



Кирпичёв В. А.

Сазанов В. П.

Шадрин В. К.

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

Kirpichev V. A.

Sazanov V. P.

Shadrin V. K.

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

УДК 621.787:539.319

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

На примере поверхностно упрочнённых сплошных и полых цилиндрических образцов с надрезами из стали 40Х показано, что используя первоначальные деформации образца-свидетеля, обработанного одновременно с исследуемой деталью, представляется возможным прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, образец-свидетель, остаточные напряжения, предел выносливости.

Эксплуатационные качества изделий авиационной и ракетно-космической техники определяются, в числе других характеристик, ресурсом и надёжностью работы, в первую очередь, высоконагруженных узлов и деталей, прочность которых зависит от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. При переменных внешних нагрузках и длительного их воздействия особую значимость приобретает влияние физико-механического состояния поверхностного слоя деталей в местах наиболее вероятного разрушения – концентраторов напряжений. Среди характеристик этого состояния важную роль играют остаточные напряжения, возникающие при различных технологических процессах обработки деталей. В основе образования остаточных напряжений лежат необратимые объёмные изменения в материале деталей. Для повышения сопротивления усталости деталей машин широко применяются различные методы поверхностного пластического деформирования. Эти методы оказываются наиболее эффективными для деталей сложной формы с различными концентраторами напряжений.

Для оценки эффективности повышения сопротивления усталости деталей за счёт

упрочняющих технологий и оптимизации режимов упрочнения на стадии проектирования необходимо разрабатывать специализированные расчётно-теоретические и расчётно-экспериментальные методы. В данной работе для исследования применён расчётно-экспериментальный метод, который основан на использовании конечно-элементного моделирования (комплекс PATRAN/NASTRAN), а также экспериментальных механических методов определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя.

Использованный в данном исследовании расчётно-экспериментальный метод с применением образцов-свидетелей и современных расчётных комплексов позволяет сохранить исследуемую деталь и получить распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя в любом её сечении. В этом случае при измерении остаточных напряжений механическими методами разрушению подвергается только образец-свидетель. Такой образец, имеющий определённую форму и геометрические размеры, проходит весь технологический цикл обработки вместе со штатной деталью.

В основе вышеуказанного расчётно-экспериментального метода лежит известная



концепция, что обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при поверхностном пластическом деформировании получают одинаковые первоначальные деформации [1-3]. Однако, во всех случаях практического применения, эта концепция требует проведения тщательной экспериментальной и расчётной проверки. С целью апробации и правильности выбора

принятых положений и расчётных методов было проведено исследование результатов испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя нескольких партий цилиндрических образцов из стали 40X [4] с размерами $D \times d$: 25x0 мм; 25x10 мм; 25x19 мм, где D – наружный диаметр, d – внутренний диаметр (рис. 1).

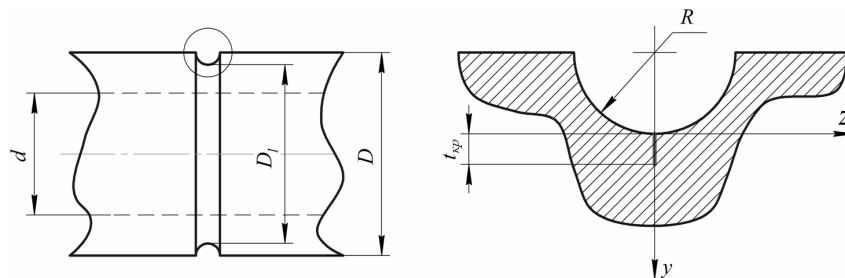


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом и нераспространяющаяся трещина усталости

Образцы перед испытаниями подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО). В качестве образца-свидетеля при проведении исследований использовалась цилиндрическая втулка диаметром 51,5x45 мм, в которой определялись остаточные напряжения по толщине упрочнённого поверхностного слоя методом колец и полосок [5].

Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя выполнялось методом термоупругости [6] с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. При проведении расчётов были приняты следующие условия:

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

– деформации сдвига малы и в первоначальных деформациях эта составляющая не учитывалась.

Расчёты проводились в следующей последовательности:

– определение первоначальных деформаций на образце-свидетеле диаметром 51,5x45мм;

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

– сравнение расчётных распределений остаточных напряжений для образцов с их экспериментальными распределениями;

– расчёт распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами;

– прогнозирование приращения предела выносливости образцов с надрезами за счёт упрочнения и сравнение полученных значений с результатами испытаний образцов на усталость.

При определении первоначальных деформаций в конечно-элементной модели образца-свидетеля в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя a (рис. 2) этого образца.

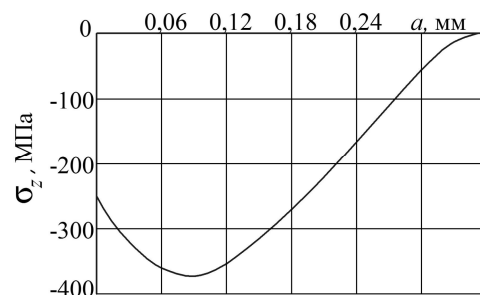


Рис. 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в образце-свидетеле (втулка диаметром 51,5x45 мм) после ГДО

Известно [7], что при оценке приращения предела выносливости определяющими являются осевые остаточные напряжения. Поэтому сравнение расчётных и экспериментальных распределений остаточных напряжений выполнялось по осевой компоненте. На рис. 3 представлены экспериментальные [4] и расчётные распределения осевых σ_z остаточных



напряжений в гладких образцах по толщине поверхностного слоя a . Из данных рис. 3 видно, что расхождение расчётных и экспериментальных значений наибольших осевых σ_z остаточных напряжений не превышает 8% ($D = 25$ мм, $d = 19$ мм).

Полученные расчётным методом распределения осевых остаточных напряжений в гладких образцах после гидродробеструйной обработки использовались для расчёта

распределения остаточных напряжений в образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм, нанесёнными на гладкие образцы после упрочнения ГДО. Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись как сумма дополнительных напряжений, возникающих за счёт перераспределения остаточных усилий при нанесении надрезов, и остаточных напряжений гладких образцов.

