

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА ЭИ698 ПО КРИТЕРИЮ СРЕДНЕИНТЕГРАЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

© 2012 В. Ф. Павлов, А. П. Филатов, В. К. Шадрин, А. В. Чирков

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

Исследованы остаточные напряжения в плоских образцах из сплава ЭИ698 после ультразвукового упрочнения на различных режимах. На основании критерия среднеинтегральных остаточных напряжений определены оптимальные по сопротивлению многоциклового усталости режимы ультразвукового упрочнения.

*Плоские образцы, сплав ЭИ698, режимы ультразвукового упрочнения, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.*

Исследовались остаточные напряжения в плоских образцах прямоугольного поперечного сечения с размерами 100×12×3 мм (рис. 1) из сплава ЭИ698, обработанных на ультразвуковой установке при различной массе шариков  $m$  и времени упрочнения  $\tau$ . Остаточные напряжения определялись механическим методом [1] при последовательном удалении поверхностных слоёв образцов электрохимическим травлением и измерением возникающих при этом перемещений.

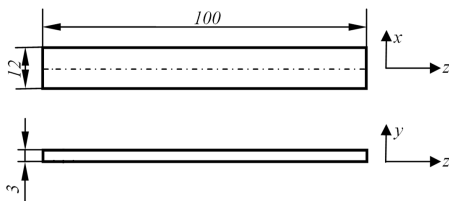


Рис. 1. Образец для исследования остаточных напряжений

Схема замера перемещений образца в процессе электрохимического травления показана на рис. 2. При вычислении остаточных напряжений используются прогибы  $f(a)$ , измеряемые по середине зоны травления. Приведение замеренных перемещений образца  $f(a)_{изм}$  к основному расчётному случаю (рис. 3) производилось по формуле:

$$f(a) = \frac{f(a)_{изм}}{4 \left[ 1 + \frac{2(L-l)}{l} \right]} = \frac{f(a)_{изм}}{K}, \quad (1)$$

где  $f(a)_{изм}$  – перемещение образца, измеренное по схеме, приведённой на рис. 2;  $L$  – расстояние от начала зоны травления образца до сечения, в котором измеряются перемещения;  $l$  – длина участка образца, на ко-

тором производится удаление слоёв материала.

В исследованных образцах  $L = 90$  мм,  $l = 60$  мм. Тогда  $K = 8$ , то есть разрешающая способность метода с указанными размерами образцов увеличивается в 8 раз, что особенно важно при определении остаточных напряжений в тонком поверхностном слое.

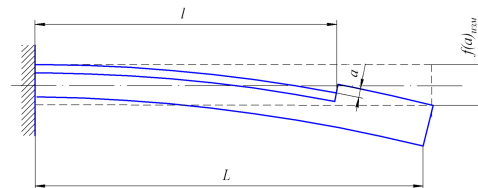


Рис. 2. Схема измерения перемещений полоски  $f(a)_{изм}$  в процессе электрохимического травления

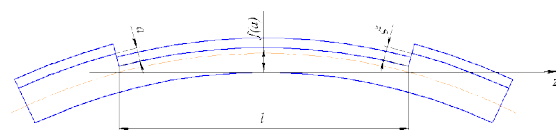


Рис. 3. Схема замера перемещений  $f(a)$  для расчётного случая

Следует отметить, что величина перемещений образца напрямую зависит от его жёсткости, которая в процессе удаления слоёв материала изменяется.

Влияние этого фактора учитывается в расчётной формуле для вычисления остаточных напряжений.

Измерение конечной толщины удалённого слоя  $a_k$  полосок проводили с помощью микрометра. Она определялась по разности замеров толщины образца до и после травления в 10 ÷ 15 точках, а для расчётов исполь-

зовалось среднее значение. В дальнейшем при вычислениях остаточных напряжений считалось, что скорость удаления слоёв материала по времени остаётся постоянной. Это подтверждается ранее проведёнными экспериментами на сталях 45, ЭИ961 и сплавах ЭИ437Б, ЭИ698ВД, ЖС6У [2, 3]. Поэтому скорость удаления слоёв материала  $V$  определялась по формуле

$$V = (h - h_k) / t_k,$$

где  $h$  – исходная толщина образца до травления;  $h_k$  – толщина образца после травления;  $t_k$  – полное время травления.

В проведённых экспериментах скорость удаления слоёв материала составляла 4÷5 мкм/мин.

Остаточные напряжения  $\sigma_z(a)$  и  $\sigma_x(a)$  связаны зависимостью [1]

$$\sigma_z(a) - \mu \sigma_x(a) = \frac{4E}{3l^2} \times \left[ \frac{df(a)}{da} (h-a)^2 - 4f(a)(h-a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right], \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент поперечной деформации;  $E$  – модуль продольной упругости;  $l$  – длина участка образца, на котором удалялись слои материала;  $h$  – исходная толщина образца;  $a$  – толщина удалённого слоя;  $f(a)$  – прогиб образца после удаления слоя толщиной  $a$ ,  $0 \leq \xi \leq a$ .

