $D/d = 15/5$; $D/d = 15/10$ мм/мм.

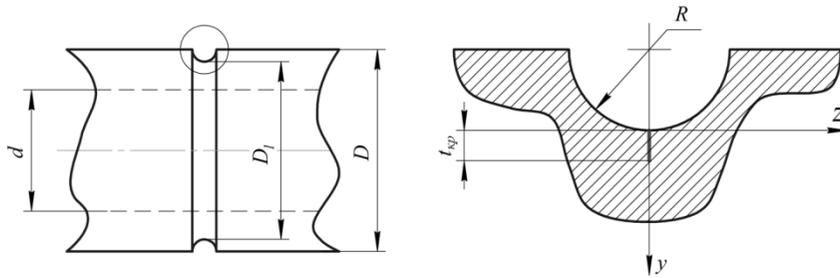


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом и нераспространяющаяся трещина усталости

Гладкие образцы всех партий подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО), после которой на них наносились круговые надрезы полукруглого профиля с радиусом $R = 0,3$ мм. В качестве образца-свидетеля использовалась втулка с наружным диаметром $D = 15$ мм и внутренним $d = 10$ мм в отличие от ранее проведенного исследования [4], где применялась втулка с размерами $D/d = 51,5/45$ мм/мм. Определение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя в упрочненных образцах-свидетелях и в гладких образцах выполнялось методом колец и полосок [5]. На рис. 2 приведено распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя образца-свидетеля (втулка $D/d = 15/10$ мм/мм) после ГДО.

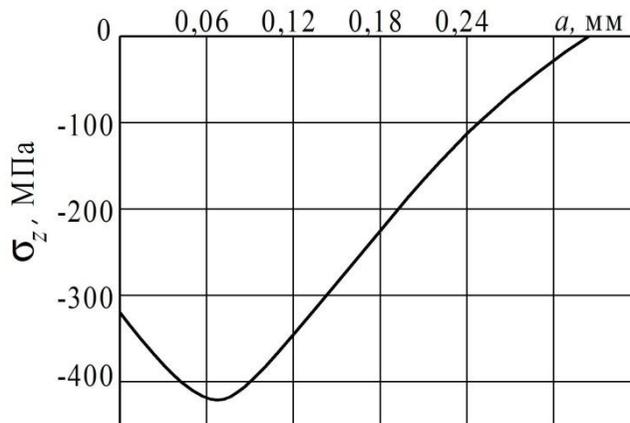


Рис. 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в образце-свидетеле (втулка диаметром $D/d = 15/10$ мм/мм) после ГДО

Расчетная часть исследований производилась методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя выполнялось методом термоупругости [6–8]. При проведении расчетов были приняты следующие допущения:

- все гладкие образцы и образцы-свидетели при упрочнении получали одинаковые первоначальные деформации;
- первоначальные деформации являлись изотропными;
- деформации сдвига малы и при определении первоначальных деформаций они не учитывались.

Расчеты проводились в следующей последовательности:

- определение первоначальных деформаций в образце-свидетеле (втулка диаметром $D/d = 15/10$ мм/мм);
- расчет распределения остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя гладких образцов по полученным значениям первоначальных деформаций образца-свидетеля;
- сравнение расчетных распределений остаточных напряжений гладких образцов с их экспериментальными распределениями, приведенными в работе [3].

При определении первоначальных деформаций в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя образца-свидетеля (втулки диаметром $D/d = 15/10$ мм/мм). При принятых допущениях для получения совпадения распределения расчетных и экспериментальных значений осевых остаточных напряжений образца-свидетеля было проведено 3 итерации.

Второй этап расчета выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых образцов диаметрами $D/d = 10/0$; $D/d = 15/0$; $D/d = 15/5$ мм/мм по первоначальным деформациям образца-свидетеля. При оценке приращения предела выносливости определяющими являются осевые σ_z остаточные напряжения [1, 3, 9], поэтому сравнение расчетных и экспериментальных распределений остаточных напряжений для исследуемых образцов проводилось по осевой компоненте.