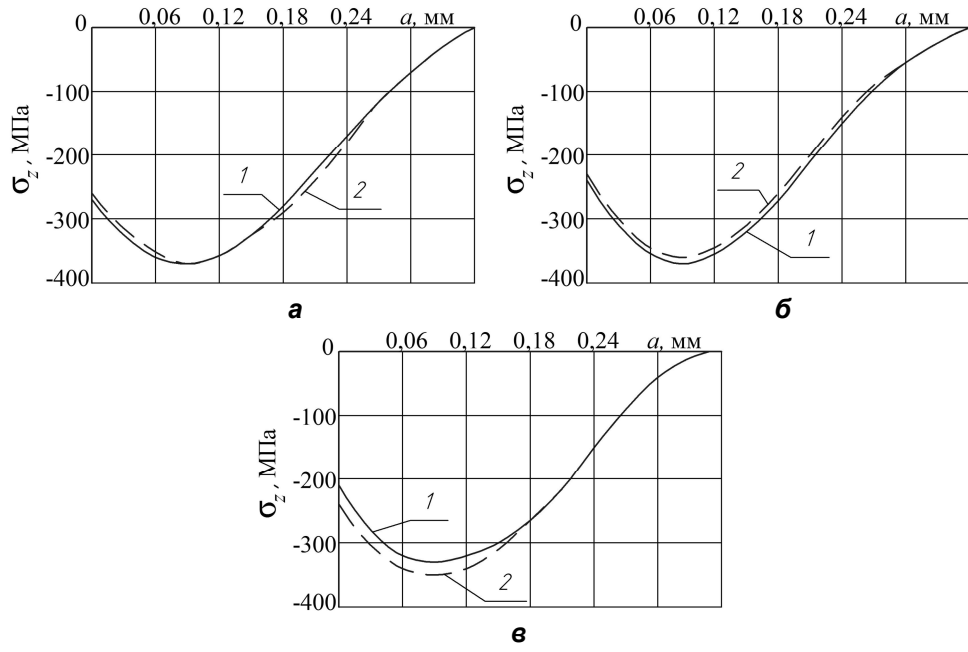


Рис. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в гладких образцах после ГДО, определённые экспериментально (1) и расчётом (2): а – $D = 25$ мм; б – $D = 25$ мм, $d = 10$ мм; в – $D = 25$ мм, $d = 19$ мм

Дополнительные остаточные напряжения рассчитывались двумя методами: аналитическим [8] и численным с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [6]. На рис. 4 представлены экспериментальные [4] и расчётные эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами после опережающего поверхностного пластического деформирования. Видно, что остаточные напряжения, полученные по экспериментальным и расчётным эпюрам гладких образцов, отличаются по наибольшим значениям не более, чем на 6% (рис. 4, в – $D = 25$ мм, $d = 19$ мм).

Прогнозирование влияния гидродробеструйной обработки на приращение предела выносливости образцов с надрезами при изгибе в случае симметричного цикла

$\Delta\sigma_{-1}$ с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{осм}$ [4, 9] проводилось по следующей зависимости:

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

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

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

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения образца до текущего слоя, выраженное в долях



$t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в опасном сечении упрочнённого

образца (детали) при работе на пределе выносливости (рис. 1).

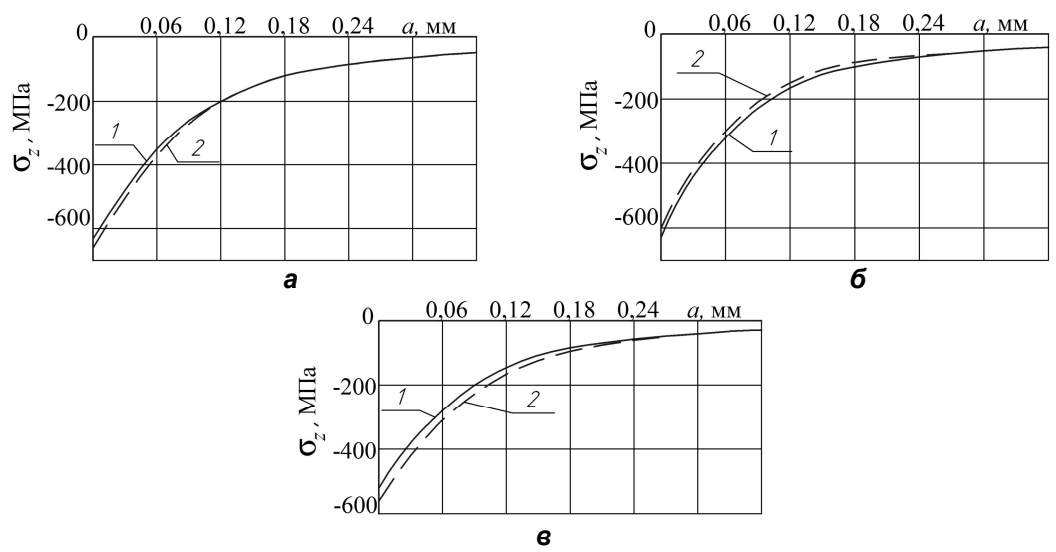


Рис. 4. Осьевые σ_z остаточные напряжения в образцах с надрезами $R = 0,3$ мм, вычисленные по экспериментальным (1) и расчётным (2) данным: а – $D = 25$ мм; б – $D = 25$ мм, $d = 10$ мм; в – $D = 25$ мм, $d = 19$ мм

На основании многочисленных экспериментальных данных для образцов и деталей из различных материалов с различными концентраторами напряжений в работе [10] было установлено, что коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ зависит только от степени концентрации напряжений и вычисляется для случая изгиба по следующей формуле:

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

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который определялся по данным справочника [11] и представлен в табл. 1.

