

ВЛИЯНИЕ ОБКАТКИ РОЛИКОМ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 40ХН*

В.П. Радченко¹, В.А. Кирпичёв², В.В. Лунин¹

¹Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²Самарский государственный аэрокосмический университет
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

E-mail: radch@samgtu.ru, sopromat@ssau.ru

Изучены остаточные напряжения и сопротивление усталости образцов диаметром 45 мм из стали 40ХН после обкатки роликом. Выявлено, что толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями составляет 1 мм, осевые остаточные напряжения в 1,8 раз выше, чем окружные, а к поверхности наблюдается спад напряжений на 20 %. Испытания на усталость образцов с надрезом радиуса 3 мм после ОППД роликом показали, что предел выносливости повышается и в том случае, когда глубина надреза в три раза превышает толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями, причем количественная зависимость между остаточными напряжениями и пределом выносливости хорошо отражается с помощью критерия среднеинтегральных остаточных напряжений.

Ключевые слова: обкатка роликом, образцы из стали 40ХН, осевые и окружные остаточные напряжения, предел выносливости, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

В исследовании изучалось влияние обкатки роликом на остаточные напряжения и сопротивление усталости цилиндрических образцов из стали 40ХН. Механические характеристики исследованной стали: $\sigma_T = 519$ МПа, $\sigma_s = 843$ МПа, $\delta = 12,7$ %, $\psi = 47,8$ %, $S_k = 1385$ МПа. Образцы диаметром 45 мм подвергались обкатке роликом диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм с усилием 1,0 кН при подаче 0,11 мм/об и скорости вращения образца 400 об/мин.

Остаточные напряжения

Остаточные напряжения после обкатки роликом определялись в образцах диаметром 45 мм длиной 70 мм (рис. 1).

Для определения дополнительных остаточных напряжений за счет расверливания и растачивания на обкатанные роликом пять образцов в продольном и окружном направлениях наклеивалось по 4 тензорезистора в диаметрально противоположных точках. Далее образцы вначале расверливались до диаметра отверстия 20 мм, а за

* Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП СамГТУ (исследования физико-химических свойств веществ и материалов).

Владимир Павлович Радченко (д. ф.-м. н., проф.), заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика»

Виктор Алексеевич Кирпичёв (д.т.н., доцент), декан факультета летательных аппаратов.

Валентин Валентинович Лунин, аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика».

тем растачивались до диаметра отверстия 39,3 мм (рис. 1). Рассверливание и растачивание проводилось при небольших подачах и глубинах резания с тем, чтобы нагрев образцов за счет этих операций не приводил к изменению их остаточного напряженного состояния.

Средние по пяти образцам значения измеренных относительных деформаций за счет рассверливания и растачивания составляли: в осевом направлении – $\varepsilon_{z0} = 2,725 \cdot 10^{-4}$, в окружном направлении – $\varepsilon_{\theta0} = 0,545 \cdot 10^{-4}$. С использованием полученных значений $\varepsilon_{\theta0}$ и ε_{z0} вычислялись дополнительные осевые σ_{z0} и окружные $\sigma_{\theta0}$ дополнительные остаточные напряжения по формулам работы [1]:

$$\sigma_{z0} = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_{z0} + \mu\varepsilon_{\theta0}), \quad \sigma_{\theta0} = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_{\theta0} + \mu\varepsilon_{z0}), \quad (1)$$

где $E = 2 \cdot 10^5$ МПа – модуль продольной упругости, $\mu = 0,3$ – коэффициент поперечной деформации стали 40ХН.

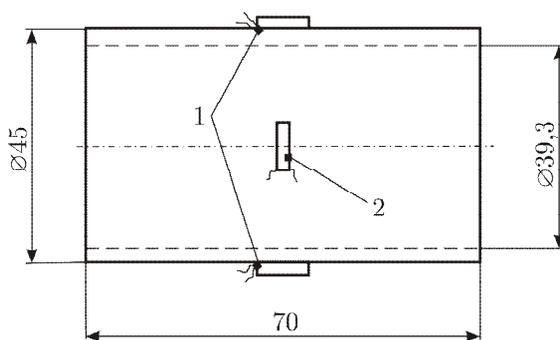


Рис. 1. Образец для определения остаточных напряжений: 1 – тензорезисторы, наклеенные в продольном направлении; 2 – наклеенные в окружном направлении

Дополнительные остаточные напряжения, вычисленные по формуле (1), составили: осевые $\sigma_{z0} = 63,5$ МПа, окружные $\sigma_{\theta0} = 29,9$ МПа.