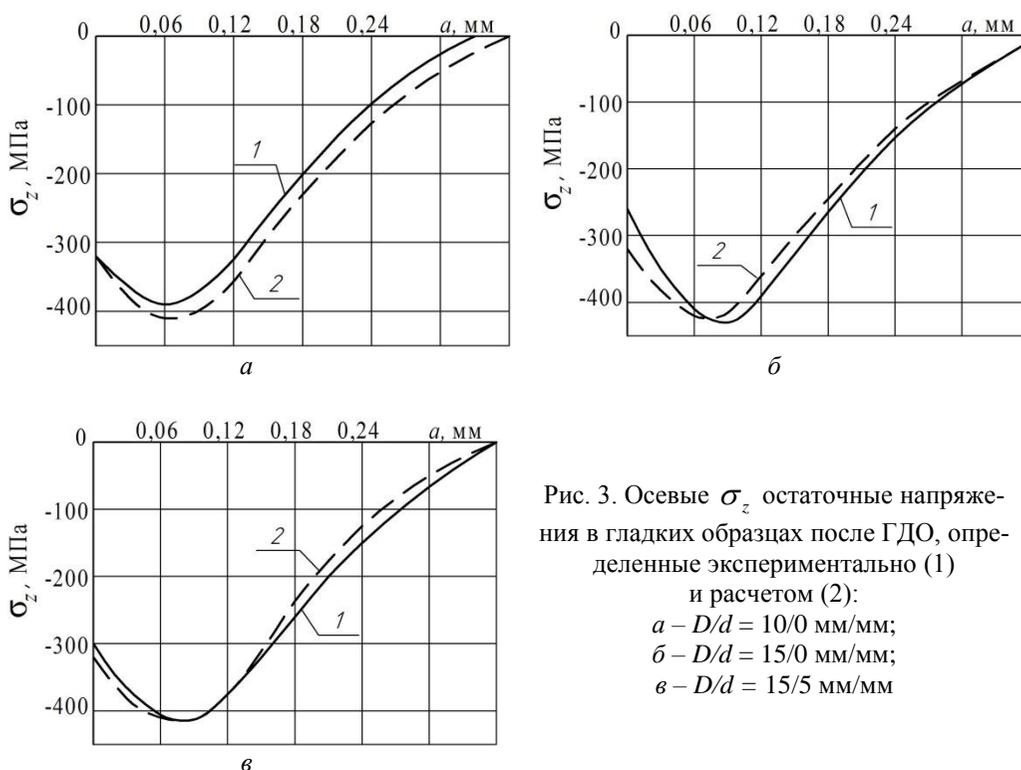


Рис. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в гладких образцах после ГДО, определенные экспериментально (1) и расчетом (2):

а – $D/d = 10/0$ мм/мм;

б – $D/d = 15/0$ мм/мм;

в – $D/d = 15/5$ мм/мм

На рис. 3 представлены экспериментальные [3] и расчетные эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя гладких образцов. Из приведенных данных видно, что расчетные значения наибольших сжи-

мающих остаточных напряжений отличаются от экспериментальных не более чем на 8 % ($D/d = 10/0$ мм/мм). На основании этих данных можно сделать вывод, что при использовании первоначальных деформаций образца-свидетеля расчетным методом представляется возможным определить остаточные напряжения в детали, упрочненной одновременно с этим образцом.

Полученные расчетом распределения остаточных напряжений после гидродробеструйной обработки в гладких образцах использовались для расчета распределения остаточных напряжений в образцах с круговым надрезом полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм (см. рис. 1), нанесенным после упрочнения ГДО, то есть после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД). Остаточные напряжения в образцах с надрезом рассчитывались двумя методами: аналитическим [10] и численным с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN. Следует отметить, что остаточные напряжения, определенные двумя методами, имели хорошее совпадение.

На рис. 4 приведены экспериментальные [3] и расчетные эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами после ОППД. Можно видеть, что распределения остаточных напряжений, полученные по экспериментальным и расчетным эпюрам гладких образцов, отличаются по наибольшим значениям не более чем на 10 % (см. рис. 4, $a - D/d = 10/0$ мм/мм).

Расчетная оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ предела выносливости образцов с надрезами при изгибе в случае симметричного цикла производилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [3, 9, 11]:

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

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 образца (детали) с концентратором по толщине поверхностного слоя a ;

$\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$;

$t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочненном образце (детали) с концентратором напряжений при работе на пределе выносливости.

Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости, приведенная в таблице, определялась по зависимости, установленной на основании многочисленных экспериментов в работах [3, 12]:

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

где D_1 – диаметр опасного сечения образца (детали) с концентратором напряжений (см. рис. 1).

