

УДК 621.787:539.319

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПНЕВМОДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ, ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВЫДЕРЖЕК И МНОГОЦИКЛОВЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ УПРОЧНЁННОГО СЛОЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВОВ В95 И Д16Т**

*В. П. Радченко, А. П. Морозов*

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

E-mails: radch@samgtu.ru, andre15@inbox.ru

*Изучено влияние многоцикловых усталостных испытаний и температурных выдержек на характеристики шероховатости и микротвёрдости цилиндрических образцов из сплавов Д16Т и В95, предварительно упрочнённых пневмодробеструйной обработкой. Установлено, что поверхностно-пластическое упрочнение значительно влияет на рост микротвёрдости по сравнению с неупрочнённым образцом. После температурных выдержек происходит падение микротвёрдости до значений, соответствующих неупрочнённому образцу. Поверхностное упрочнение повышает параметры шероховатости слоя, а дальнейшая температурная выдержка и усталостные испытания не оказывают влияние на данные параметры. Приведены результаты экспериментальных измерений в виде таблиц и графиков.*

**Ключевые слова:** цилиндрические образцы, сплавы В95 и Д16Т, упрочнение, многоцикловые усталостные испытания, температурные выдержки, микротвёрдость, шероховатость.

**Введение.** Поверхностно-пластическое деформирование — один из резервов повышения усталостной прочности деталей, при этом взаимное влияние параметров качества поверхностного слоя и характеристик усталости сталей и сплавов при многоцикловом нагружении является хорошо известным фактом [1–3]. Поэтому исследование шероховатости поверхности, ее микротвёрдости, степени и глубины деформационного упрочнения, величины остаточных напряжений и многих физических параметров, связанных с искажением кристаллической решетки, плотностью дислокаций, является актуальной задачей. В частности, в работе [4] изучено влияние режимов пневмодробеструйной обработки на остаточные напряжения и предел выносливости плоских образцов из сплава ЭИ698ВД (ХН73МБТЮ-ВД). Испытания на усталость производились по схеме изгиба консольно закреплённой балки, при этом поперечная циклическая нагрузка прикладывалась на незакреплённом конце образца. В работе [5] эти же образцы были экспериментально исследованы по параметрам микротвёрдости и шероховатости. В результате установлено следующее:

- 1) упрочнение приводит к повышению параметров шероховатости по сравнению с неупрочнённым образцом;

---

*Владимир Павлович Радченко* (д.ф.-м.н., проф.), зав. кафедрой, каф. прикладной математики и информатики. *Андрей Павлович Морозов*, студент, каф. прикладной математики и информатики.

- 2) микротвёрдость упрочнённых образцов существенно выше микротвёрдости на неупрочнённых образцах, что, по-видимому, связано с наличием значительных сжимающих остаточных напряжений в упрочнённом слое;
- 3) усталостные испытания не оказывают существенного влияния на шероховатость поверхности;
- 4) после завершения усталостных испытаний имеется неоднородное распределение микротвёрдости по длине образца, при этом значение микротвёрдости увеличивается от консольно закреплённого конца к свободному концу балки, что, по-видимому, объясняется частичной релаксацией остаточных напряжений в силу накопления повреждённости в материале от действия изгибных напряжений, которые имеют максимальные значения в области консольно закреплённого конца.

В настоящей работе рассмотрено влияние режимов пневмодробеструйной обработки (ПДО) и последующих термоэкспозиции (ТЭ) и усталостных испытаний на характеристики шероховатости и микротвёрдости поверхностного слоя цилиндрических образцов из алюминиевых сплавов В95 и Д16Т.

**1. 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.

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 на пневмодробеструйной установке при давлении воздуха 0,25 МПа стальными шариками радиусом 2 мм. После этого резцом наносились полукруговые концентраторы  $R = 0,3$  мм или  $R = 0,5$  мм. На упрочнённых образцах и образцах, прошедших термоэкспозицию, были проведены усталостные испытания на базе  $10^6$  циклов. Табл. 1 содержит основную информацию по исходным характеристикам образцов.

На исследуемых образцах с помощью микротвердомера ММ6 фирмы Leitz осуществлялось измерение микротвёрдости по Кнуппу. На разрушенных и неразрушенных образцах измерение микротвёрдости проводилось в зоне 1 и зоне 2 (см. рис. 1). Следует отметить, что допускается незначительная погрешность в полученных результатах, так как в зоне 2 влияние на точность измерений оказывала неровность рельефа. В зоне 1 шаг измерения составлял 2000–3000 мкм, а измерения микротвёрдости в зоне 2 осуществлялись в направлении от области разрыва образца с шагом 100–300 мкм (первые 3 замера) и 700–800 мкм (последующие замеры) на длину 17–18 мм.