Из полученных двух втулок по схеме рис. 2, а вырезались полоски шириной 10 мм, из трех втулок по схеме рис. 2, б вырезались кольца шириной 10 мм.

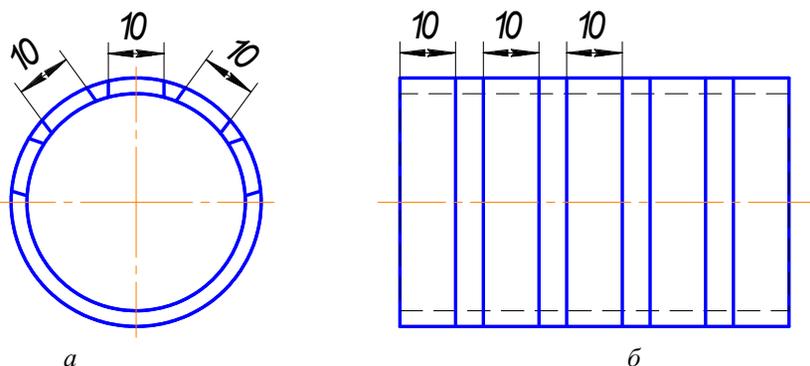


Рис. 2. Схема вырезки из втулок полосок (а) и колец (б)

На вырезанных из втулок полосках по схеме рис. 3, а на базе $l = 30$ мм измерялись прогибы $f(0)$, обусловленные отделением полосок от втулок, которые составили для различных полосок от 0,121 до 0,159 мм. После разрезки колец измерялось изменение $\delta(0)$ их среднего диаметра D по схеме рис. 3, б, которое составило от 0,436 до 0,497 мм.

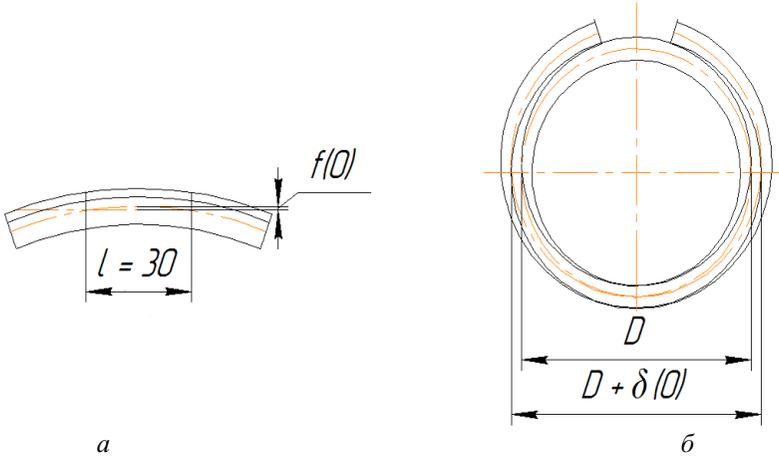


Рис. 3. Схема измерений прогиба $f(0)$ за счет вырезки полоски из втулки (а) и изменение $\delta(0)$ среднего диаметра D за счет разрезки кольца (б)

Далее на полосках на базе $l = 30$ мм и кольцах в пределах половины обкатанной роликом поверхности электрохимическим травлением удалялись поверхностные слои материала на специальной установке [2] и измерялись возникающие при этом перемещения $f(a)$ и $\delta(a)$ по толщине поверхностного слоя a по аналогичным схемам, приведенным на рис. 3. По результатам измерения перемещений полосок и колец $f(0)$, $f(a)$, $\delta(0)$ и $\delta(a)$ вычислялись осевые σ_z^e и окружные σ_θ^e остаточные напряжения втулок по формулам работы [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_{zn}^e(a) &= \sigma_z^e(a) - \mu \sigma_\theta^e(a) = \\ &= \frac{4E}{3l^2} \left[h \cdot f(0) - 4(h-a) \cdot f(a) + (h-a)^2 \cdot \frac{df(a)}{da} + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right], \\ \sigma_{\theta k}^e(a) &= \sigma_\theta^e(a) - \mu \sigma_z^e(a) = \\ &= 2 \frac{E\delta(0)}{D^2} \left(\frac{h}{2} - 2 \right) - \frac{1}{3} \frac{E(h-a)^2}{D} \cdot \frac{d\delta(a)}{da} + \frac{4}{3} \frac{E(h-a)}{D^2} \frac{d\delta(a)}{da} - \frac{2E}{3D^2} \int_0^a \delta(\xi) d\xi, \end{aligned} \quad (2)$$

где $h = 2,85$ мм – толщина полоски и кольца, $D = 42,15$ мм – средний диаметр втулки, ξ – расстояние от наружной поверхности втулки до текущего слоя, в котором вычислялись остаточные напряжения.