При ультразвуковом упрочнении, также как и при гидро- и пневмодробеструйной обработке, обработке микрошариками [2, 3], компоненты остаточного напряжённого состояния  $\sigma_z$  и  $\sigma_x$  одинаковы. Поэтому

$$\sigma_z(a) = \sigma_x(a) = \frac{4E}{3(1-\mu)^2} \times \left[ \frac{df(a)}{da} (h-a)^2 - 4f(a)(h-a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right]. \quad (3)$$

Основой расчётов остаточных напряжений по формуле (3) являлась деформационная кривая. Для её построения экспериментальные прогибы  $f(a)$  аппроксимировались полиномом шестой степени

$$f(a) = a_1 x^6 + a_2 x^5 + a_3 x^4 + a_4 x^3 + a_5 x^2 + a_6 x + a_7$$

с точностью до 1 %.

По результатам расчётов строилась за-

висимость  $\sigma_z = \sigma_z(a)$ , которая определяет изменение осевых остаточных напряжений по толщине удалённого поверхностного слоя  $a$ . Эта зависимость представлена в виде графика в координатных осях  $\sigma_z$  [МПа],  $a$  [мкм].

В табл. 1 представлены шесть режимов ультразвукового упрочнения ( $m$  – масса шариков,  $\tau$  – время упрочнения) и прогибы образцов до  $f_1$  и после  $f_2$  упрочнения, а на рис. 4 - 9 – эпюры остаточных напряжений, определённые в каждом из двенадцати исследованных образцов. На рис. 10 приведены осреднённые эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя.

Эпюры остаточных напряжений в образцах, упрочнённых на одном режиме, определялись как среднее по двум исследованным образцам.

Разброс в распределении остаточных напряжений в пределах одного и того же режима упрочнения можно объяснить наследственностью и нестабильностью процесса упрочнения, о чём свидетельствуют прогибы образцов, измеренные до  $f_1$  и после  $f_2$  упрочнения (табл. 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  $\tau$ ) 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  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя согласуются с ранее полученными данными при обработке УЗУ образцов из сплавов ЭИ698ВД и ЖС6У [2, 3].

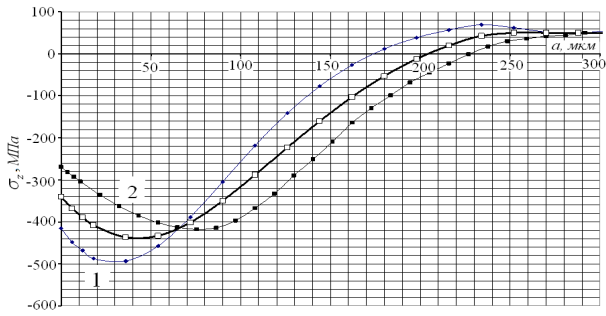


Рис. 4. Эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений при упрочнении на режиме №1;  
 —□— средняя эпюра остаточных напряжений

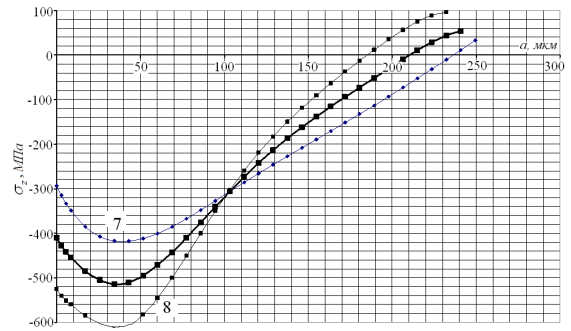


Рис. 7. Эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений при упрочнении на режиме №4;  
 —■— средняя эпюра остаточных напряжений

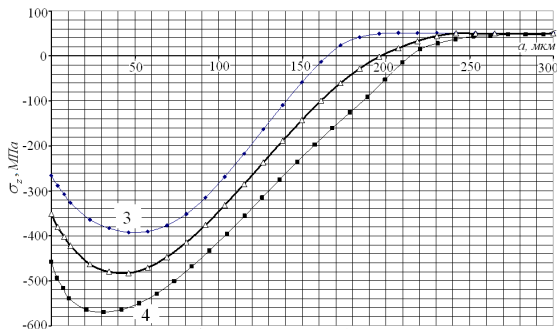


Рис. 5. Эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений при упрочнении на режиме №2;  
 —▲— средняя эпюра остаточных напряжений