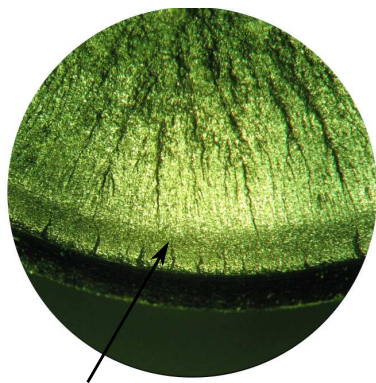
Рис. 1. Внешний вид разрушенных образцов

## Исходные характеристики образцов

№ образца	Марка алюминиевого сплава	Режим обработки	Циклические напряжения в процессе усталостных испытаний $\sigma$ , МПа
Разрушенные образцы			
20	V95	ПДО	171,5 (сломался сам)
23	V95	ПДО	132,3 (доломали)
34	V95	ПДО+ТЭ	127,4 (сломался сам)
21	V95	ПДО	122,5 (сломался сам)
25	V95	ПДО	132,3 (доломали)
36	V95	ПДО+ТЭ	120,05 (сломался сам)
39	V95	ПДО+ТЭ	112,7 (сломался сам)
36	Д16Т	ПДО+ТЭ	149,45 (доломали)
21	Д16Т	ПДО	156,8 (сломался сам)
34	Д16Т	ПДО+ТЭ	147 (доломали)
15	Д16Т	ПДО	176,4 (сломался сам)
23	Д16Т	ПДО	154,35 (сломался сам)
30	Д16Т	ПДО+ТЭ	171,5 (доломали)
37	Д16Т	ПДО+ТЭ	149,45 (доломали)
Неразрушенные образцы			
8	V95	Неупр.	105,35
17	V95	ПДО	200,9
11	Д16Т	Неупр.	80,85
27	Д16Т	ПДО	156,8

Измерение шероховатости проводилось на приборе Surftest SJ-201P. Шероховатость в зоне 1 характеризуют замеры 1–4, а в зоне 2 — замер 5. Длина каждого замера — 12,5 мм. Исследование шероховатости производилось по следующим параметрам:  $R_z$  — высота неровностей профиля по десяти точкам,  $R_q$  — среднее квадратичное отклонение профиля.

**2. Результаты экспериментов и их обсуждение.** Первый этап работы заключался в проведении макроструктурного анализа зоны разрушения. Особый интерес представляют трещины, образованные в упрочнённом слое и идущие вглубь от поверхности образца (рис. 2).



Упрочнённый слой  
Рис. 2. Трещины в упрочнённом слое ( $\times 56$ )

Данные по измерению микротвёрдости в анализируемых образцах и характерное распределение НК для сплава V95 представлены в табл. 2 и на рис. 3 и 5, а для Д16Т — в табл. 2 и на рис. 4 и 6. Следует отметить, что для каждого из сплавов вводилась собственная нумерация образцов. Поэтому в табл. 2 номера образцов для этих сплавов могут совпадать.

Выявлено, что микротвёрдость в зоне 1 (см. рис. 1) имеет практически однородный характер. Значения микротвёрдости для сплава V95 составляют 200–280 НК, а для Д16Т — 150–250 НК.

Рассмотрим влияние пневмодробеструйной обработки на характер изменения микротвёрдости. В связи с упомянутой ранее неровно-

Таблица 2

Разброс значений микротвёрдости в зонах 1 и 2

№ образца	Марка сплава	Режим обработки	Микротвёрдость в зоне 1, НК	Микротвёрдость в зоне 2, НК
20	В95	ПДО	190–280	450–3600
23	В95	ПДО	190–285	500–1050
34	В95	ПДО+ТЭ	180–285	50–300
21	В95	ПДО	225–285	225–2460, 245–2200
25	В95	ПДО	210–285	400–2200, 450–1800
36	В95	ПДО+ТЭ	225–285	200–285, 210–240
39	В95	ПДО+ТЭ	210–265	225–340, 225–290
36	Д16Т	ПДО+ТЭ	145–310	210–310
21	Д16Т	ПДО	135–275	210–285
34	Д16Т	ПДО+ТЭ	150–310	245–330
15	Д16Т	ПДО	140–175	200–790, 210–700
23	Д16Т	ПДО	140–210	200–270, 210–270
30	Д16Т	ПДО+ТЭ	150–225	200–445, 200–375
37	Д16Т	ПДО+ТЭ	150–310	225–330, 185–320
8	В95	Неупр.	220–265	190–300
17	В95	ПДО	185–285	550–1040
11	Д16Т	Неупр.	140–285	185–310
27	Д16Т	ПДО	140–185	90–265

стью рельефа на всех исследуемых образцах наблюдается сильный разброс значений микротвёрдости. Особое внимание следует обратить на влияние пневмодробеструйной обработки, применённой к образцам из сплава В95: микротвёрдость на образце 20 местами увеличивается до 3600 НК, на 23 — до 1050 НК, на 21 — до 2460 НК, на 25 — до 2200 НК. На образцах из сплава Д16Т также наблюдается рост микротвёрдости, но в меньшей степени (см. табл. 2).

