

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЭКСПОЗИЦИИ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА ЭП742 ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ

В.П. Радченко¹, В.А. Кирпичёв², В.В. Лунин¹

¹Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34

E-mail: radch@samgtu.ru, sopromat@ssau.ru

Расчетно-экспериментальным методом исследованы остаточные напряжения в плоских образцах из сплава ЭП742 после шлифования, ультразвукового упрочнения и термоэкспозиции (температурной выдержки без нагрузки при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$). Выявлены закономерности распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя образцов. Показано, что термоэкспозиция в $1,4 \div 1,6$ раз уменьшает уровень сжимающих остаточных напряжений и вызывает смещение их максимума вглубь образца. Исследовано влияние полей остаточных напряжений и термоэкспозиции на приращение предела выносливости.

Ключевые слова: плоский образец, сплав ЭП742, шлифование, ультразвуковое упрочнение, термоэкспозиция, остаточные напряжения.

Постановка задачи. Практика поверхностного упрочнения деталей является одним из резервов повышения ресурса деталей машин. Одной из проблем является оценка устойчивости наведенных остаточных напряжений к высокотемпературным нагрузкам. Решение этой проблемы связано с развитием теоретических методов расчета релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести [1, 2] и требует

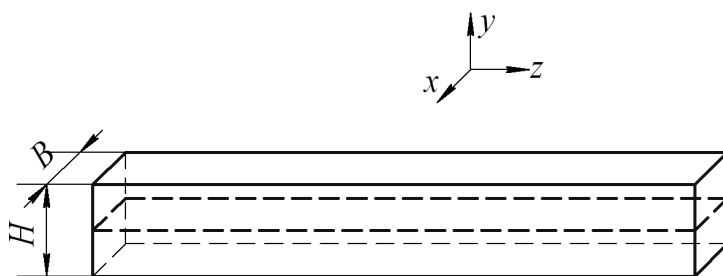


Рис. 1. Образец для определения остаточных напряжений

Владимир Павлович Радченко (д.ф.-м.н., проф.), заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика».

Виктор Алексеевич Кирпичёв (д.т.н., доцент), декан факультета летательных аппаратов.

Валентин Валентинович Лунин, аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика».

масштабных экспериментальных исследований [3, 4]. Особенности кинетики остаточных напряжений при термоэкспозиции (температурной выдержке без нагрузки) связаны с геометрией упрочненных образцов и технологией упрочнения [1 – 4], деформационной анизотропией в упрочненном слое [5] и многими другими параметрами. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния термоэкспозиции на остаточные напряжения образцов (брусков) $B \times H = 10 \times 10$ мм из сплава ЭП742 (рис. 1) после двухстороннего $\left(y = \pm \frac{H}{2}\right)$ ультразвукового упрочнения (УЗУ).

Методика определения остаточных напряжений. Для повышения точности измерения остаточных напряжений и увеличения числа исследованных образцов все бруски (образцы-свидетели) разрезали на электроэрозионном станке на две полоски по схеме, приведенной на рис. 1, где пунктиром показана линия разрезки. Дополнительные остаточные напряжения за счет разрезки бруска учитывались измерением прогиба $f(0)$ каждой полоски по схеме рис. 2 на базовой длине l .

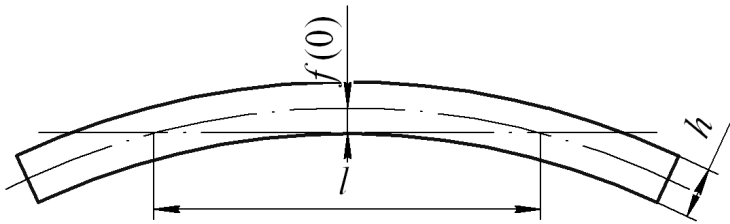


Рис. 2. Схема замера прогиба $f(0)$

Затем в пределах базовой длины l электрохимическим травлением удалялись слои материала толщиной a со стороны исследуемой поверхности полоски и замерялись возникающие при этом прогибы $f(a)$ (рис. 3). Измеренные прогибы $f(0)$ и $f(a)$ использовались далее при вычислении остаточных напряжений по формулам работы [6]

$$\sigma_z(a) - \mu \sigma_x(a) = -\frac{8E}{l^2} f(0) \left(\frac{h}{2} - a \right) + \frac{4E}{3l^2} \left[(h-a)^2 \frac{df(a)}{da} - 4(h-a) \cdot f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right], \quad (1)$$

