

ВЛИЯНИЕ МНОГОЦИКЛОВЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ

В.П. Радченко¹, А.М. Морозов¹, А.С. Букатый²

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

² Самарский государственный аэрокосмический университет,
443086, Самара, Московское шоссе, 34

Изучено влияние многоцикловых усталостных испытаний плоских образцов из сплава ЭИ698ВД, предварительно упрочненных в режиме пневмодробеструйной обработки, на характеристики шероховатости и микротвердости поверхностного слоя. Установлено, что микротвердость коррелирует с величиной сжимающих остаточных напряжений на упрочненной поверхности, а шероховатость не зависит от режимов и характера усталостных испытаний.

Ключевые слова: *плоские образцы, упрочнение, усталостные испытания, остаточные напряжения, микротвердость, шероховатость*

Введение. Взаимное влияние параметров качества поверхностного слоя и характеристик усталости жаропрочных сталей и сплавов при высокочастотном нагружении - хорошо известный факт [1-3]. Одним из способов повышения работоспособности деталей является поверхностное пластическое деформирование, при этом качество поверхностного слоя характеризуется шероховатостью поверхности, её микротвердостью, степенью и глубиной деформационного упрочнения, величиной и знаком остаточных напряжений, а также многими физическими параметрами, связанными с искажением кристаллической решётки, плотностью дислокаций и другими.

В работе [4] изучено влияние режимов пневмодробеструйной обработки на остаточные напряжения и предел выносливости плоских образцов из сплава ЭИ698 ВД. Для этого было изготовлено 30 образцов для определения остаточных напряжений и 36 образцов для испытаний на усталость. Упрочнение образцов осуществлялось на двух установках - гидродробеструйной установке VB-130 Wet и пневмодробеструйной установке Vapor Blast RSPA-2. Режимы упрочнения приведены в табл. 1. На каждом режиме было упрочнено по 4 образца для определения остаточных напряжений и по три образца для сравнительных испытаний на усталость.

В настоящей работе поставлена задача оценки влияния многоцикловых усталостных испытаний на характеристики шероховатости и микротвердости упрочненного слоя указанных выше плоских образцов.

Методика проведения эксперимента. Исследованию подвергались образцы типа I и II из жаропрочного никелевого сплава ЭИ698 ВД, внешний вид которых с указанием размеров представлен на рис. 1 и 2 соответственно.

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

Морозов Андрей Павлович - студент.

Букатый А.С. - аспирант.

Образцы типа I Неупрочненная сторона образца (рис. 1, б) исследовалась после шлифования. Упрочненная сторона образца (рис. 1, а) подвергалась следующей обработке (все режимы упрочнения представлены в табл. 2):

- участок 1 - зона травления; глубина стравленного слоя после электрополирования указана в табл. 2 и составляет 125-228 мкм;

- участки 2, 3 не подвергались электрополировке; на них происходило упрочнение образца за счет дробеструйной обработки стеклянными шариками или стальной дробью; тип дробы с указанием размера также представлен в табл. 2; участок 2 в последующем полировался.

Таблица!

Параметры режимов упрочнения опытных образцов

Тип и диаметр микрошариков dm	№ режима упрочнения	Давление энергоносителя P , МПа	Средние величины характеристик	
			Толщина упрочненного слоя δ , мм	Предел выносливости (σ_L , МПа)
Неупрочненные образцы				332,89
Стекланные 0 250 мкм	1	0,2	0,103	395,18
	2	0,3	0,122	395,37
	3	0,4	0,137	411,46
Стальные 0 315 мкм	4	0,15	0,147	545,38
	5	0,3	0,173	562,59
	6	0,45	0,210	630,20
	7	0,6	0,232	574,80