Термоэкспозиция, проведенная на образцах после пневмодробеструйной обработки, заметно снижает значения микротвёрдости в обоих рассмотренных сплавах. Практически во всех образцах (34, 36, 39 (сплав В95) и 36, 34, 30, 37 (сплав Д16Т)) термоэкспозиция приводит к падению микротвёрдости до исходного (неупрочнённого) состояния. Обратим внимание, что наиболее резкое снижение микротвёрдости заметно у сплава В95, что объясняется его малой теплостойкостью.

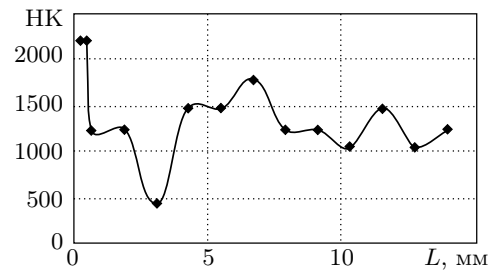


Рис. 3. Характерное изменение микротвёрдости в образце 25 (В95) в упрочнённой зоне (ПДО)

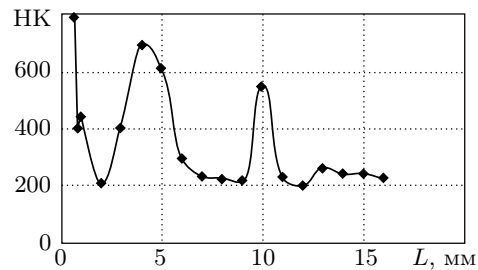


Рис. 4. Характерное изменение микротвёрдости в образце 15 (Д16Т) в упрочнённой зоне (ПДО)

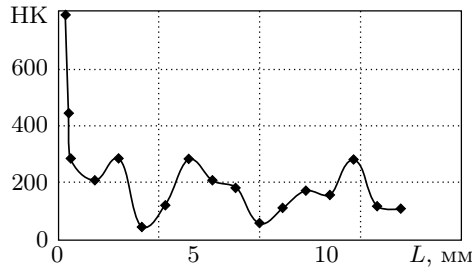


Рис. 5. Характерное изменение микротвёрдости в образце 34 (В95) в упрочнённой зоне (ПДО+ТЭ)

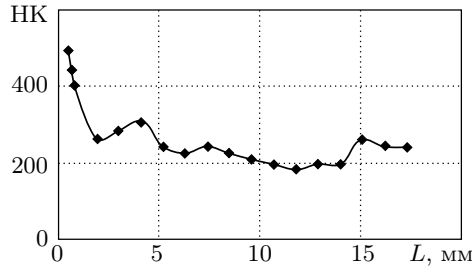


Рис. 6. Характерное изменение микротвёрдости в образце 37 (Д16Т) в упрочнённой зоне (ПДО+ТЭ)

Усталостные испытания, проведенные на указанных образцах, привели к значительному росту микротвёрдости в зоне, непосредственно прилегающей к месту разрушения. Первые 4 замера, произведенные с шагами примерно 350, 150, 150, 500 мкм соответственно, указывают на то, что радиус области влияния пластической деформации составляет примерно 700–900 мкм. Микротвёрдость в этой зоне выросла в 1,5–3 раза (см. рис. 3–6). Наибольшие значения микротвёрдости в зоне 2, указанные в табл. 2, соответствуют именно этой области.

Результаты следующего этапа — измерения шероховатости — представлены в табл. 3, которая содержит информацию по параметрам  $R_z$  и  $R_q$ , полученную на замерах 1–4 (зона 2, см. рис. 1). Замер 5 (зона 1) был произведён на образцах 17 и 21. В результате были получены следующие

значения:  $R_z = 5,05$  мкм,  $R_q = 1,02$  мкм на образце 17 и  $R_z = 4,94$  мкм,  $R_q = 1,01$  мкм на образце 21.

Величины  $R_z$  и  $R_q$  на неупрочнённых образцах имеют сравнительно небольшие значения. Пневмодробеструйная обработка значительно искажает рельеф образцов и способствует сильному росту шероховатости, что наглядно представлено в табл. 3. Установлено, что термоэкспозиция не влияет на изменение шероховатости поверхности.

