

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА УПРОЧНЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВОВ В95 И Д16Т ВСЛЕДСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВЫДЕРЖЕК И МНОГОЦИКЛОВЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ*

В.П. Радченко, А.П. Морозов

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

Изучено влияние многоцикловых усталостных испытаний и температурных выдержек на макроструктуру металла цилиндрических образцов из сплавов Д16Т и В95, предварительно упрочненных пневмодробеструйной обработкой. Установлено, что распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа упрочненных образцов неоднородно – в упрочненной (периферийной) зоне оно значительно выше, чем в более отдаленных от поверхности зонах. Микроструктурный анализ поперечного сечения образцов выявил наличие трех ярко выраженных зон: сильно наклепанной поверхностной, дефектной основной и слабodefектной глубинной. Установлено, что термоэкспозиция приводит к частичному уменьшению признаков наклепанной структуры.

Ключевые слова: цилиндрические образцы, упрочнение, температурные выдержки, усталостные испытания, макроструктура металла.

Введение. Основной задачей современного машиностроения и авиадвигателестроения является повышение срока службы и надежности изделий с одновременным снижением (или хотя бы неувеличением) их массы. Конструктивные методы повышения прочности при переменных нагрузках приводят, как правило, к увеличению массы конструкций и числа комплектующих, усложнению технологии изготовления, ухудшают унификацию и стандартизацию.

Одним из основных резервов повышения сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений является применение современных поверхностно упрочняющих технологий, при котором не происходит изменений ни геометрических параметров детали, ни ее массы [1-4]. Увеличение предела сопротивления усталости после поверхностного пластического деформирования детали связано с изменением физико-механического состояния поверхностного слоя и наличием в нем сжимающих остаточных напряжений. Кроме этого, важную роль играют параметры шероховатости поверхности, ее микротвердость, степень и глубина деформационного упрочнения, искажение кристаллической решетки, изменение формы и размера зерна, плотность дислокаций и другие параметры. Поэтому изучение влияния упрочнения на параметры усталости должно носить комплексный характер: как с позиций механики деформируемого твердого тела, так и с позиций металлофизики.

Так, в работе [5] изучено влияние пневмодробеструйной обработки на остаточные напряжения и предел выносливости плоских образцов из сплава ЭИ698 ВД, а в [6] поставлена и решена задача оценки влияния многоцикловых усталостных испытаний на характеристики шероховатости и микротвердости указанных выше образ-

* Работа выполнена в рамках Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № РНП.2.1.1/3397).

Владимир Павлович Радченко – д. ф.-м. н., профессор.

Андрей Павлович Морозов – студент.

цов и показано, что по длине образца наблюдается крайне неравномерное распределение микротвердости, а параметры шероховатости малочувствительны к многоцикловым испытаниям.

В работе [7] рассмотрено влияние режимов пневмодробеструйной обработки (ПДО) и последующих термоэкспозиций (ТЭ) и усталостных испытаний на характеристики шероховатости и микротвердости поверхностного слоя цилиндрических образцов из алюминиевых сплавов В95 и Д16Т с концентраторами напряжений полукруглого профиля с радиусами $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм. Анализ образцов, проведенный как после пневмодробеструйной обработки, так и после пневмодробеструйной обработки с последующей термоэкспозицией (температурной выдержкой при $T = 125$ °С без нагрузки), позволил установить ряд следующих интересных результатов: 1) пневмодробеструйная обработка значительно влияет на рост микротвердости (в особенности на образцах из сплава В95, где ее значения возрастают на 1000-3000 НК по сравнению с исходной неупрочненной структурой); 2) термоэкспозиция снижает значение микротвердости до исходного состояния, что особенно заметно для образцов из сплава В95; 3) пневмодробеструйная обработка повышает параметры шероховатости поверхностного слоя; термоэкспозиция не оказывает влияния на эти параметры.

В настоящей работе выполнен макроструктурный анализ состояния материала исследованных в [7] цилиндрических образцов из алюминиевых сплавов В95 и Д16Т.