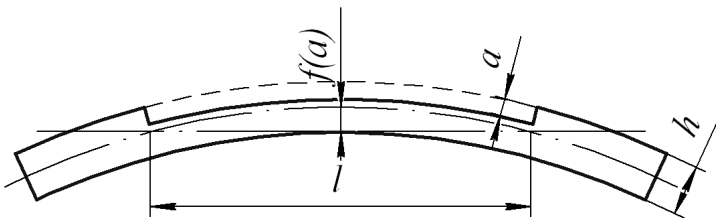


Рис. 3. Схема замера прогиба $f(a)$

где E – модуль продольной упругости, μ – коэффициент Пуассона, h – толщина полоски до травления, $0 \leq \xi \leq a$.

В случае обработки УЗУ $\sigma_z(a) = \sigma_x(a)$ и формула (1) принимает вид

$$\sigma_z(a) = \sigma_x(a) = \frac{1}{1-\mu} \left\{ -\frac{8E}{l^2} f(0) \left(\frac{h}{2} - a \right) + \frac{4E}{3l^2} \left[(h-a)^2 \frac{df(a)}{da} - 4(h-a) \cdot f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right] \right\} \quad (2)$$

При удалении слоев полоски травлением использовалась схема замера перемещений, основанная на консольном креплении образца (рис. 4). Связь между измеренными перемещениями $f(a)_{изм}$ и прогибами $f(a)$, используемыми в формулах (1) и (2), была найдена с помощью интеграла Мора [4] в следующем виде:

$$f(a) = \frac{f(a)_{изм}}{4 \left[1 + \frac{2c}{l} \right]}, \quad (3)$$

где c – длина удлинителя, l – базовая длина полоски.

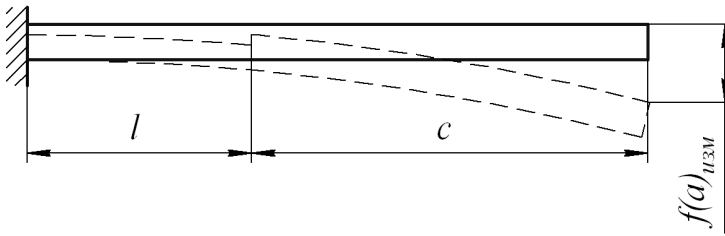


Рис. 4. Схема замера перемещений $f(a)_{изм}$

Экспериментальные исследования и анализ результатов. В исследовании определялись осевые σ_z остаточные напряжения в образцах после шлифования и ультразвукового упрочнения на режимах: расстояние от образца до концентратора-наконечника установки – 7 мм, диаметр шариков – 1 мм, масса шариков – 4,6 г, амплитуда – 0,05 мм, диаметр плоского концентратора – 40 мм, материал шариков – ШХ15.

Указанные режимы УЗУ для всех вариантов упрочнения принимались постоянными, изменялось лишь время обработки от 20 с до 80 с (табл. 1).

Таблица 1

Варианты обработки УЗУ образцов из сплава ЭП742

Вариант	1	2	3	4
Время УЗУ τ , с	20	40	60	80

На рис. 5 показано распределение остаточных напряжений $\sigma_{ост} = \sigma_z - \mu\sigma_x$ по толщине поверхностного слоя a в трех образцах (см. рис. 1) из сплава ЭП742 после шлифования, где первая цифра номера эюры соответствует номеру образца, вто-

рая – стороне образца, то есть полосы 1-1 и 1-2, 2-1 и 2-2, 3-1 и 3-2 были вырезаны из одного образца. Видно, что после шлифования в поверхностном слое образцов возникают, как правило, сжимающие остаточные напряжения до -320 МПа, которые на расстоянии $a = 0,2-0,4$ мм от поверхности меняют знак.

Распределение остаточных напряжений после шлифования весьма нестабильно. Если для обеих сторон образца 2 напряжения примерно одинаковы, то для образцов 1 и 3 они существенно различаются по характеру распределения: на одной стороне максимальные напряжения действуют на поверхности, а на другой – на расстоянии $a = 0,15-0,2$ мм от нее. В последнем случае (полоски 1-1 и 3-1) остаточные напряжения у поверхности являются растягивающими, что может отрицательно сказаться на сопротивлении усталости [4]. Следовательно, остаточные напряжения после шлифования брусков прямоугольного поперечного сечения имеют существенное рассеяние.