На рис. 4 представлены эпюры остаточных напряжений σ_{ocm} по толщине поверхностного слоя a в полосках $\sigma_{zn}^e(a)$ (эпюра 1), кольцах $\sigma_{\theta k}^e(a)$ (эпюра 2), а также в обкатанных роликом втулках с наружным диаметром 45 мм и внутренним диаметром 39,3 мм ($\sigma_z^e(a)$ – эпюра 3, $\sigma_\theta^e(a)$ – эпюра 4). Можно видеть, что глубина зале-

гания сжимающих остаточных напряжений достигает 1 мм, к поверхности втулки наблюдается спад остаточных напряжений, а наибольшие сжимающие остаточные напряжения действуют на расстоянии 0,15 – 0,20 от поверхности. Наибольшие осевые σ_z^e остаточные напряжения втулки примерно в 1,8 раза превышают окружные σ_θ^e остаточные напряжения.

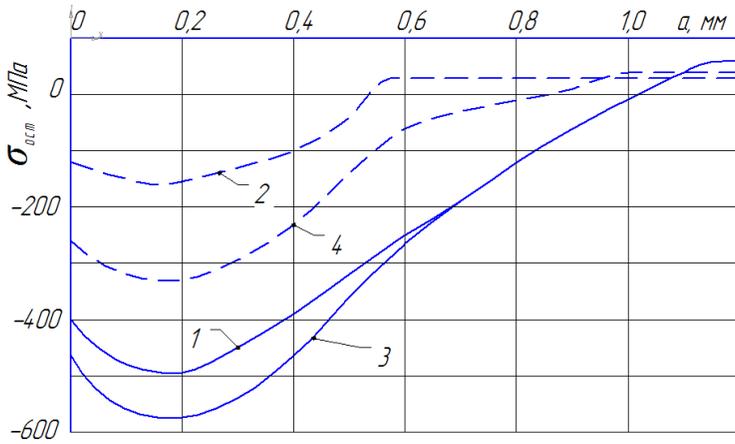


Рис. 4. Остаточные напряжения $\sigma_{осм}$ в полосках (1 – $\sigma_{zn}^e(a)$), кольцах (2 – $\sigma_{\theta k}^e(a)$) и втулках (3 – $\sigma_z^e(a)$, 4 – $\sigma_\theta^e(a)$)

Далее вычислялись осевые σ_z и окружные σ_θ остаточные напряжения в обкатанных роликом сплошных цилиндрах по результатам определения остаточных напряжений и дополнительных остаточных напряжений [1]:

$$\sigma_z(a) = \frac{1}{1-\mu^2} \cdot (\sigma_{zn}^e(a) + \mu\sigma_{\theta k}^e(a)) - \sigma_{z0},$$

$$\sigma_\theta(a) = \frac{1}{1-\mu^2} \cdot (\sigma_{\theta k}^e(a) + \mu\sigma_{zn}^e(a)) - \sigma_{\theta0},$$
(3)

где $\sigma_{zn}^e = \sigma_z^e(a) - \mu\sigma_\theta^e(a)$, $\sigma_{\theta k}^e = \sigma_\theta^e(a) - \mu\sigma_z^e(a)$ определялись по формулам (2) и приведены на рис. 4, а σ_{z0} и $\sigma_{\theta0}$ определялись по формулам (1).

На рис. 5 приведены эпюры остаточных напряжений $\sigma_{осм}$ по толщине поверхностного слоя a в обкатанных роликом сплошных образцах из стали 40ХН диаметром 45 мм. Можно видеть, что наибольшие осевые σ_z остаточные напряжения достигают –650 МПа, а окружные $\sigma_\theta = -360$ МПа. Для сплошных образцов, так же как и для втулок, осевые остаточные напряжения σ_z в 1,8 раза превышают окружные остаточные напряжения σ_θ . К поверхности образцов наблюдается спад как осевых, так и окружных остаточных напряжений.

Следует обратить внимание на то, что наибольшие осевые σ_z остаточные напряжения превышают предел текучести материала ($\sigma_T = 519$ МПа). В работе [4] показано, что в упрочненном поверхностном слое деталей сжимающие остаточные напряжения могут превышать не только предел текучести, но и сопротивление разрыву материала детали S_k на 15 %. В данном исследовании этот предел не достигнут.