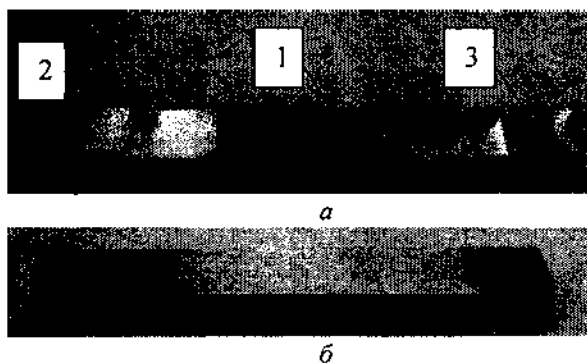


Рис. 1. Внешний вид исследуемых образцов типа I с упрочненной (а) и неупрочненной (б) сторонами: длина образца - 60 мм; ширина - 8 мм; высота - 3 мм

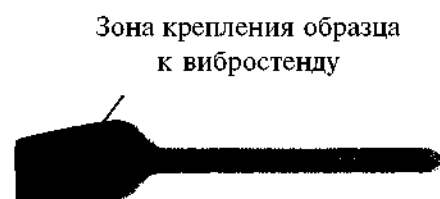


Рис. 2. Внешний вид исследуемых образцов типа II: длина образца - 103 мм; ширина - от 5 до 20 мм; высота - 3 мм

Образцы типа II Поверхность образцов данного типа полностью упрочнена. Режимы упрочнения образцов типа I и II совпадают. В дальнейшем образцы подвергались испытанию на усталость.

На исследуемых образцах проводилось измерение микротвердости по Кнуппу, которое осуществлялось на микротвердомере ММ6 фирмы «Leitz». В испытываемый образец вдавливался индентор в виде алмазной пирамидки с соотношением продольной и поперечной диагоналей 1:7.

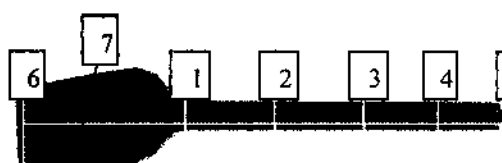
На образцах типа I замеры проводились по длине на неупрочненной стороне с шагом 3 мм, а также в зонах: 1 - с шагом 2,2 мм, 2 - с шагом 0,35 мм, 3 - с шагом 0,3 мм (см. рис. 1, а). Полученные значения представлены в табл. 3.

Схема измерений микротвердости на образцах типа II представлена на рис. 3. На участках 1-5 шаг измерения составлял 0,7 мм; на участке 6 - 1,4 мм; на участке 7 - 2 мм.

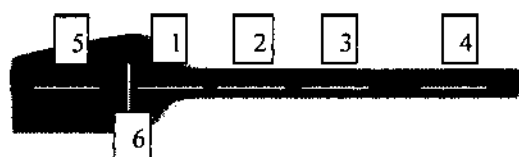
Следующим направлением в работе являлось измерение шероховатости, проведенное на приборе «Surftest SJ-201P». На образцах типа I были исследованы 3 участка:

- неупрочненная сторона (рис. 1, б); измерение шероховатости проводилось вдоль образца, длина замера составляла 12,5 мм;
- упрочненная сторона, зона 1; в данной области по длине образца проводилось 2 измерения с шагом 12,5 мм;
- упрочненная сторона, зона 3; измерение шероховатости осуществлялось поперек участка, длина замера составляла 4 мм.

Схема измерений шероховатости на образцах типа II представлена на рис. 4. На каждой лопатке произведено по 6 замеров с каждой стороны. Длина всех замеров составляла 12,5 мм.