**Таблица 1
Расчётные и экспериментальные значения пределов выносливости образцов с надрезами**

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

В работах [4, 12-14] установлено, что критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации, асимметрии цикла напряжений и определяется только размерами опасного поперечного сечения. Для

цилиндрических образцов и деталей зависимость для $t_{кр}$ имеет следующий вид [4, 13]:

$$t_{кр} = 0,0216D_1 \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D_1} \right)^3 \right], \quad (4)$$

где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали, d – диаметр отверстия образца



или детали (рис. 1). Расчётные значения $t_{кр}$, вычисленные по формуле (4), приведены в табл. 1.

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, значения которого представлены в табл. 1, вычислялся 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, приведённые на рис. 4.

После вычисления критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$, по формуле (1) определялись расчётные значения приращений пределов выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ упрочнённых гидродробеструйной обработкой образцов с надрезами радиуса $R = 0,3$ мм (табл. 1) и сравнивались с экспериментальными значениями $(\Delta\sigma_{-1})_{экс}$, приведёнными в работе [4].

Из данных табл. 1 видно, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями приращений пределов выносливости за счёт ГДО не превышает 8%. Следовательно, используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, представляется возможным прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей из стали 40Х в условиях концентрации напряжений с достаточной для многоциклового усталости точностью.

Список использованных источников

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
2. Павлов В.Ф. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулук, В.А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.
3. Стружанов В.В. Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоении двухслойных полос / В.В. Стружанов // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки, 2010. – №5(21). – С. 55–63.
4. Павлов В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно

упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

5. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32–42.

6. 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.

7. Иванов С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25–27.

8. 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.

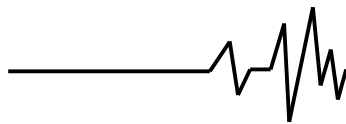
9. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29–32.

10. Кирпичёв В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.П. Филатов, О.В. Каранаева, А.В. Чирков, О.Ю. Семёнова // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. – С. 678–685.

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

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

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



14. Иванов С.И. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, Г.В. Коновалов, Б.В. Минин. – М.: Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации» МАП, 1992. – 192 с.

Список источников в транслитерации

1. Birger I.A. Ostatochnye napryazheniya / I.A. Birger. – М.: Mashgiz, 1963. – 232 s.

2. Pavlov V.F. Raschet ostatochnykh napryazheniy po pervonachalnym deformatsiyam / V.F. Pavlov, A.K. Stolyarov, V.S. Vakulyuk, V.A. Kirpichev. – Samara: Izdatelstvo SNTZ RAN, 2008. – 124 s.

3. Struzhanov V.V. Ob ostatochnykh napryazheniyakh posle prokatki i rassloenii dvukhsloynnykh polos / V.V. Struzhanov // Vestnik SamGTU. Ser.: fiz.- mat. nauki, 2010. – №5 (21). – S. 55-63.

4. Pavlov V.F. Prognozirovaniye soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam / V.F. Pavlov, V.A. Kirpichev, V.S. Vakulyuk. – Samara: Izdatelstvo SNTZ RAN, 2012. – 125 s.

5. Ivanov S.I. K opredeleniyu ostatochnykh napryazheniy v tsilindre metodom kolets i polosok / S.I. Ivanov // Ostatochnye napryazheniya. – Kuybyshev: KuAI, 1971. – Vyp. 53. – S. 32-43.

6. Sazanov V.P. Modelirovaniye pereraspredeleniya ostatochnykh napryazheniy v uprochnennykh tsilindricheskikh obraztsakh pri operezhayuschem poverkhnostnom plasticheskom deformirovaniy / V.P. Sazanov, A.V. Chirkov, V.A. Samoylov, Yu.S. Larionova // Vestnik SGAU. – 2011. – №3 (27). Ch. 3. – S. 171-174.