Результаты определения остаточных напряжений в образцах после УЗУ представлены на рис. 6. Видно, что сжимающие напряжения достигают величины -1100 МПа (вариант 1). Смена знака напряжений происходит на расстоянии $a \approx 0,2$ мм от поверхности. При всех вариантах УЗУ наблюдается спад остаточных напряжений к поверхности образца. Увеличение времени обработки от 20 до 80 с приводит к уменьшению максимума сжимающих остаточных напряжений с повышением глубины его залегания и незначительным увеличением толщины упрочненного слоя.

Далее определялись остаточные напряжения после УЗУ и последующей термоэкспозиции при температуре $T = 650$ °С в течение $\tau = 100$ и $\tau = 500$ час. Термоэкспозиция образцов при $T = 650$ °С в течение 100 час приводит к падению максимальных сжимающих остаточных напряжений примерно в 1,5 раза (рис. 7). Характер распределения напряжений не претерпевает существенных изменений. Спад остаточных напряжений к поверхности сохраняется, максимальные напряжения тем выше, чем меньше время упрочнения. Примерно на 0,02 мм увеличивается глубина залегания сжимающих остаточных напряжений, причем для образцов, обработанных с большим временем, она выше.

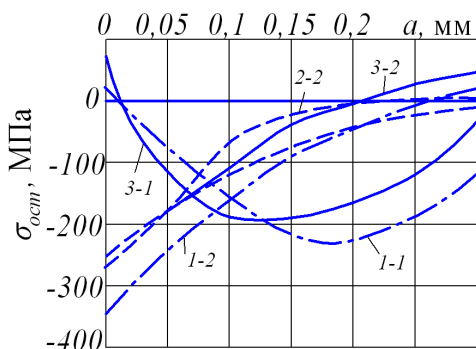


Рис. 5. Остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ в образцах из сплава ЭП742 после шлифования

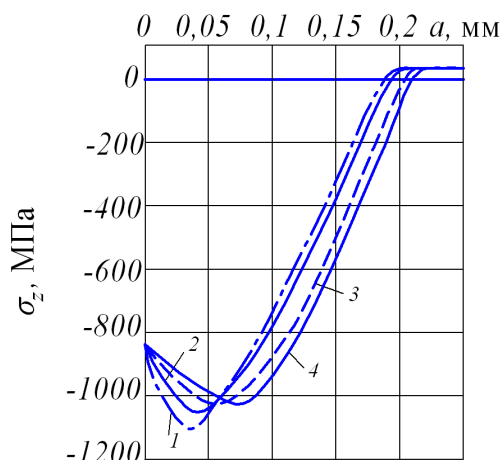


Рис. 6. Остаточные напряжения в образцах из сплава ЭП742 после УЗУ; номера эпор соответствуют вариантам табл. 1

Для одного из двух образцов вариантов 1 и 2 УЗУ наблюдалось резкое отклонение от изложенных выше закономерностей (рис. 8), выразившееся в существенно меньшем уровне остаточных напряжений, что можно объяснить либо наследственностью, либо неидентичностью технологии упрочнения. Данные рис. 5 указывают на то, что скорее всего выявленная для вариантов 1 и 2 УЗУ нестабильность остаточных напряжений обусловлена наследственностью. Следует отметить, что для вариантов 3 и 4 подобных отклонений не наблюдалось – остаточные напряжения, измеренные на четырех полосках (для каждого варианта), практически совпали. Это обстоятельство указывает на то, что при большей интенсивности упрочнения наследственность проявляется в значительно меньшей степени.

Увеличение времени термоэкспозиции образцов, обработанных УЗУ, до 500 час при той же температуре 650 °С практически не изменяет величину максимальных сжимающих остаточных напряжений и приводит к некоторому увеличению толщины слоя со сжимающими напряжениями (рис. 9). При этом наблюдается значительно большее падение напряжений к поверхности, причем оно тем больше, чем больше время обработки УЗУ. Так, при $\tau = 80$ с (вариант 4) остаточные напряжения на поверхности составили лишь -160 МПа. Наблюдается также смещение максимума напряжений от поверхности вглубь образца.

