

УДК 621.787:539.319

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ОБРАЗЦОВ С V-ОБРАЗНЫМИ НАДРЕЗАМИ ИЗ СТАЛИ ВНС40

© 2012 В. А. Кирпичёв¹, М. Н. Саушкин², В. П. Сазанов¹, О. Ю. Семёнова¹

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

²Самарский государственный технический университет

Изучены остаточные напряжения в цилиндрических образцах с V-образными надрезами из стали ВНС40 после шлифования, точения, азотирования и азотирования с последующей термоэкспозицией при температуре 600°C в течение двух и 590 часов. Исследовано также влияние азотирования на предел выносливости образцов.

Образцы с V-образным надрезом, сталь ВНС40, шлифование, точение, азотирование, остаточные напряжения, предел выносливости.

Исследовались меридиональные σ_φ (осевые σ_z – в наименьшем сечении) остаточные напряжения в цилиндрических образцах с V-образными надрезами (рис. 1) из стали ВНС40 ($\sigma_s = 1070$ МПа, $\sigma_{0,2} = 980$ МПа, $\delta = 18\%$, $\psi = 70\%$, $S_k = 2080$ МПа) после шлифования, точения, упрочнения микрошариками, азотирования и азотирования с последующей термоэкспозицией. Меридиональные σ_φ остаточные напряжения определялись экспериментально методом удаления половины поверхности криволинейной части впадины надреза [1].

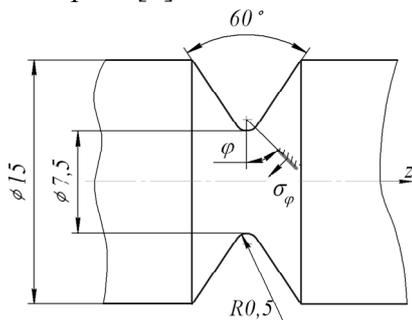


Рис. 1. Рабочая часть образца из стали ВНС40

Для повышения точности определения остаточных напряжений использовались образцы с пятью идентичными надрезами, отстоящими друг от друга на расстоянии 15 мм для исключения взаимного влияния в соответствии с принципом Сен-Венана.

Результаты определения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a представлены на рис. 2, где изображены средние по 6-8 образцам эпюры остаточных напряжений.

Из данных рис. 2 можно видеть, что шлифование (эпюра 1) создаёт в образцах, в основном, растягивающие остаточные напряжения с подповерхностным максимумом на глубине 0,025-0,03 мм, однако в некоторых образцах наблюдались значительные сжимающие остаточные напряжения. Выявлено существенное рассеяние остаточных напряжений, обусловленное, очевидно, нестабильностью режимов шлифования и большой чувствительностью стали ВНС40 к этой нестабильности.

После точения фасонным резцом (эпюра 2) в образцах создаются, в основном, сжимающие остаточные напряжения до -900 МПа (с учётом рассеяния), залегающие в тонком поверхностном слое толщиной до 0,05-0,1 мм. После точения, также как и после шлифования, наблюдается существенная нестабильность остаточных напряжений как по величине, так и по глубине залегания.

Упрочнение шлифованных образцов стальными микрошариками на роторной установке приводит к созданию в тонком поверхностном слое дна впадин надрезов значительных сжимающих остаточных напряжений, достигающих на поверхности -

1400 МПа (рис. 2, а; эпюра 3). Толщина слоя с сжимающими остаточными напряжениями после упрочнения микрошариками составляет 0,12-0,16 мм. Рассеяние остаточных напряжений в этом случае существенно меньше, чем после шлифования и точения.

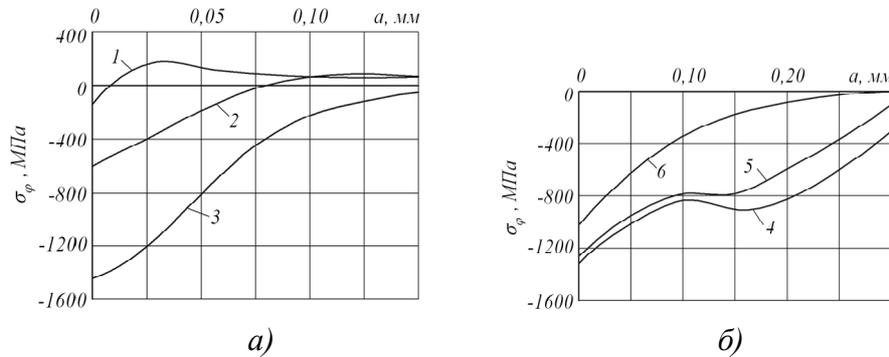


Рис. 2. Меридиональные σ_ϕ остаточные напряжения

в образцах с V-образным надрезом после:

- 1 – шлифования, 2 – точения, 3 – упрочнения микрошариками, 4 – азотирования,
5 – азотирования и термоэкспозиции при $T = 600^\circ\text{C}$ в течение двух часов,
6 – азотирования и термоэкспозиции при $T = 600^\circ\text{C}$ в течение 590 часов

Характерным для азотирования является наличие второго подповерхностного максимума остаточных напряжений на расстоянии 0,15-0,16 мм от поверхности надреза. И в случае азотирования наблюдается рассеяние остаточных напряжений, однако это рассеяние значительно меньше, чем после шлифования и точения.

Величина максимальных сжимающих остаточных напряжений после упрочнения микрошариками превышает не только предел текучести, но и предел прочности материала. В работе [2] показано, что наибольшие остаточные напряжения после поверхностного упрочнения могут превышать сопротивление разрыву S_k материала на 15%. В нашем исследовании этот предел не достигнут.

Азотированные образцы с надрезами подвергались термоэкспозиции при температуре $T = 600^\circ\text{C}$ на двух режимах: в вакууме в течение двух часов и на воздухе в течение 590 часов. Результаты измерения меридиональных σ_ϕ остаточных напряжений представлены на рис. 2,б (эпюры 5 и 6). Можно видеть, что термоэкспозиция в вакууме в течение двух часов незначительно изменила

Азотирование образцов (рис. 2,б; эпюра 4) приводит к возникновению в поверхностном слое впадин надрезов значительных сжимающих остаточных напряжений с максимумом (-1320 МПа) на поверхности дна концентратора.

распределение остаточных напряжений, сгладив лишь их экстремальные значения. Рассеяние остаточных напряжений после вакуумного отжига не уменьшилось.

После термоэкспозиции на воздухе в течение 590 часов произошла существенная релаксация остаточных напряжений, причём изменился характер распределения напряжений. Исчез подповерхностный максимум, в некоторых образцах глубина залегания остаточных напряжений сократилась до 0,08 мм. Рассеяние остаточных напряжений после термоэкспозиции на воздухе при температуре 600°C в течение 590 часов увеличилось по сравнению с напряжениями азотированных образцов, не подвергавшихся термоэкспозиции.

Для оценки влияния азотирования на предел выносливости образцов из стали ВНС40 были проведены испытания на многоцикловую усталость при чистом изгибе с вращением образца в случае симметричного цикла, база испытаний – $2 \cdot 10^7$ циклов нагружения, температура – 20°C . Испытаниям на усталость подвергались шлифованные и азотированные образцы с одиночными V-образными надрезами. Предел выносливости

шлифованных образцов σ_{-1} оказался равным 200 МПа, азотированных - 560 МПа, то есть приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ за счёт азотирования составило 360 МПа.

Два азотированных образца, прошедших базу испытаний $2 \cdot 10^7$ циклов без поломки при напряжениях, близких к пределу выносливости, были доведены до разрушения при статическом растяжении. Оказалось, что в этих образцах имеются концентрические нераспространяющиеся трещины усталости глубиной $t_{кр} = 0,15-0,17$ мм, составляя в среднем $t_{кр} = 0,16$ мм. На рис. 3 представлен фрагмент излома азотированного образца из стали ВНС40 после испытаний на усталость. На изломе чётко просматривается кольцевая нераспространяющаяся трещина усталости 2 глубиной $t_{кр} = 0,16$ мм.

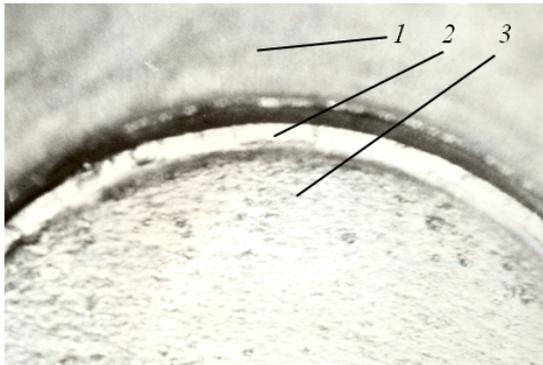


Рис. 3. Фрагмент излома азотированного образца из стали ВНС40 после испытаний на усталость:
1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Следует отметить, что значение $t_{кр} = 0,16$ мм соответствует экспериментально установленной в [3, 4] зависимости $t_{кр} = 0,0216 d$, где d – диаметр опасного сечения образца (детали).