Таблица 3

Результаты измерения шероховатости (мкм)

№ образца	Марка сплава	Режим обработки	Замер 1		Замер 2		Замер 3		Замер 4	
			$R_z$	$R_q$	$R_z$	$R_q$	$R_z$	$R_q$	$R_z$	$R_q$
20	В95	ПДО	27,20	5,77	25,31	5,44	20,75	4,87	18,99	4,35
23	В95	ПДО	23,93	5,29	21,30	4,76	21,34	5,01	22,91	5,53
34	В95	ПДО+ТЭ	20,39	4,87	22,53	4,97	16,27	3,41	19,94	4,33
36	Д16Т	ПДО+ТЭ	26,54	5,63	24,47	5,83	21,01	4,99	23,94	5,85
21	Д16Т	ПДО	21,18	4,89	23,81	5,39	24,28	5,33	24,44	5,92
34	Д16Т	ПДО+ТЭ	28,18	6,39	24,80	5,37	25,35	5,43	21,99	4,63
8	В95	Неупр.	9,63	2,00	5,74	1,10	10,12	2,16	9,61	2,02
17	В95	ПДО	23,41	5,47	22,80	5,09	21,81	5,38	19,52	4,05
11	Д16Т	Неупр.	6,31	1,19	9,91	2,00	14,74	3,25	8,26	1,53
27	Д16Т	ПДО	23,10	5,39	24,16	6,09	23,03	5,31	21,45	4,91

**Выводы по работе.** Проведённый анализ образцов как после пневмодробеструйной обработки, так и после пневмодробеструйной обработки с последующей термоэкспозицией, показал следующее:

- 1) макроструктурный анализ выявил наличие очага разрушения на всех исследуемых образцах и ручьистый излом в виде ступенек; в упрочнённом слое наблюдалось большое количество трещин;
- 2) пневмодробеструйная обработка значительно влияет на рост микротвёрдости (в особенности на образцах из сплава В95, где её значения возрастают на 1000–3000 НК по сравнению с исходной структурой);
- 3) термоэкспозиция снижает значение микротвёрдости до исходного состояния, что особенно заметно для образцов из сплава В95;
- 4) на расстоянии 700–900 мкм от зоны разрушения после усталостных испытаний сказывается влияние пластической деформации, которая приводит к сильному скачку микротвёрдости;
- 5) пневмодробеструйная обработка повышает параметры шероховатости поверхностного слоя; термоэкспозиция не оказывает влияния на данные параметры.

*Работа выполнена в рамках Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № РНП.2.1.1/3397) и при поддержке РФФИ (проект № 10-01-00644-а).*

#### 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. Кирпичёв В. А., Букатый А. С. Влияние режимов пневмодробеструйной обработки на остаточные напряжения, микротвёрдость и сопротивление усталости / В сб.: *Физика прочности и пластичности материалов*: Труды XVII Междунар. конф. — Самара: СамГТУ, 2009. — Т. 1. — С. 109–111.
5. Радченко В. П., Морозов А. П., Букатый А. С. Влияние многоцикловых усталостных испытаний на физико-механическое состояние упрочнённого слоя плоских образцов // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки*, 2009. — № 3(25). — С. 158–165.

Поступила в редакцию 04/IX/2010;  
в окончательном варианте — 20/IX/2010.

MSC: 74–05, 74N15

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT INDUCED BY AIR SHOT-BLASTING PROCESSING, THERMAL EXPOSITION AND HIGH CYCLE FATIGUE TESTS ON PHYSICAL AND MECHANICAL CONDITION HARDENING LAYER OF CYLINDRICAL SAMPLES OF ALLOYS V95 AND D16T**

*V. P. Radchenko, A. P. Morozov*

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

E-mails: radch@samgtu.ru, andre15@inbox.ru

*The influence of multicycle fatigue actions and thermal exposition, previously hardened in the rate of the air shot-blasting, on such characteristics of cylindrical samples made from alloys V95 and D16T as roughness and microhardness was researched. In fact, surface plastic hardening significantly affects the growth of microhardness in comparison with samples unhardened. Microhardness decreases to values corresponding to sample unhardened after thermal exposition. Surface hardening increases the roughness layer and further thermal exposition and fatigue tests have no effect on these parameters. Results of experimental measurements are presented in tables and graphs.*

**Key words:** *cylindrical samples, alloys V95 and D16T, hardening, multicycle fatigue actions, thermal exposition, microhardness, roughness.*

Original article submitted 04/IX/2010;  
revision submitted 20/IX/2010.

---

*Vladimir P. Radchenko* (Dr. Sci. (Phys. & Math.)), Head of Dept., Dept. of Applied Mathematics & Computer Science. *Andrey P. Morozov*, Student, Dept. of Applied Mathematics & Computer Science.