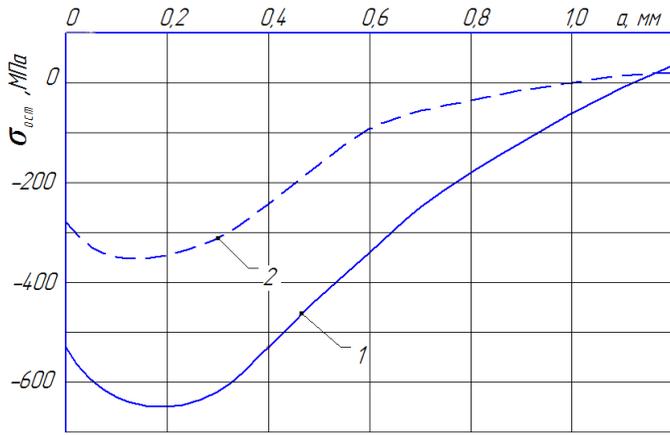


Рис. 5. Остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ в обкатанных роликом сплошных образцах диаметром 45 мм: 1 – $\sigma_z^e(a)$; 2 – $\sigma_\theta^e(a)$

Для установления связи между остаточными напряжениями и пределом выносливости поверхностно упрочненной детали в случае глубокого надреза необходимо знать значение реактивных σ_z^R и σ_θ^R растягивающих остаточных напряжений под упрочненным слоем. В работе [5] расчетом по первоначальным деформациям показано, что реактивные растягивающие остаточные напряжения после поверхностного пластического деформирования распределяются по толщине детали равномерно. На основании этой закономерности из условий равновесия установлено, что в поверхностном слое величина растягивающих осевых остаточных напряжений в настоящем исследовании составляла $\sigma_z^R = 37,2$ МПа, окружных – $\sigma_\theta^R = 17,1$ МПа.

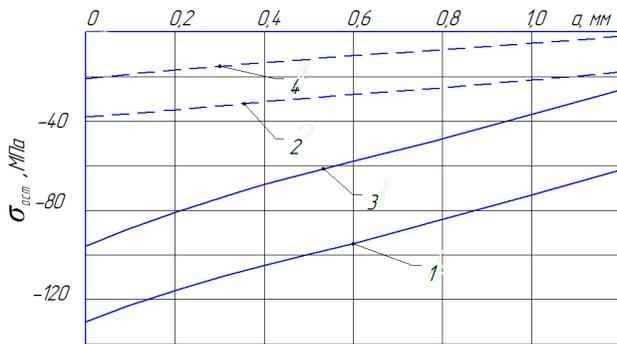


Рис. 6. Остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ в наименьшем сечении упрочненных роликом образцов с диаметром 45 мм с надрезом $R = 3,0$ мм:
1 – $\sigma_z^d(a)$; 2 – $\sigma_\theta^d(a)$; 3 – $\sigma_z(a)$, 4 – $\sigma_\theta(a)$

На неупрочненные и упрочненные роликом гладкие образцы диаметром 45 мм наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 3,0$ мм. В результате нанесения на упрочненную поверхность надреза происходит перераспределение остаточных напряжений образца в области, прилегающей к надрезу. Дополни-

ные остаточные напряжения, возникающие в результате перераспределения остаточных усилий гладкого образца, определялись аналитическим [6] и численным методами – результаты расчетов имели хорошее совпадение. Суммируя дополнительные остаточные напряжения с исходными, получали остаточные напряжения в предварительно упрочненном образце с надрезом. На рис. 6 по толщине поверхностного слоя a представлены дополнительные осевые $\sigma_z^d(a)$ и окружные $\sigma_\theta^d(a)$ остаточные напряжения, а также осевые $\sigma_z(a)$ и окружные $\sigma_\theta(a)$ остаточные напряжения в наименьшем сечении образца с надрезом $R = 3,0$ мм.

Из приведенных на рис. 6 данных видно, что при нанесении на обкатанный ролик гладкий образец надреза, глубина которого почти в три раза превышает толщину упрочненного поверхностного слоя, в наименьшем сечении образца с надрезом действуют осевые σ_z и окружные σ_θ сжимающие остаточные напряжения, достигающие -95 и -21 МПа соответственно. Это явление объясняется концентрацией благоприятных, с точки зрения сопротивления усталости сжимающих остаточных напряжений [5].

