

УДК 621.787:539.319

ВЛИЯНИЕ АЗОТИРОВАНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ОБРАЗЦОВ С НАДРЕЗАМИ ИЗ СТАЛИ 38Х2МЮА

© 2012 В. С. Вакулюк¹, А. В. Чирков¹, А. С. Букатый², А. А. Филиппов¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²Ярославский государственный технический университет

Исследованы остаточные напряжения после азотирования в образцах с надрезом из стали 38Х2МЮА. Установлено, что для прогнозирования приращения предела выносливости при изгибе таких образцов представляется возможным использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

Образцы с надрезом, сталь 38Х2МЮА, азотирование, предел выносливости, остаточные напряжения.

Для изучения влияния азотирования на остаточные напряжения и предел выносливости деталей из стали 38Х2МЮА ($\sigma_{0,2} = 810$ МПа, $\sigma_s = 1000$ МПа, $\delta = 16,2\%$, $\psi = 58,3\%$, $S_k = 1790$ МПа) были проведены эксперименты на гладких образцах диаметром 5 мм и на образцах с глубокими надрезами V-образного профиля (рис. 1) двух радиусов $R = 0,5$ мм и $R = 2,5$ мм. Диаметр образцов с надрезом в наименьшем сечении составлял $d = 5$ мм.

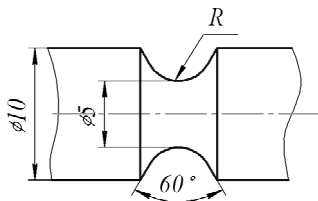


Рис. 1. Образец из стали 38Х2МЮА с надрезом радиуса R

При определении остаточных напряжений в надрезанных образцах с целью повышения точности использовались образцы с пятью идентичными надрезами, отстоящими друг от друга на расстоянии 10 мм. Шаг концентраторов был выбран из условия отсутствия их взаимного влияния в соответствии с принципом Сен-Венана.

Азотирование образцов осуществлялось в печи шахтного типа при температуре 550°C. Насыщение азотом поверхностного слоя проводилось в среде аммиака по всей поверхности образцов. Для получения азотированного слоя различной толщины одна половина образцов подвергалась азотированию в течение 6 часов (А1), другая – 8 часов (А2).

Определение осевых σ_z остаточных напряжений проводилось методом удаления части поверхности на гладких цилиндрических образцах [1] и меридиональных σ_φ (осевых σ_z – в наименьшем сечении) на образцах с надрезами [2]. При определении меридиональных σ_φ остаточных напряжений удалялась половина поверхности в пределах криволинейной части впадины надрезов (рис. 1).

Распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a приведено на рис. 2. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что в азотированных образцах с надрезом $R = 0,5$ мм действуют значительные сжимающие остаточные напряжения, существенно превышающие не только предел текучести ($\sigma_{0,2} = 810$ МПа), но и предел прочности стали 38Х2МЮА ($\sigma_s = 1000$ МПа). Объясняя это явление, следует иметь в виду, что азотированный поверхностный слой материала имеет механические характеристики, превышающие средние механические характеристики всего образца, так как предел текучести упрочнённого поверхностного слоя может достигать величины истинного сопротивления разрыву S_k ($S_k = 1790$ МПа). Кроме того, в работах [3, 4] было показано, что при плоском напряжённом состоянии остаточные напряжения могут быть выше

предела текучести на 15%. Поэтому полученные в эксперименте наибольшие сжимающих остаточных

напряжений после азотирования образцов не превышают допустимых для стали 38Х2МЮА значений.

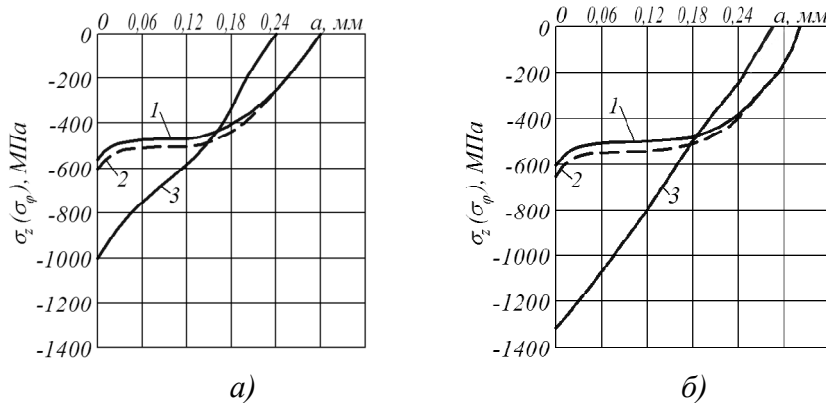


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в гладких образцах (1), образцах с надрезами $R = 2,5$ мм (2) и $R = 0,5$ мм (3) из стали 38Х2МЮА после азотирования:
 а – выдержка 6 часов (А1), б – выдержка 8 часов (А2)

В гладких образцах максимальная величина сжимающих остаточных напряжений на поверхности составляет -600 МПа, а глубина залегания – $a = 0,30$ мм (А1) и $a = 0,34$ мм (А2). На глубине $a = 0,15-0,16$ мм наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений.

