

ЗАВИСИМОСТЬ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ ОТ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В исследовании изучалось влияние характера распределения сжимающих остаточных напряжений, наведённых в поверхностном слое различными технологическими методами, на предел выносливости образцов с концентраторами напряжений. Оценка влияния сжимающих остаточных напряжений на приращение предела выносливости образцов при изгибе в случае симметричного цикла $\Delta\sigma_{-1}$ производилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [1] по формуле:

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

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния упрочнения на предел выносливости,

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

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

Цилиндрические образцы с V-образным надрезом при наименьшем диаметре 7,5 мм (рисунок 1) из сталей ВНС40 и 38Х2МЮА подвергались азотированию. Меридиональные σ_{φ} (осевые σ_z – в наименьшем сечении) остаточные напряжения определялись по методике, изложенной в работе [2], и по толщине поверхностного слоя a наименьшего сечения образцов приведены на рисунке 2.

Из приведённых на рисунке 2 данных видно, что после азотирования сжимающие остаточные напряжения в образцах из стали ВНС40 имеют второй подповерхностный максимум на глубине 0,18 мм. Толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями в наименьшем сечении образцов из стали ВНС40 составляет 0,37 мм, из стали 38Х2МЮА – 0,31 мм. Следовательно, распределение сжимающих остаточных

напряжений в опасном сечении образцов из стали ВНС40 после азотирования является более полным, чем образцов из стали 38Х2МЮА.

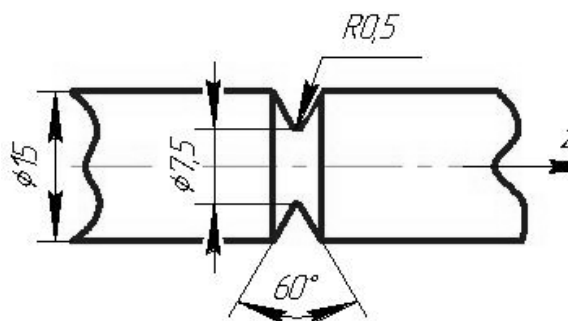


Рисунок 1 – Рабочая часть образцов с V-образным надрезом из сталей ВНС40 и 38Х2МЮА

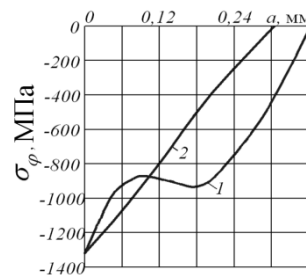


Рисунок 2 – Остаточные напряжения в образцах с надрезами из сталей ВНС40 (1) и 38Х2МЮА (2)

Испытания образцов с V-образным надрезом на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине МУИ-6000, база испытаний – $5 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} приведены в таблице 1. Можно видеть, что при практически одинаковых остаточных напряжениях на поверхности дна надреза приращение предела выносливости за счёт азотирования образцов из стали ВНС40 на 70 МПа выше, чем образцов из стали 38Х2МЮА. Это различие объясняется бóльшей полнотой эпюры остаточных напряжений в образцах из стали ВНС40, чем в образцах из стали 38Х2МЮА.

Таблица 1 – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений образцов с V-образными надрезами

| Материал | Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа | Упрочнённые образцы | | |
|----------|---|---------------------|----------------------------|-----------------------|
| | | σ_{-1} , МПа | $\bar{\sigma}_{ост}$, МПа | $\bar{\psi}_{\sigma}$ |
| ВНС40 | 200 | 560 | -947 | 0,380 |
| 38Х2МЮА | 165 | 455 | -816 | 0,356 |

Из данных таблицы 1 видно, что среднее значение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ составляет 0,368 и незначительно отличается от $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$, установленного в работе [2] для образцов и деталей из других материалов с аналогичной концентрацией напряжений.

Корсетные образцы круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм (рисунок 3) из сплава ВКС-5 подвергались цементации и ионной цементации с характерными для практики режимами. Меридиональные σ_{φ} (осевые σ_z – в наименьшем сечении) остаточные напряжения определялись методом удаления половины поверхности

образца в пределах его корсетной части по методике, описанной в работе [3]. Распределение меридиональных σ_φ остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a корсетных образцов приведено на рисунке 4.

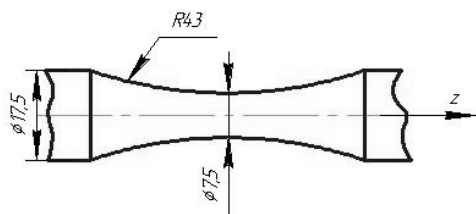


Рисунок 3 – Рабочая часть корсетных образцов из сплава ВКС-5

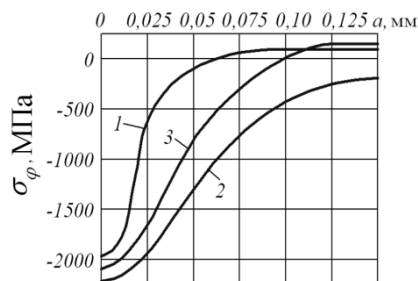


Рисунок 4 – Остаточные напряжения в корсетных образцах из сплава ВКС-5:
1 – исходное состояние, 2 – цементация, 3 – ионная цементация

Из приведённых на рисунке 4 эпюр следует, что толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями после цементации составляет 0,23 мм, а после ионной цементации – 0,10 мм. При примерно одинаковых остаточных напряжениях на поверхности (-2200 МПа и -2100 МПа) распределение остаточных напряжений после цементации по толщине поверхностного слоя является более полным, чем после ионной цементации.

Испытания корсетных образцов на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине МВП-10000, база испытаний – $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты испытаний по определению предела выносливости σ_{-1} приведены в таблице 2. И в этом случае при практически одинаковых остаточных напряжениях на поверхности приращение предела выносливости образцов после цементации на 140 МПа выше, чем после ионной цементации за счёт бóльшей полноты эпюры и бóльшей толщины слоя со сжимающими остаточными напряжениями.

Таблица 2 – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений корсетных образцов из сплава ВКС-5

| Вариант | Обработка | σ_{-1} , МПа | $\bar{\sigma}_{ост}$, МПа | $\bar{\psi}_\sigma$ |
|---------|--------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| 1 | исходное состояние | 760 | -136 | – |
| 2 | цементация | 1040 | -672 | 0,522 |
| 3 | ионная цементация | 900 | -389 | 0,533 |

В работе [4] на основании большого количества экспериментов была установлена зависимость коэффициента влияния упрочнения $\bar{\psi}_\sigma$ на предел выносливости при изгибе от теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ в виде:

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

Для используемых в исследовании корсетных образцов с геометрическими параметрами, указанными на рисунке 3, коэффициент $\alpha_\sigma = 1,06$. Среднее значение коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ (таблица 2) составляет значение 0,538, которое незначительно отличается от значения $\bar{\psi}_\sigma = 0,53$, вычисленного по формуле (3) при указанной степени концентрации напряжений.

Таким образом, предел выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) определяется не величиной сжимающих остаточных напряжений на поверхности, а полнотой эпюры остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
2. Павлов, В. Ф. Прогнозирование сопротивления усталости упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
3. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и предел выносливости корсетных образцов после различных видов термической и химико-термической обработки [Текст] / В.Ф. Павлов, В.С. Вакулук, В.А. Кирпичёв, В.И. Лапин // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2010. – № 7(28). – С. 101-106.
4. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений [Текст] / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т.15, №4 (44). – С. 81-85.