

Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Чирков А.В., Каранаева О.В.

ЗАВИСИМОСТЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА ЭИ698

Исследовались остаточные напряжения в плоских образцах прямоугольного поперечного сечения с размерами 100x12x3 мм (рисунок 1) из сплава ЭИ698, обработанных на ультразвуковой установке при различной массе шариков и времени упрочнения. На каждом режиме ультразвукового упрочнения (УЗУ) обрабатывалось по два образца. Остаточные напряжения определялись механическим методом [1] при последовательном удалении поверхностных слоёв образцов электрохимическим травлением и измерением возникающих при этом перемещений.

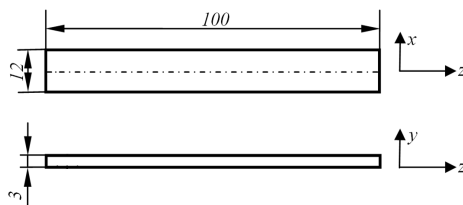


Рисунок 1 – Образец для исследования остаточных напряжений

В таблице 1 представлены шесть режимов ультразвукового упрочнения (m – масса шариков, τ – время упрочнения) и прогибы образцов до f_1 и после f_2 упрочнения, измеренные посредине образцов.

Таблица 1 – Режимы ультразвукового упрочнения и прогибы образцов

№ режима	№ образца	m , грамм	τ , сек	f_1 , мм	f_2 , мм
1	1	150	120	0	0,04
	2	150	120	0	0,01
2	3	150	150	0	0,06
	4	150	150	0	0,05
3	5	150	180	-0,01	0,07
	6	150	180	0	0,05
4	7	200	120	-0,02	0,03
	8	200	120	-0,03	0,05
5	9	200	150	-0,01	0,03
	10	200	150	-0,04	0,06
6	11	200	180	0	0,05
	12	200	180	0	0,05

На рисунке 2 приведены осреднённые эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a упрочнённого поверхностного слоя. Эпюры остаточных напряжений в образцах, упрочнённых на одном режиме, определялись как среднее по двум исследованным образцам. Наблюдался разброс в распределении остаточных напряжений в пределах одного и того же режима упрочнения, который можно объяснить

наследственностью и нестабильностью процесса упрочнения, о чём свидетельствуют прогибы образцов, измеренные до f_1 и после f_2 упрочнения (таблица 1). Различие в уровне напряжений и глубине их залегания можно объяснить интенсивностью режимов упрочнения, а также исходными остаточными напряжениями, наведёнными предшествующими технологическими обработками (закалка, отжиг, шлифование).

С повышением интенсивности режимов упрочнения (увеличение массы шариков m и времени упрочнения τ) до определённой величины, максимальные сжимающие остаточные напряжения возрастают, возрастает и глубина их залегания. При дальнейшем повышении интенсивности режимов упрочнения эти напряжения уменьшаются, а глубина смены знака остаточных напряжений увеличивается, что объясняется более интенсивным наклёпом поверхностного слоя образцов. Значения и характер распределения осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя согласуются с ранее полученными данными при обработке УЗУ образцов из сплавов ЭИ698ВД и ЖС6У [2, 3].

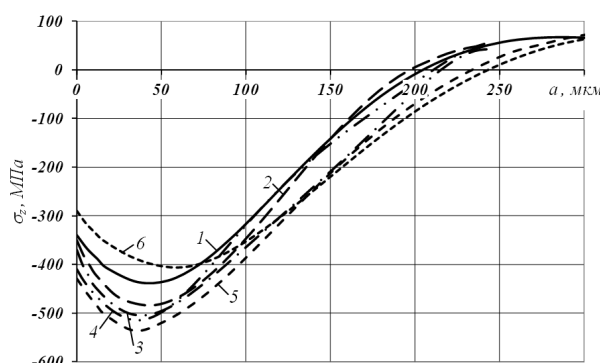


Рисунок 2 – Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений при упрочнении на всех режимах; номера эпюр соответствуют режимам упрочнения, приведённым в таблице 1

Анализ полученного распределения остаточных напряжений был проведён по следующим параметрам: $\sigma_z^{нов}$ – напряжения на поверхности образца, $\sigma_z^{макс}$ – максимальные напряжения, $a^{макс}$ – глубина залегания максимальных напряжений, a^{OH} – глубина смены знака остаточных напряжений. Эти параметры по всем исследованным образцам сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения остаточных напряжений

№ режима	$\sigma_z^{нов}$, МПа	$\sigma_z^{макс}$, МПа	$a^{макс}$, мм	a^{OH} , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа
1	-340	-440	0,045	0,155	-408
2	-350	-480	0,045	0,190	-478
3	-370	-500	0,040	0,230	-483
4	-410	-510	0,040	0,220	-488
5	-430	-540	0,040	0,235	-527
6	-290	-405	0,060	0,245	-378

Для оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений используется критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [2-4] в виде

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

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

Экспериментально установлено [2, 3], что значение $t_{кр}$ зависит только от размеров опасного сечения детали. В исследованном случае при толщине образца 3 мм значение $t_{кр}$ должно составлять 0,065 мм (65 мкм). В таблице 2 представлены значения среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, вычисленные по формуле (1) по толщине 0,065 мм поверхностного слоя упрочнённых УЗУ образцов.

Из приведённых в таблице 2 данных видно, что наибольшие значения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ наблюдаются при упрочнении образцов по режимам №3 – №5. Поэтому с точки зрения сопротивления многоциклового усталости, при толщине упрочняемой детали 3 мм наиболее рациональными будут эти режимы. Строго говоря, этот вывод справедлив для деталей с концентраторами напряжений. Для гладких деталей этот вывод является условным, так как на предел выносливости гладких деталей (образцов) опосредованно оказывает влияние и наклёп поверхностного слоя (увеличение твёрдости, предела текучести) через ту часть остаточных напряжений, которая остаётся в детали после воздействия переменных напряжений [5].

Таким образом, на основании полученных результатов исследования остаточных напряжений в образцах и проведённого анализа по указанным в табл. 2 параметрам можно сделать вывод о том, что наиболее оптимальными, по сопротивлению многоциклового усталости, будут режимы №3 – №5.

Библиографический список

1. Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст] / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
2. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.Б. Иванов. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
3. 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.
4. 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.
5. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.