Методика проведения эксперимента. Исследованию подвергались полые цилиндрические образцы с внешним диаметром 15 мм и внутренним отверстием диаметром 5 мм, изготовленные из алюминиевых сплавов В95 и Д16Т. Внешний вид разрушенных образцов представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид разрушенных образцов

Разрушенным образцам предшествовала пневмодробеструйная обработка, так и после пневмодробеструйной обработки с последующей термоэкспозицией в течение 100 ч при температуре 125 °С. Пневмодробеструйная обработка осуществлялась при давлении воздуха 0,25 МПа стальными шариками радиусом 2 мм. После этого резцом наносились полукруглые концентраторы $R = 0,3$ мм или $R = 0,5$ мм. На упрочненных образцах и образцах, прошедших термоэкспозицию, были проведены усталостные испытания на базе 10^6 циклов. Таблица содержит основную информацию по исходным характеристикам образцов.

Рассматривались образцы как после пневмодробеструйной обработки, так и после пневмодробеструйной обработки с последующей термоэкспозицией в течение 100 ч при температуре 125 °С. Пневмодробеструйная обработка осуществлялась при давлении воздуха 0,25 МПа стальными шариками радиусом 2 мм. После этого резцом наносились полукруглые концентраторы $R = 0,3$ мм или $R = 0,5$ мм. На упрочненных образцах и образцах, прошедших термоэкспозицию, были проведены усталостные испытания на базе 10^6 циклов. Таблица содержит основную информацию по исходным характеристикам образцов.

В отличие от работы [7], где были исследованы параметры микротвердости по длине образца, в настоящей работе исследована микротвердость по глубине поперечного (разрушенного) сечения (шлифа) образцов. Измерение микротвердости по Кнуппу производилось с помощью микротвердомера ММ6 фирмы Leitz.

Для выявления размера зерна был проведен ряд вспомогательных операций: шлифовка образцов на шлифовальном круге, шлифовка с помощью абразивной шкурки, полировка. Для выявления границ зерен применялся травитель: 1,0 мл HF;

26 мл HNO_3 ; 1,6 мл HCl ; 100 мл H_2O . Продолжительность травления составляла 10 с. После травления шлифы промывали горячей водой, сушили в струе воздуха.

Исходные характеристики образцов

№ образца	Марка алюминиевого сплава	Режим обработки	Циклические напряжения в процессе усталостных испытаний σ , МПа
Разрушенные образцы			
20	V95	ПДО	17,5 (сломался сам)
23	V95	ПДО	13,25 (доломали)
34	V95	ПДО+ТЭ	13,0 (сломался сам)
21	V95	ПДО	12,5 (сломался сам)
25	V95	ПДО	13,25 (доломали)
36	V95	ПДО+ТЭ	12,25 (сломался сам)
39	V95	ПДО+ТЭ	11,5 (сломался сам)
36	Д16Т	ПДО+ТЭ	15,25 (доломали)
21	Д16Т	ПДО	16,0 (сломался сам)
34	Д16Т	ПДО+ТЭ	15,0 (доломали)
15	Д16Т	ПДО	18 (сломался сам)
23	Д16Т	ПДО	15,75 (сломался сам)
30	Д16Т	ПДО+ТЭ	17,5 (доломали)
37	Д16Т	ПДО+ТЭ	15,25 (доломали)
Неразрушенные образцы			
8	V95	Неупр.	10,75
17	V95	ПДО	20,5
11	Д16Т	Неупр.	8,25
27	Д16Т	ПДО	16,0

Результаты экспериментов и их обсуждение. Первый этап работы заключался в исследовании микротвердости по Кнуппу по глубине шлифа: в качестве примера на рис. 2 и 3 приведены распределения микротвердости по глубине L поперечного шлифа для образцов №23 (сплав V95) и №21 (сплав Д16Т) после дробеструйной обработки, из которых следует, что в упрочненной зоне значения микротвердости заметно выше, чем в более отдаленных от поверхности зонах. По-видимому, это связано с наличием значительных остаточных сжимающих напряжений в поверхностно

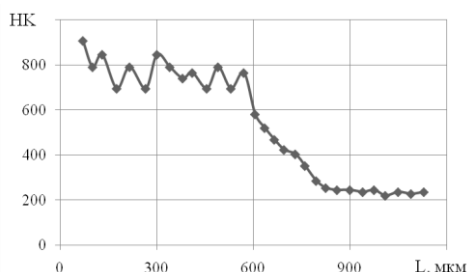


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа в образце №23 (V95, ПДО)

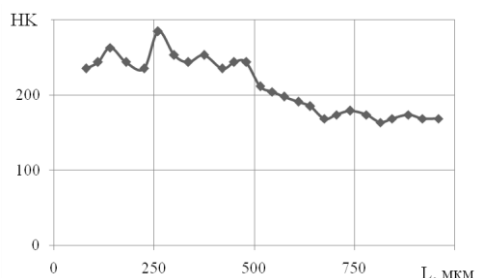


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа в образце №21 (Д16Т, ПДО)

упрочненном слое образцов. Действительно, как следует из экспериментальных данных работы [8], область сжимающих остаточных напряжений для упрочнённых

цилиндрических образцов из этих сплавов составляет 500–600 мкм, и именно такой же является область повышенных значений микротвёрдости (см. рис. 2 и 3).