Сопротивление усталости

Сопротивление усталости изучалось на неупрочненных и упрочненных роликом образцах из стали 40ХН диаметром 45 мм в рабочей части (рис. 7). Гладкие цилиндрические образцы подвергались обкатке роликом на тех же режимах, что и образцы для определения остаточных напряжений. На упрочненные и неупрочненные образцы фасонным резцом наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 3,0$ мм.

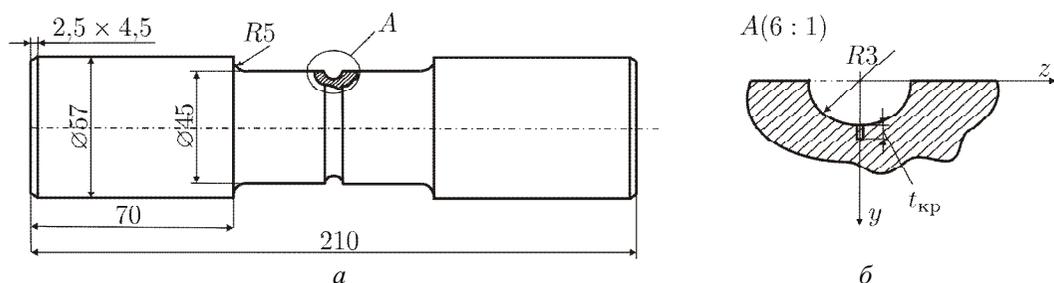


Рис. 7. Образец с надрезом для испытаний на усталость (а) и нераспространяющаяся трещина усталости (б)

Испытания образцов на усталость при поперечном изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине УМП-02 [7] при частоте 17,6 Гц, база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Предел выносливости σ_{-1} неупрочненных образцов оказался равным 127,5 МПа, упрочненных образцов – 147,5 МПа, то есть приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ за счет обкатки роликом составило 20 МПа. Следует обратить внимание на то, что несмотря на большую глубину надреза в сравнении с толщиной упрочненного слоя предел выносливости упрочненных роликом образцов увеличился на 17 %. Этот результат указывает на благоприятное действие сжимающих остаточных напряжений при опережающем поверхностном пластическом деформировании (ОППД).

Выстоявшие базу испытаний упрочненные образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большей нагрузке. В этих образцах были обнаружены серповидные нераспространяющиеся трещины усталости, наибольшая критическая глубина $t_{кр}$, которых оказалась равной в среднем 0,86 мм, что соответствует установленной ранее зависимости $t_{кр}$ от размеров опасного сечения деталей с концентраторами напряжений [2].

Оценка влияния обкатки роликом на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ образцов производилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{осм}$ [2, 8]

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{осм}|, \quad (4)$$

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе;

$$\bar{\sigma}_{осм} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{(1-\xi)^2}} d\xi; \quad (5)$$

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца по толщине поверхностного слоя y (рис. 7, б); $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от дна надреза 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.

Для вычисления критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{осм}$ по формуле (5) использовалось распределение осевых $\sigma_z(a)$ остаточных напряжений в упрочненных роликом образцах с надрезом, приведенное на рис. 6 (эпюра 3). Среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{осм}$ для упрочненных образцов при $t_{кр} = 0,86$ мм составили $-60,4$ МПа. При таком значении $\bar{\sigma}_{осм}$ и приращении предела выносливости образцов $\Delta\sigma_{-1} = -20$ МПа коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости $\bar{\psi}_{\sigma}$, вычисленный по формуле (4), оказался равным 0,331.

Эта величина коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ незначительно отличается от значения $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$, полученного в работе [2] для образцов и деталей с такой же степенью концентрации напряжений. Следует обратить также внимание на то, что оценка влияния упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{осм}$ на предел выносливости образцов с концентраторами при ОППД до настоящего исследования проводилась только до глубины надреза, равной 1 мм [2]. Поэтому проведенное исследование расширяет границы использования критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{осм}$ для прогнозирования предела выносливости образцов и деталей при ОППД до глубины надреза, равной 3 мм. Кроме того, исследование впервые проведено на образцах из стали 40ХН, что расширяет номенклатуру материалов, на которых изучено влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости с использованием критерия $\bar{\sigma}_{осм}$.