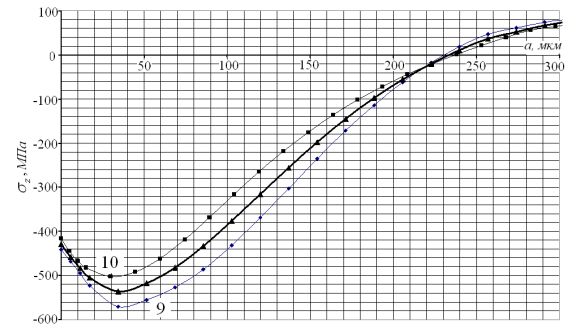


Рис. 8. Эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений при упрочнении на режиме №5;  
 —▲— средняя эпюра остаточных напряжений

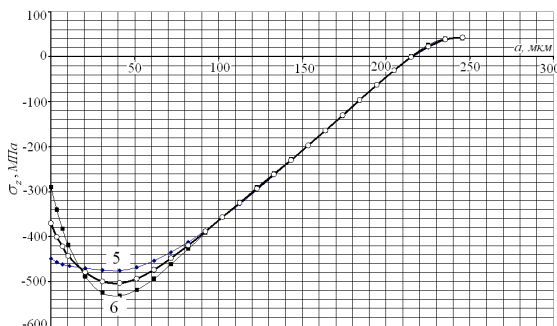


Рис. 6. Эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений при упрочнении на режиме №3;  
 —○— средняя эпюра остаточных напряжений

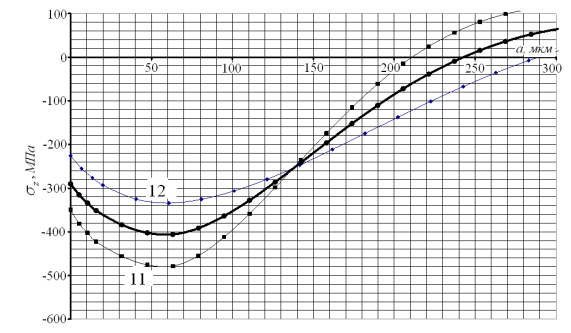


Рис. 9. Эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений при упрочнении на режиме №6;  
 —●— средняя эпюра остаточных напряжений

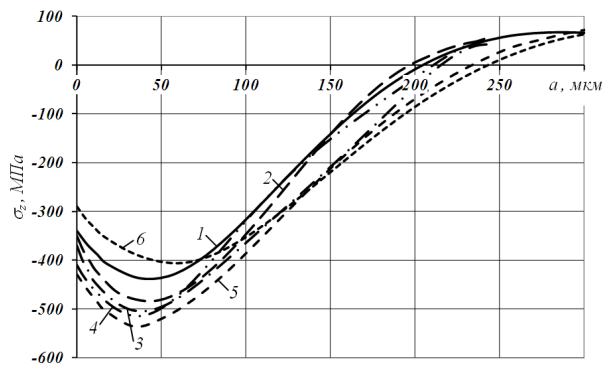


Рис. 10. Эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений при упрочнении на всех режимах; номера эпюр соответствуют режимам упрочнения, приведённым в табл. 1

Таблица 1. Режимы ультразвукового упрочнения и прогибы образцов

№ режима	№ образца	$m$ , г	$\tau$ , с	$f_1$ , 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

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 табл. 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 использовался критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  в виде [2 – 4]

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (4)$$

где  $\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали;  $\xi = a/t_{кр}$  – расстояние от поверхности 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 табл. 2 представлены значения среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ , вычисленные по формуле (4) по толщине 0,065 мм поверхностного слоя упрочнённых УЗУ образцов.

Из приведённых в табл. 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 эти режимы будут наиболее рациональными. Строго говоря, этот вывод справедлив для деталей с концентраторами напряжений. Для гладких деталей этот вывод условен, 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 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: Изд-во 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: Изд-во 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 // Изв. 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.

## ULTRASONIC HARDENING OF SPECIMENS MADE OF ЭИ698 ALLOY OPTIMAL REGIMES CHOICE USING AVERAGE INTEGRAL RESIDUAL STRESSES CRITERION

© 2012 V. F. Pavlov, A. P. Filatov, V. K. Shadrin, A. V. Chirkov

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

Residual stresses in flat specimens made of ЭИ698 alloy after ultrasonic hardening under different regimes have been studied. Optimal regimes of ultrasonic hardening have been determined on ground of average integral residual stresses criterion.

*Flat specimens, ЭИ698 alloy, ultrasonic hardening regimes, average integral residual stresses criterion.*

### Информация об авторах

**Павлов Валентин Федорович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Филатов Анатолий 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](mailto:sopromat@ssau.ru). Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Шадрин Валентин Карпович**, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto: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](mailto:sopromat@ssau.ru). Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Pavlov Valentin Fedorovich**, doctor of technical sciences, professor, Head of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of research: residual stresses mechanics.

**Filatov Anatoliy Petrovich**, candidate of technical sciences, associate professor strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of research: residual stresses mechanics.

**Shadrin Valentin Karpovich**, candidate of technical sciences, associate professor strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto: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](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of research: residual stresses mechanics.