В образцах с V-образным надрезом радиуса $R = 2,5$ мм наибольшие сжимающие остаточные напряжения действуют на поверхности надреза, незначительно превышая значения напряжений гладких образцов, что является следствием небольшой концентрации напряжений при $R = 2,5$ мм. Начиная с глубины $a = 0,18$ мм различия в распределении остаточных напряжений гладких образцов и образцов с надрезом радиуса $R = 2,5$ мм практически нет.

В образцах с V-образным надрезом радиуса $R = 0,5$ мм наибольшие сжимающие остаточные напряжения значительно выше, чем в гладких образцах и в образцах с надрезом радиуса $R = 2,5$ мм, достигая величины -990 МПа (А1) и -1310 МПа (А2), что обусловлено значительно большей концентрацией напряжений при $R = 0,5$ мм, чем при $R = 2,5$ мм. Отличается и характер распределения остаточных напряжений – отсутствует подповерхностный максимум и

уменьшилась глубина залегания сжимающих напряжений, которая составила $a = 0,24$ мм (А1) и $a = 0,28$ мм (А2).

Влияние азотирования на предел выносливости σ_{-1} при изгибе в случае симметричного цикла было изучено на образцах с одиночными надрезами радиуса $R = 0,5$ мм и $R = 2,5$ мм. Испытания на усталость при температуре 20°C проводились на машине МУИ-6000, база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Значения пределов выносливости образцов σ_{-1} представлены в табл.1.

Из данных табл.1 видно, что азотирование приводит к существенному повышению сопротивления усталости образцов с надрезом, особенно образцов с $R = 0,5$ мм, у которых предел выносливости увеличился в 3,2 раза.

Оценка влияния азотирования на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ проводилась по двум критериям. Во-первых, по критерию осевых остаточных напряжений $\sigma_z^{ноб}$ на поверхности опасного сечения образцов, использованному в работах [5-10]:

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_\sigma \cdot |\sigma_z^{ноб}|, \quad (1)$$

где ψ_σ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\sigma_z^{ноб}$.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость образцов с надрезом

R , мм	K_σ	Режимы азотирования	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
0,5	2,1	исх. сост.	165	–	–	–	–
		A1	405	-990	0,242	-694	0,346
		A2	529	-1310	0,208	-1043	0,349
2,5	1,2	исх. сост.	495	–	–	–	–
		A1	733	-590	0,403	-523	0,455
		A2	738	-740	0,328	-564	0,431

Во-вторых, оценка влияния азотирования проводилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [11, 12]:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_\sigma \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (2)$$

где $\bar{\psi}_\sigma$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$:

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi; \quad (3)$$

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении образца по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности надреза до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе образца на пределе выносливости.

Для определения $t_{кр}$ образцы, выстоявшие при напряжении, равном пределу выносливости, базу испытаний без поломки, доводились до разрушения при статическом растяжении. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина $t_{кр}$ которых составляла 0,11мм. Необходимо отметить, что эта величина $t_{кр}$ соответствует зависимости $t_{кр} = 0,0216d$ (d – диаметр опасного сечения образца), полученной ранее в работах [12,13] на основании обработки результатов большого количества экспериментов.

Значения осевых остаточных напряжений на поверхности надреза $\sigma_z^{нов}$, результаты расчётов критерия среднеинтегральных остаточных

напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ по формуле (3) и коэффициентов влияния остаточных напряжений на предел выносливости ψ_σ , $\bar{\psi}_\sigma$ по формулам (1) и (2) представлены в табл. 1.

Сравнивая величины коэффициента ψ_σ , учитывающего влияние азотирования по критерию остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхности, можно видеть, что значения этого коэффициента для образцов с надрезом $R = 0,5$ мм и $R = 2,5$ мм различаются почти в два раза, то есть весьма существенно. Такое различие коэффициента ψ_σ не позволяет с достаточной для практики точностью использовать критерий осевых остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ для оценки влияния азотирования на предел выносливости детали.