Следовательно, термоэкспозиция образцов при $T = 650$ °С, обработанных УЗУ, приводит к существенному уменьшению уровня сжимающих остаточных напряжений, особенно на поверхности, смещению максимума напряжений от поверхности и некоторому увеличению слоя со сжимающими остаточными напряжениями. Увеличение времени термоэкспозиции от 100 до 500 час влечет дальнейшее уменьшение сжимающих остаточных напряжений на поверхности и смещение максимума этих напряжений вглубь образца, незначительно изменяя толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями.

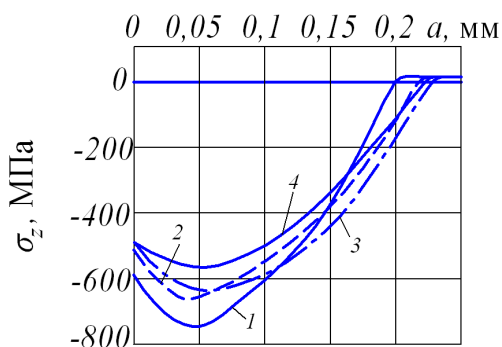


Рис. 7. Остаточные напряжения в образцах из сплава ЭП742 после УЗУ и термоэкспозиции при $T = 650$ °С и $\tau = 100$ час; номера эпюр соответствуют вариантам табл. 1

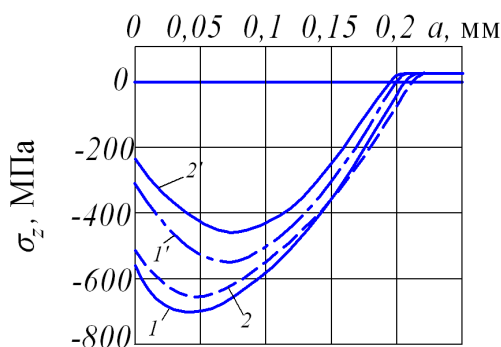


Рис. 8. Остаточные напряжения в двух образцах из сплава ЭП742 после УЗУ (варианты 1 и 2) и термоэкспозиции при $T = 650$ °С и $\tau = 100$ час; номера эпюр соответствуют вариантам табл. 1

Возникает вопрос: как влияет изменение характера распределения остаточных напряжений после термоэкспозиции обработанных УЗУ образцов на предел выносливости? В исследовании [7] было установлено, что после термоэкспозиции при температуре 150 и 200 °С азотированных и упрочненных роликком стальных образцов

наблюдалось снижение сжимающих остаточных напряжений на поверхности и смещение их максимума вглубь. При этом предел выносливости образцов увеличивался. Следовательно, на сопротивление усталости поверхностно упрочненных образцов и деталей оказывает влияние не только величина, но и характер распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя. В работе [8] для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости был предложен критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ в виде

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

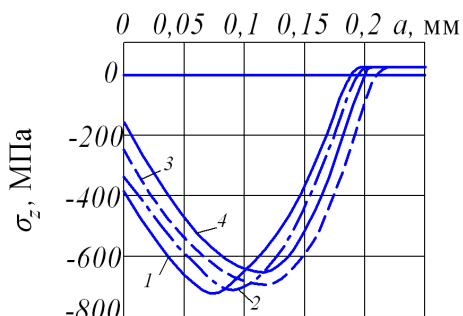


Рис. 9. Остаточные напряжения в образцах из сплава ЭП742 после УЗУ и термоэкспозиции при $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\tau = 500$ час; номера эюр соответствуют вариантам табл. 1

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении упрочненной детали; $\xi = y/t_{кр}$ – 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 (образца) на пределе выносливости.

В работах [4, 9, 10] экспериментально установлено, что значение $t_{кр}$ зависит только от размеров опасного поперечного сечения детали (образца)

и в настоящем исследовании при $H = 10$ мм составляет $t_{кр} = 0,216$ мм. По толщине поверхностного слоя, равной $0,216$ мм, на основании данных рис. 7, 8 и 10 по формуле (4) были вычислены среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$, значения которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ [МПа] обработанных УЗУ образцов из сплава ЭП742

Вариант упрочнения	1	2	3	4
УЗУ	-415	-429	-473	-510
УЗУ + термоэкспозиция при $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\tau = 100$ час	-339	-350	-396	-323
УЗУ + термоэкспозиция при $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\tau = 500$ час	-301	-321	-378	-311