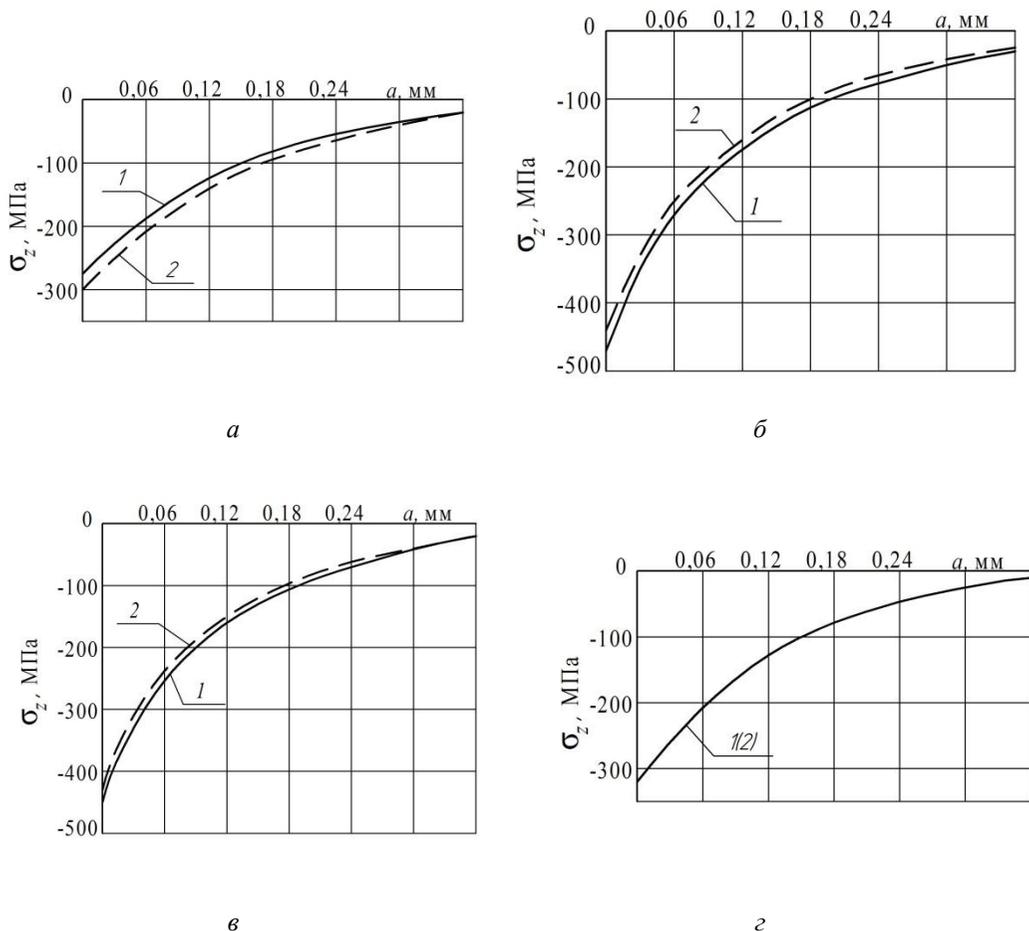


Рис. 4. Осевые σ_z остаточные напряжения в опасном сечении образцов с надрезами $R = 0,3$ мм, вычисленные по экспериментальным (1) и расчетным (2) данным:
 а – $D/d = 10/0$ мм/мм; б – $D/d = 15/0$ мм/мм; в – $D/d = 15/5$ мм/мм;
 г – $D/d = 15/10$ мм/мм

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ вычислялись по формуле (2) по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов с использованием расчетных распределений остаточных напряжений, приведенных на рис. 4, и содержатся в таблице. Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости рассчитывался по зависимости, установленной в работе [13]:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,08 \alpha_\sigma, \quad (4)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений при изгибе, который определялся методом конечно-элементного моделирования с применением расчетного комплекса ANSYS и представлен в таблице. В моделях деталей

для определения α_{σ} при изгибе использовался гармонический осесимметричный конечный элемент типа PLANE83.