Анализируя значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$, учитывающего влияние азотирования по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$, можно видеть, что для образцов с надрезом $R = 0,5$ мм этот коэффициент меньше, чем для образцов с надрезом $R = 2,5$ мм. Это различие объясняется большей степенью концентрации напряжений для образцов с меньшим радиусом [14]. В табл. 1 приведены значения эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ для деталей с надрезами из стали 38Х2МЮА, определённые по данным работ [15, 16]. В [14] на основании многочисленных экспериментов была установлена зависимость между коэффициентом влияния $\bar{\psi}_\sigma$ и эффективным коэффициентом концентрации напряжений K_σ в виде

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,514 - 0,065K_\sigma. \quad (4)$$

Значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$, вычисленные по зависимости (4), составили: для азотированных образцов с надрезом $R = 0,5$ мм – 0,372, для азотированных образцов с надрезом $R = 2,5$ мм – 0,436, то есть различие между экспериментальными и расчётными значениями коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ не превышает 9%. Следовательно, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ может быть использован для прогнозирования приращения предела выносливости азотированных цилиндрических деталей с концентраторами напряжений в виде надрезов.

Выводы

1. Оценка влияния азотирования на предел выносливости цилиндрических образцов с глубокими надрезами V-образного профиля по критерию остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхности образцов приводит к существенному различию коэффициента ψ_σ , что затрудняет использование этого критерия на практике.

2. Оценка влияния азотирования на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ с учётом степени концентрации напряжений даёт приемлемые для практики результаты: коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ изменяется в существенно меньших пределах, чем коэффициент ψ_σ . Поэтому критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ представляется возможным использовать для прогнозирования предела выносливости азотированных цилиндрических образцов с надрезами из стали 38Х2МЮА.

Библиографический список

1. Иванов С.И., Григорьева И.В. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 179-183.

2. Павлов В.Ф., Кольцун Ю.И., Кирпичёв В.А. Определение остаточных

напряжений в цилиндрических образцах с V-образным надрезом // Известия вузов. Авиационная техника. – 1986. – №4. – С. 92-95.

3. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

4. Радченко В.П., Павлов В.Ф. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 354-357.

5. Свешников Д.А., Кудрявцев И.В., Гуляева Н.А. Сопротивление усталости цементированных и цианированных сталей применительно к зубчатым колёсам. – М.: ВНИИТМАШ, ОНТИ, 1966. – С. 48-55.

6. Кравченко Б.А., Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 131 с.

7. Серенсен С.В., Борисов С.П., Бородин Н.А. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.

8. Туровский М.Л., Шифрин Н.М. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали // Вестник машиностроения. – 1970. – №11. – С. 37-40.

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

10. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Прохоров А.А. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. – 1988. – №5. – С. 31-33.

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

12. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. –

Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.

13. 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. 22-25.

14. Курпичёв В.А., Филатов А.П., Каранаева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации

напряжений // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 678-685.

15. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.

16. Бордаков С.А., Сургутанова Ю.Н. Формирование остаточных напряжений в поверхностном слое неупрочнённых деталей под действием циклических нагрузок. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2010. – 127 с.

NITRIDING INFLUENCE ON RESIDUAL STRESSES AND ENDURANCE LIMIT OF SPECIMENS WITH NOTCHES MADE OF 38X2MIOA STEEL

© 2012 V. S. Vakuljuk¹, A. V. Chirkov¹, A. S. Bukaty², A. A. Philippov¹

¹Samara State Aerospace University
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

²Yaroslavl State Technical University

The residual stresses after nitriding in specimens with notch made of 38X2MIOA steel are studied. It is established that the average integral residual stresses criterion can be used for the evaluation of endurance limit increment at bending for such specimens.

Specimens with notch, 38X2MIOA steel, nitriding, endurance limit, residual stresses.

Информация об авторах

Вакулюк Владимир Степанович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Чирков Алексей Викторович, кандидат технических наук, ассистент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Букатый Алексей Станиславович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Ярославский государственный технический университет. E-mail: bukaty@inbox.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Филиппов Александр Александрович, аспирант кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Vakuljuk Vladimir Stepanovich, candidate of technical sciences, associate professor of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.

Chirkov Alexey Viktorovich, candidate of technical science, assistant of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.

Bukatyi Alexey Stanislavovich, candidate of technical science, senior lecturer of machining technology department, Yaroslavl State Technical University. E-mail: bukaty@inbox.ru. Area of research: residual stresses mechanics.

Philippov Alexandr Alexandrovich, post-graduate student of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.