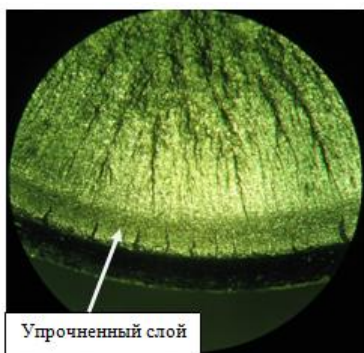


Рис. 4. Трещины в упрочненном слое. $\times 56$

Второй этап работы заключался в проведении макроструктурного анализа зоны разрушения. Особый интерес представляют трещины, образованные в упрочненном слое, идущие вглубь от поверхности образца (рис. 4).

Металлографический анализ, проведенный в поперечном сечении, показывает, что образцы после ПДО имеют три характерные зоны (в качестве примера на рис. 5 представлен образец №15 из сплава Д16Т).

1. Поверхностная (рис. 5, *а*), которая представляет собой темно-травящийся слой. Здесь структура очень дефектна за счет высокой степени наклепа. Сплав В95 имеет более темную поверхностную зону (это связано с большим значением микротвёрдости в этом сплаве). Глубина этого слоя составляет примерно 540 мкм для сплава В95 (рис. 2) и 480 мкм для сплава Д16Т (рис. 3).

2. Основная (рис. 5, *б*), протяженность которой составляет величину порядка 40 мм. Это зона, в которой имеется также большое количество дефектов, в основном сконцентрированных по границам зерен. Зерна имеют вытянутую форму по образующей цилиндрического образца, приобретенную вследствие упрочнения.

3. Глубинная (рис. 5, *в*), в которую плавно переходит основная зона. Эта область характеризуется сравнительно небольшим количеством дефектов. Здесь зерна имеют форму, образовавшуюся в ходе получения прессованного полуфабриката, из которого изготовлены образцы.

Влияние ТЭ на изменение структуры зерен показано на рис. 6. Установлено, что поверхностная зона становится более светлой, так как нагрев до 125 °С в течение 100 ч приводит к уменьшению числа дефектов в структуре: устраняются точечные и линейные несовершенства. В основной зоне уменьшается травимость границ зерен, что связано с уменьшением их дефектности. На рис. 6 (*б*, *в*) четко просматриваются темные фазы сложного состава, которые представляют собой первичные интерметаллиды литейного происхождения.