Из данных табл. 2 видно, что термоэкспозиция обработанных УЗУ образцов при температуре $650 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $\tau = 100$ час приводит к значительному снижению критерия $\bar{\sigma}_{ост}$. Наибольшее снижение критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ составило $36,7 \%$ для варианта 4, наименьшее – $16,3 \%$ для варианта 3. Этот факт объясняется, очевидно, перенаклепом поверхностного слоя образцов при обработке УЗУ в течение 80 с. Увеличение времени термоэкспозиции до 500 час при той же температуре $650 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к некоторому дополнительному снижению критерия $\bar{\sigma}_{ост}$, однако это снижение существенно меньше, чем в первые 100 час.

Анализируя представленные в табл. 2 данные, можно предположить, что для деталей из сплава ЭП742, работающих при температуре 650 °С, оптимальным вариантом обработки УЗУ при исследованных режимах является вариант 3, так как для этого варианта значение критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ наибольшее и поэтому приращение предела выносливости за счет упрочнения будет наибольшим.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. После шлифования в плоских образцах из сплава ЭП742 остаточные напряжения имеют существенное рассеяние, изменяясь на поверхности от –320 МПа до +50 МПа.

2. Обработка УЗУ шлифованных образцов вызывает появление в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений до –1100 МПа, причем с увеличением времени упрочнения от 20 с до 80 с увеличивается спад напряжений к поверхности и их максимум смещается вглубь образца.

3. Термоэкспозиция образцов, обработанных УЗУ при $T = 650$ °С в течение 100 час в 1,4 – 1,6 раза уменьшает уровень сжимающих остаточных напряжений, смещает максимум от поверхности и незначительно увеличивает слой со сжимающими остаточными напряжениями. Увеличение времени термоэкспозиции от 100 до 500 час приводит к дальнейшему уменьшению напряжений и смещению максимума вглубь образца.

4. Анализ исследованных режимов обработки УЗУ по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ показал, что для деталей из сплава ЭП742, работающих при температуре 650 °С, наиболее эффективно упрочнение при $\tau = 60$ с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Прямой метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочненном изделии цилиндрической формы при ползучести // ПМТФ. – 2009. – Т. 50, №6. – С. 90-99.
2. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 226 с.
3. Радченко В.П., Киртичѳв В.А., Лукин В.В. Влияние пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на остаточные напряжения и предел выносливости образцов с надрезами из сплавов В95 и Д16Т // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2011. – №11(24). – С. 181-184.
4. Павлов В.Ф., Киртичѳв В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
5. Радченко В.П., Саушкин М.Н., Павлов В.Ф. Метод расчета полей остаточных и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения // ПМТФ. – 2011. – Т. 52, №2. – С. 173-182.
6. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
7. Туровский М.Л., Новик Р.А. Упрочняющая обработка роликами азотированных стальных деталей // Вестник машиностроения. – 1970. – №1. – С. 39-42.
8. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
9. 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.
10. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37-40.

Статья поступила в редакцию 22 июня 2012 г.

THE INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES THERMAL EXPOSITION SAMPLES OF ALLOY EP742 AFTER ULTRASONIC HARDENING

V.P. Radchenko¹, V.A. Kirpichyov¹, V.V. Lunin¹

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

² Samara State Aerospace University
34, Moskovskoe hw., Samara, 443086

Calculation-experimental method investigated residual stresses in the plane of polycrystalline samples of alloy EP742, after grinding, ultrasonic hardening and thermal exposition (temperature exposure without load at $T=650$ °C). Revealed regularities of distribution of residual stresses through the thickness of the surface layer of the samples. It is shown that in times thermal exposition $1,4 \div 1,6$ reduces the level of compressive residual stresses and produces a shift of the maximum depth of the sample. The effect of residual stress fields and thermal exposition an increment in the fatigue limit.

Keywords: *flat sample, the alloy EP742, grinding, ultrasonic hardening thermal exposition, residual stresses.*

Vladimir V. Radchenko (Dr.Sc. (Phys. & Math.)), Head of Dept., Dept. of Applied Mathematics & Computer Science.

Victor A. Kirpichyov (Dr. Sc. (Techn.)), Dean Faculty of Aircraft Construction.

Valentin V. Lunin, Postgraduate Student, Dept. of Applied Mathematics & Computer Science.