7. Ivanov S.I. Vliyanie ostatochnykh napryazheniy i naklepa na ustalostnyuyu prochnost / S.I. Ivanov, V.F. Pavlov // Problemy prochnosti. – 1976. – №5. – S. 25-27.

8. Ivanov S.I. Vliyanie ostatochnykh napryazheniy na vynoslivost obraztsov s nadrezom / S.I. Ivanov, M.P. Shatunov, V.F. Pavlov // Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruktsiy: Mezhevuzovskiy sbornik. – Kuybyshev: KuAI, 1974. – Vyp. 3. – S. 88-95.

9. Pavlov V.F. O svyazi ostatochnykh napryazheniy i predela vynoslivosti pri izgibe v usloviyakh kontsentratsii napryazheniy / V.F. Pavlov // Izvestiya vuzov. Mashinostroeniye. – 1986. – №8. – S. 29-32.

10. Kirpichev V.A. Prognozirovaniye predela vynoslivosti poverkhnostno uprochnennykh detaley pri razlichnoy stepeni kontsentratsii

napryazheniy / V.A. Kirpichev, A.P. Filatov, O.V. Karanaeva, A.V. Chirkov, O.Yu. Semenova // Trudy MNTK «Prochnost materialov i elementov konstruktsiy». – Kiev: IPP im. Pisarenko NANU, 2011. – S. 678-685.

11. Peterson R.E. Koeffitsienty kontsentratsii napryazheniy / R.E. Peterson. – М: Mir, 1977. – 304 s.

12. Pavlov V.F. Vliyanie na predel vynoslivosti velichiny i raspredeleniya ostatochnykh napryazheniy v poverkhnostnom sloe detali s kontsentratorom. Soobscheniye I. Sploshnye detali // V.F. Pavlov // Izvestiya vuzov. Mashinostroeniye. – 1988. – №8. – S. 22-26.

13. Pavlov V.F. Vliyanie na predel vynoslivosti velichiny i raspredeleniya ostatochnykh napryazheniy v poverkhnostnom sloe detali s kontsentratorom. Soobscheniye II. Polye detali / V.F. Pavlov // Izvestiya vuzov. Mashinostroeniye. – 1988. – №12. – S. 37-40.

14. Ivanov S.I. Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya i soprotivleniye ustalosti aviatsionnykh rezbovykh detaley / S.I. Ivanov, V.F. Pavlov, G.V. Konovalov, B.V. Minin. – М.: Otraselevaya biblioteka «Tekhnicheskiy progress i povysheniye kvalifikatsii» MAP, 1992. – 192 s.

ВИКОРИСТАННЯ ЗРАЗКІВ-СВІДКІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕЖИ ВИТРИВАЛОСТІ ПОВЕРХНЕВО ЗМІЦНЕНИХ ДЕТАЛЕЙ З КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРУЖЕНЬ

Анотація. На прикладі поверхнево зміцнених суцільних і порожнистих циліндричних зразків з надрізами зі сталі 40Х показано, що використовуючи початкові деформації зразка-свідка, обробленого одночасно з досліджуваною деталлю, представляється можливим прогнозування межі витривалості зміцнених деталей з концентраторами напружень.

Ключові слова: поверхневе зміцнення, зразок-свідок, залишкові напруження, межа витривалості.

REFERENCE SPECIMENS APPLYING FOR THE PREDICTION OF SURFACE HARDENED PARTS WITH STRESS CONCENTRATORS ENDURANCE LIMIT

Annotation. On example of surface hardened solid and hollow cylindrical specimens made of steel 40 with cuts it has been shown that using the initial deformations of reference specimen hardened simultaneously with the tested part makes possible the prediction of hardened parts with stress concentrators endurance limit.

Key words: surface hardening, reference specimen, residual stresses, endurance limit.