Кроме среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{осм}$ для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости используются осевые остаточные напряжения $\sigma_z^{нос}$ на поверхности опасного сечения упрочненной детали с кон-

центратором, которые в настоящем исследовании были равны $-9,4$ МПа. При использовании этого критерия приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ поверхностно упрочненных образцов и деталей с концентраторами определяется по формуле

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_{\sigma} \left| \sigma_z^{нов} \right|, \quad (6)$$

где ψ_{σ} – коэффициент влияния упрочнения на предел выносливости по остаточным напряжениям на поверхности концентратора, который в настоящем исследовании составил значение $0,213$.

Эта величина коэффициента ψ_{σ} существенно отличается от значений ψ_{σ} для других случаев [2], поэтому прогнозирование приращения предела выносливости упрочненных образцов и деталей из стали 40ХН по остаточным напряжениям на поверхности концентратора приведет к существенной погрешности.

Выводы

1. Исследованы закономерности распределения остаточных напряжений во втулках и сплошных цилиндрических образцах диаметром 45 мм из стали 40ХН после обкатки роликом. Установлено, что глубина залегания сжимающих остаточных напряжений после поверхностного упрочнения на исследованных режимах достигает 1 мм; сжимающие остаточные напряжения действуют на глубине $0,15-0,2$ мм, а к поверхности образцов наблюдается их спад на 20% ; осевые остаточные напряжения σ_z в $1,8$ раза превышают окружные остаточные напряжения σ_{θ} .

2. После ОППД на дне надреза глубиной 3 мм, в три раза превышающей толщину упрочненного поверхностного слоя, за счет концентрации остаточных напряжений действуют осевые σ_z и окружные σ_{θ} сжимающие остаточные напряжения, достигающие -95 МПа и -21 МПа соответственно.

3. Повышение предела выносливости образцов с круговым надрезом полукруглого профиля радиусом 3 мм после ОППД объясняется только наличием в поверхностном слое опасного сечения сжимающих остаточных напряжений, обусловленных концентрацией напряжений за счет нанесения надреза, так как упрочненный слой полностью прорезан.

4. Измеренное значение критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр} = 0,86$ мм для образцов диаметром 45 мм из стали 40ХН соответствует установленной ранее зависимости $t_{кр}$ от размеров опасного поперечного сечения упрочненных образцов и деталей с концентраторами напряжений, изготовленных из других материалов.

5. Полученный в исследовании коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,331$ незначительно отличается от значения $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$, полученного в других исследованиях для образцов и деталей из других материалов с аналогичной степенью концентрации напряжений.

6. Проведенное исследование позволяет использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных образцов и деталей с концентраторами напряжений из стали 40ХН.

7. Оценка приращения предела выносливости упрочненных деталей из стали 40ХН по величине остаточных напряжений на поверхности концентратора $\sigma_z^{нов}$ мо-

жет привести к существенной погрешности, поэтому прогнозирование предела выносливости по этому критерию нецелесообразно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
2. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
3. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
4. Радченко В.П., Павлов В.Ф. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей // Прочность материалов и элементов конструкций: Труды международной научно-технической конференции. – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 354-357.
5. Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулюк В.С., Кирпичёв В.А. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 124 с.
6. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып. 3. – С. 88-95.
7. Филатов Э.Я., Павловский В.Э. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 с.
8. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29-32.

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2012 г.

BREAK-IN EFFECT ROLLER RESIDUAL STRESSES AND FATIGUE RESISTANCE OF SPECIMENS OF STEEL 40XH

V.P. Radchenko¹, V.A. Kirpichyov², V.V. Lunin¹

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

²Samara State Aerospace University
34, Moskovskoe hw., Samara, 443086

Residual stress and fatigue specimens with a diameter of 45 mm steel 40 XH after running roller investigated. Revealed the thickness layer with compressive residual stress is 1 mm, the axial residual stress is 1.8 times higher than the county and to the surface of the slow-down stress by 20 %. Fatigue tests of notched specimens radius 3 mm after DFND roller have shown that the fatigue limit is increased in the case when the depth of cut is three times the thickness of a layer of compressive residual stress, and the quantitative relationship between the residual stress and endurance limit is well reflected using the criterion of average integral residual stresses.

Keywords: *running roller, samples of steel 40XH, axial and circumferential residual stress, fatigue limit, the criterion of average integral residual stress.*

Vladimir V. Radchenko (Dr.Sc (Phys.&Math.)), Head of Dept., Dept of Applied Mathematics & Computer Science.

Victor A. Kirpichyov (Dr. Sc. (Techn.)), Dean Faculty of Aircraft Construction.

Valentin V. Lunin, Postgraduate Student, Dept. of Applied Mathematics & Computer Science.