

Кирпичёв В.А., Иванова А.В., Филатов А.П., Шестакова Д.А.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1953Т1

Для повышения эксплуатационных характеристик резьбовых конструкций, изготовленных из высокопрочных алюминиевых сплавов, представляет интерес технологическая операция опережающего поверхностного пластического деформирования (ОПД) с последующим изготовлением резьбы в пределах толщины упрочнённого слоя. В работах [1, 2] отмечено существенное увеличение сопротивления усталости после опережающего поверхностного пластического деформирования поверхностного слоя, что объясняется созданием благоприятных сжимающих остаточных напряжений в концентраторах за счёт перераспределения остаточных усилий гладкой упрочнённой заготовки.

В настоящем исследовании при упрочнении ОПД трубных заготовок из алюминиевого сплава 1953Т1 ($\sigma_T=470$ МПа, $\sigma_n=520$ МПа, $\delta=6.5\%$, $\psi=12.5\%$, $S_x=610$ МПа) в качестве основного контролирующего параметра настроек технологического процесса была использована толщина стенки, то есть режимы обкатывания (варианты) определялись конечной толщиной стенки трубной заготовки с наружным диаметром 70 мм и внутренним 50 мм. Такой подход к выполнению операции упрочнения опережающим поверхностным пластическим деформированием оправдан стабильностью технологического процесса формирования толщины упрочнённого поверхностного слоя, в пределах которого в дальнейшем наносится резьба.

Были выбраны следующие варианты режимов обкатывания трубных заготовок: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 – режимы, при которых стенка трубной заготовки после обкатки роликами уменьшалась на 0,5 мм; 1,0 мм; 1,5 мм; 2,0 мм, соответственно. Для определения остаточных напряжений, наведённых в поверхностном слое различными режимами упрочнения, гладкие трубные заготовки разрезались на кольца и полоски, которые использовались затем для определения остаточных напряжений известным методом колец и полосок.

Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких заготовок приведено на рисунке 1. Исследования показали, что заготовки из высокопрочного алюминиевого сплава 1953Т1 из-за ограниченного запаса

пластичности материала после обкатки роликами на режиме 2.0 имели на поверхности видимые дефекты в виде микротрещин, сквозных трещин и отслоений. Поэтому заготовки, прошедшие упрочнение на режиме 2.0, из дальнейших исследований были исключены.

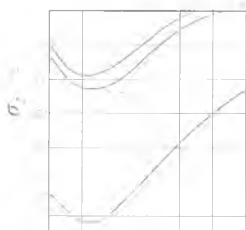


Рисунок 1 – Осевые σ_x остаточные напряжения в трубных заготовках после различных режимов упрочнения: 1 – режим 0.5; 2 – режим 1.0; 3 – режим 1.5

Наибольшие сжимающие остаточные напряжения величиной -625 МПа наблюдались в заготовках, упрочнённых по режиму 1.5. Кроме этого, глубина залегания сжимающих напряжений в этом случае упрочнения также наибольшая, составляющая 2.1 мм. Следует обратить внимание на то, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в трубных заготовках превышает не только предел текучести, но и предел прочности материала 1953Т1. Наблюдаемому явлению дано объяснение в работе [3], в которой показано, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в упрочнённом поверхностном слое деталей может превышать даже сопротивление разрыву S_K материала на 15%. Этот предел в исследуемом случае не превышен.

Остаточные напряжения в упрочнённых ОППД резьбовых образцах определялись численным методом с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [4].

После нарезания резьбы образцы подвергались испытаниям на усталость с целью определения предела выносливости σ_{-1} при изгибе в случае симметричного цикла; база испытаний – $5 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты испытаний на усталость приведены в таблице 1. Резьбовые образцы, прошедшие базу испытаний без разрушения при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при напряжении, большем предела выносливости. Во всех образцах со сжимающими остаточными напряжениями были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, значения $t_{кр}$ которых приведены в таблице 1. Необходимо отметить, что измеренные в данном исследовании величины критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины

усталости соответствуют установленной в работах [1] для деталей с отверстием зависимости

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

где D – диаметр опасного сечения детали, d – диаметр отверстия.

Таблица 1

Режим упрочнения	σ_{-1} , МПа	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
без упрочнения	98	–	–	–
0.5	105	1,14	-63	0.103
1,0	110	1,18	-107	0.112
1,5	135	1,17	-336	0.110
2.0	85	–	–	–

Оценка влияния ОППД на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ резьбовых образцов проводилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [1]

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

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$:

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

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали с концентратором по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости (таблица 1).

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента влияния поверхностного упрочнения $\bar{\psi}_{\sigma}$, вычисленные по формулам (2) и (3), приведены в таблице 1. Величина коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ сравнивалась со значением этого коэффициента, определённым по зависимости работы [5], полученной на основании обработки большого количества экспериментальных данных

$$\bar{\psi}_{\sigma} = 0,612 - 0,081\alpha_{\sigma}, \quad (4)$$

где α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Методом конечно-элементного моделирования с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [6] было установлено, что для изгиба исследуемого резьбового соединения коэффициент $\alpha_\sigma = 6.45$. При таком значении α_σ коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, вычисленный по зависимости (4), составляет 0.096. Из данных таблицы 1 следует, что полученная расчётным методом величина коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ отличается от экспериментально определённой не более, чем на 14%.

Выводы

1. На основании проведённых исследований на усталость установлено, что наиболее оптимальным вариантом упрочнения роликами при опережающем поверхностном пластическом деформировании резьбовых образцов из высокопрочного алюминиевого сплава 1953 Г1 является режим 1.5.

2. Результаты испытаний на усталость резьбовых образцов соответствуют характеру распределения остаточных напряжений в упрочнённых гладких заготовках, причём при режиме 1.5 наблюдается наиболее полное распределение сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя.

3. Оценка влияния поверхностного упрочнения резьбовых образцов на многоцикловую усталость по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{in}$ показала, что прогнозируемое приращение предела выносливости при изгибе отличается от экспериментального не более, чем на 14%.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

2. Радченко, В.П. Влияние радиуса надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании на предел выносливости деталей [Текст] / В.П. Радченко, В.А. Кирпичёв, В.Ф. Павлов, А.В. Чирков // Вестник СГАУ. – 2011. – №3(27). Ч. 4. – С. 44-49.

3. Радченко, В.П. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей [Текст] / В.П. Радченко, В.Ф. Павлов // Труды МІІТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ІІНІ ім. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. – С. 354-357.

4. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом

деформировании [Текст] / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С., Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – №3(27). Ч. 3. – С. 171-174.

5. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений [Текст] / В.А. Кирпичёв, А.С. Букастый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т.15, №4(44). – С. 81-85.

6. Сазанов, В.П. Исследование распределения компонентов остаточного напряжённого состояния в области наименьшего сечения поверхностно упрочнённой детали с кольцевым надрезом [Текст] / В.П. Сазанов // Вестник СГАУ. – 2012. – №3(34). – С. 162-165.