Оценка влияния азотирования на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ образцов производилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [4, 5]:

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

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

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

$\sigma_{\varphi}(\xi)$ – меридиональные (осевые σ_z – в наименьшем сечении) остаточные напряжения в сечении образца с надрезом по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от дна надреза до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочнённом образце (детали) с концентратором напряжений при работе на пределе выносливости.

Для вычисления критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ по формуле (2) использовалось распределение меридиональных σ_{φ} остаточных напряжений азотированных образцов (рис. 2, б; эпюра 4). Среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ для азотированных образцов при $t_{кр} = 0,16$ мм составили -947 МПа. При таком значении $\bar{\sigma}_{ост}$ и приращении предела выносливости образцов $\Delta\sigma_{-1} = 360$ МПа коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости $\bar{\psi}_{\sigma}$, вычисленный по формуле (1), оказался равным 0,38.

Эта величина коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ незначительно отличается от значения $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$, полученного в [3, 4] при испытаниях на усталость в случае изгиба и растяжения-сжатия, для образцов и деталей из сталей, сплавов на основе никеля и алюминия различного диаметра (4,7-50 мм) с такой же концентрацией напряжений. Следовательно, используя критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, представляется возможным прогнозировать приращение предела выносливости азотированных образцов с V-образным надрезом по формуле (1), приняв коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ равным 0,36 – 0,38.

Выводы

1. Установлено, что в образцах из стали ВНС40 после шлифования и точения в поверхностном слое впадин надрезов остаточные напряжения имеют существенное рассеяние и принимают на поверхности концентратора значения от -900 до +250 МПа.

2. Упрочнение образцов с V-образными надрезами из стали ВНС40 стальными микрошариками создаёт в поверхностном слое толщиной 0,12 мм остаточные напряжения сжатия до -1400 МПа с максимумом на поверхности.

3. Азотирование образцов с V-образными надрезами из стали ВНС40 приводит к созданию значительных сжимающих остаточных напряжений, имеющих второй максимум на расстоянии 0,15-0,16 мм от поверхности. Термоэкспозиция азотированных образцов в вакууме при $T = 600^{\circ}\text{C}$ в течение двух часов незначительно изменяет величину и характер распределения остаточных напряжений, а после выдержки на воздухе при $T = 600^{\circ}\text{C}$ в течение 590 часов остаточные напряжения уменьшаются в 1,3-3 раза.

4. Полученные в исследовании данные о распределении остаточных напряжений представляется возможным использовать для прогнозирования сопротивления усталости образцов с концентраторами, что подтверждено испытаниями на усталость азотированных образцов с V-образным надрезом из стали ВНС40.

Библиографический список

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.

RESIDUAL STRESSES AND ENDURANCE STRENGTH IN THE SPECIMENS WITH V-SHAPED NOTCHES MADE OF BHC40 STEEL

© 2012 V. A. Kirpichev¹, M. N. Saushkin², V. P. Sazanov¹, O. Yu. Semyonova¹

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

²Samara State Technical University

Residual stresses in cylindrical specimens made of BHC40 steel with V-shaped notches after grinding, notching, nitriding and nitriding with the subsequent thermoexposition at 600°C during two and 590 hours are studied.

Specimens with V-shaped notch, steel BHC40, grinding, notching, nitriding, residual stresses, endurance limit.

Информация об авторах

Кирпичёв Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Саушкин Михаил Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики, Самарский государственный технический университет. E-mail: msaushkin@gmail.com. Область научных интересов: механика упрочнённых конструкций.

Сазанов Вячеслав Петрович, 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.

Семёнова Ольга Юрьевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры высшей математики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Kirpichyev Victor Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, dean of aircraft faculty, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.

Sazanov Vacheslav Petrovich, 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.

Saushkin Michail Nikolaevich, candidate of Mathematics and Physics sciences, associate professor of applied mathematics and computer science department, Samara State Technical University. E-mail: msaushkin@gmail.com. Area of research: hardened constructions mechanics.

Semyonova Olga Yurievna, candidate of technical sciences, lecturer of Higher Mathematics 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.