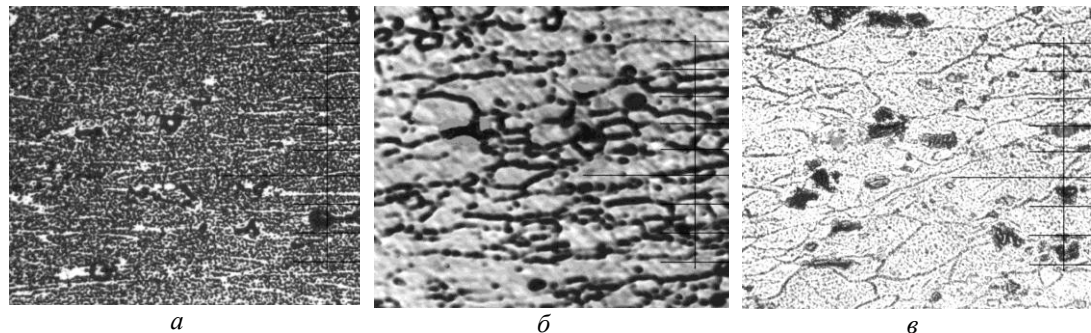


Рис. 5. Три зоны в поперечном сечении образца №15 (Д16Т) после ПДО. $\times 400$

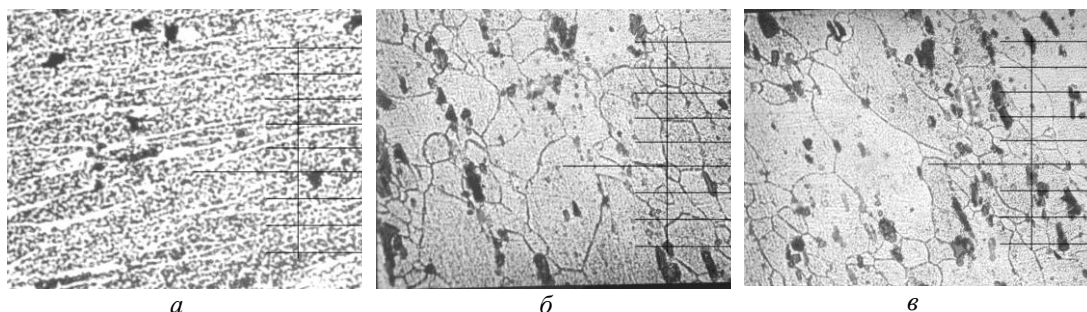


Рис. 6. Три зоны в поперечном сечении образца №34 (Д16Т) после ПДО+ТЭ. ×400

Выводы по работе. Проведенный анализ образцов как после пневмодробеструйной обработки, так и после пневмодробеструйной обработки с последующей термоэкспозицией позволил сформулировать нижеследующие выводы.

1. Макроструктурный анализ выявил наличие очага разрушения на всех исследуемых образцах и рудистый излом в виде ступенек. В упрочненном слое наблюдалось большое количество трещин.

2. Распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа упрочненных цилиндрических образцов крайне неоднородное: в упрочненной (периферийной) зоне значения микротвердости значительно выше, чем в более отдаленных от поверхности зонах.

3. Макроструктурный анализ поперечного сечения образцов выявил наличие трех ярко выраженных зон: сильно наклепанной поверхностной, дефектной основной и слабodefектной глубинной.

4. Термоэкспозиция приводит к частичному уменьшению признаков наклепанной структуры. Внешним проявлением этого является релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое, наблюдаемая после термоэкспозиции [8], что, по-видимому, обусловлено деформацией ползучести и процессом перераспределения напряжений во времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
2. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1974. – 250 с.
3. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
4. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
5. Кирпичев В.А., Букатый А.С. Влияние режимов пневмодробеструйной обработки на остаточные напряжения, микротвердость и сопротивление усталости // В сб.: Физика прочности и пластичности материалов. Труды XVII Международной конференции. – Самара: СамГТУ, 2009. – Т. 1. – С. 109-111.
6. Радченко В.П., Морозов А.П., Букатый А.С. Влияние многоцикловых усталостных испытаний на физико-механическое состояние упрочненного слоя плоских образцов // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки, 2009. – № 3(25). – С. 158-165.
7. Радченко В.П., Морозов А.П. Экспериментальное исследование влияния пневмодробеструйной обработки, температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний на физико-механическое состояние упрочненного слоя цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т образцов // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2010. – № 5(21). – С. 222-228.
8. Кирпичев В.А., Иванов В.Д., Саушкин М.Н. Остаточные напряжения в образцах из сплавов В95 и Д16Т после пневмодробеструйной обработки // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2009. – № 2(19). – С. 260-263.

**RESEARCH OF CHANGE METAL MACROSTRUCTURE HARDENED
CYLINDRICAL SAMPLES OF ALLOYS V95 AND D16T AS A RESULT OF
TEMPERATURE CONDITIONINGS AND HIGH-CYCLE FATIGUE TESTS**

V.P. Radchenko, A.P. Morozov

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

Here was researched the influence of high-cycle test and temperature conditionings on macrostructure of metal cylindrical samples of alloys D16T and V95, which had been previously hardened with the air shot blasting. It became clear that depth distribution of microhardness in the hardened samples is dissimilar. It's greater in hardened (peripheral) area than in areas that are distant from the surface. Microstructure analysis of the cross-section showed that there were 3 zones: cold-hardened superficial zone, defective basic zone and little defective deep zone. Termoexposition leads to partial decrease of cold-hardened structure signs.

Keywords: *cylindrical samples, hardening, temperature conditionings, fatigue tests, metal macrostructure.*