Расчетные и опытные значения пределов выносливости образцов с надрезом из стали 12X18H10T после ГДО

| 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 | 2,54 | 0,406 | 0,203 | -129 | 52,4 | 45 | 16 |
| 15 | 0 | 14,4 | 2,70 | 0,393 | 0,311 | -117 | 46 | 42,5 | 8 |
| 15 | 5 | 14,4 | 2,63 | 0,399 | 0,303 | -119 | 47,5 | 42,5 | 12 |
| 15 | 10 | 14,4 | 2,29 | 0,427 | 0,249 | -115 | 49,1 | 42,5 | 15 |

Далее по формуле (1) вычислялись расчетные значения приращений $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ предела выносливости упрочненных ГДО образцов с надрезами (см. таблицу) и сравнивались с опытными $(\Delta\sigma_{-1})_{он}$ значениями, приведенными в работе [3].

Из данных таблицы видно, что расхождение между расчетными и опытными значениями приращений предела выносливости не превышает 16 %, поэтому, используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, можно прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочненных деталей с концентраторами напряжений с достаточной для многоциклового усталости точностью.

Выводы

1. Использованный в настоящем исследовании метод расчета остаточных напряжений в цилиндрических образцах диаметром 10-15 мм из стали 12X18H10T после гидродробеструйной обработки по первоначальным деформациям образца-свидетеля показал, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями остаточных напряжений в гладких образцах не превышает 8 %, в образцах с концентраторами – 10 %.

2. При исследовании влияния упрочнения пневмодробеструйной обработкой на многоцикловую усталость при изгибе образцов из стали 12X18H10T с концентраторами установлено, что использование рассчитанных по первоначальным деформациям образца-свидетеля распределений остаточных напряжений позволяет прогнозировать приращение предела выносливости с погрешностью до 16 %.

3. На основании проведенного исследования разработана методика оценки приращения предела выносливости поверхностно упрочненной детали с использованием образца-свидетеля, которая выполняется поэтапно в следующей последовательности:

- определение распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя образца-свидетеля;
- определение методом конечно-элементного моделирования первоначальных деформаций образца-свидетеля, обработанного одновременно с упрочняемой деталью;

- определение остаточных напряжений в опасном сечении детали по первоначальным деформациям образца-свидетеля;
- определение критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости по формуле (3), критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ по формуле (2), коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния упрочнения на предел выносливости по зависимости (4);
- определение приращения предела выносливости поверхностно упрочненной детали с концентратором напряжений по формуле (1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванов С.И., Павлов В.Ф.* Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 25-27.
2. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
3. *Павлов В.Ф., Киртичѐв В.А., Вакулюк В.С.* Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
4. *Вакулюк В.С., Сазанов В.П., Павлов В.Ф., Шадрин В.К.* Оценка влияния гидродробеструйной обработки на многоцикловую усталость цилиндрических деталей из сплава Д16Т по первоначальным деформациям образца-свидетеля // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2(42). – С. 87-93.
5. *Иванов С.И.* К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
6. *Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулюк В.С., Киртичѐв В.А.* Расчет остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 124 с.
7. *Стружанов В.В.* Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоении двухслойных полос // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2010. – № 5(21). – С. 55-63.
8. *Сазанов В.П., Чирков А.В., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С.* Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3(27). Ч. 3. – С. 171-174.
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. *Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф.* Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Межвузовский сборник. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып. 3. – С. 88-95.
11. *Радченко В.П., Афанасьева О.С.* Методика расчета предела выносливости упрочненных цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2009. – № 2 (19). – С. 264-268.
12. *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.
13. *Киртичѐв В.А., Филатов А.П., Каранаева О.В., Чирков А.В., Семѐнова О.Ю.* Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. – С. 678-685.

Статья поступила в редакцию 5 ноября 2014 г.

USING FINITE ELEMENT MODELING FOR ESTIMATION OF ENDURANCE LIMIT OF THE SPECIMENS MADE OF 12X18H10T STEEL BY RESIDUAL STRESS OF THE REFERENCE SPECIMEN

V.P. Sazanov

S.P. Korolyov Samara State Aerospace University
34, Moskovskoye sh., Samara, 443086, Russian Federation

Method of finite element modeling is used to study the influence of hydraulic shot blasting on endurance limit of notched cylindrical specimens made of 12X18H10T steel by residual stress of the reference specimen. The results obtained are used as a basis for development of the method for estimation of endurance limit increment of parts strengthened by surface plastic deformation in conditions of stress concentration using the average integral residual stress criterion.

Keywords: *hydro blasting, reference specimen, initial deformations, average integral residual stresses criterion, endurance limit.*