Р и с. 3. Схема измерений микротвердости на образцах типа II: 1-6 - замеры поперек образца, 7 - замер вдоль



Р и с. 4. Схема измерений шероховатости на образцах типа II: 1-5 - замеры вдоль образца, 6 - замер поперек

Таблица 2

Исходные характеристики образцов

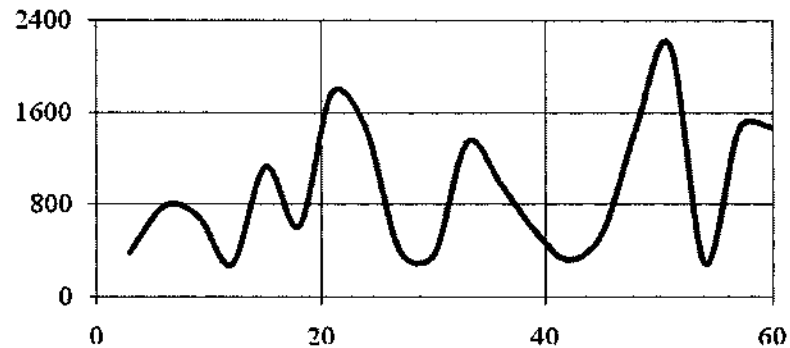
№ ре- жима	Тип дроби	Давле- ние возд. Л МПа	образ- ца. Тип I	Глубина страв- ленного слоя для образца типа I, мкм	№ об- разца. Тип II	Число циклов до разруше- ния для об- разца типа II
1	Стекланные ша- рики 250 по DMR 71 - 110,212- 300 мкм	0,2	17	127,16	44	6,80E+05
2		0,3	48	125,186	10	8,80E+05
3		0,4	55	150,566	38	1,97E+06
4	Стальная дробь 315 стандартная (S110) по DMR71 - ПО, 180-500	0,15	50	166,48	11	2,00E+06
5		0,3	43	179,114	16	5,40E+05
6		0,45	53	228,98	15	1,46E+06
7		0,6	27	225,85		
8	Без упрочнения		59	130,069		

Исследование шероховатости проводилось по следующим параметрам: R_z - вы- сота неровностей профиля по десяти точкам; R_q - среднее квадратичное отклонение профиля.

Табл. 2 содержит основную информацию по исходным характеристикам образцов типа I и II.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Данные по измерению микротвердости в анализируемых образцах типа I, II и характерное распределение НК представлены в табл. 3 и на рис. 5-7.

Выявлено, что микротвердость в неупрочненной зоне образцов типа I (рис. 1, б) имеет ярко выраженный неоднородный характер. Разброс значений микротвердости составляет примерно 2700 единиц (от 400 НК до 3100 НК). Это обусловлено тем, что поверхность после шлифовки имеет полосчатое строение с характерными зонами впадин и выступов. Ширина этих зон составляет примерно 25-40 мкм. Отпечатки пирамидок при вдавливании имеют достаточно прерывистый характер, и их величина изменяется от 18 до 48 мкм в зависимости от того, в какую зону попадает отпечаток. В качестве иллюстрации на рис. 5 показан график изменения микротвердости в зоне шлифовки на образце №43.



Р и с. 5. Характерное изменение микротвердости на неупрочненной стороне образца типа I

Следует обратить внимание на образец №59 (тип I), не подвергнутый упрочнению. В зонах 2 и 3 наблюдается такой же выброс значений микротвердости, как и на шлифованной поверхности, хотя травленный участок 1 характеризуется достаточно однородной структурой (табл. 3, режим 8).

На образцах типа I при травлении поверхностного слоя глубиной до 150-170 мкм происходит явное выравнивание структуры. Выступы и впадины исчезают, значение микротвердости на всех образцах практически не изменяется и составляет 500-600 НК. На рис. 6 представлен типичный характер распределения микротвердости в зоне 1 образцов типа I (образец №17).

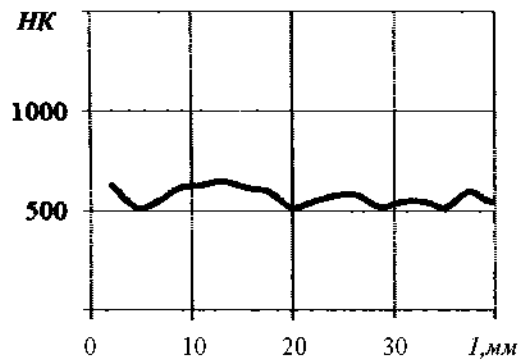
При сопоставлении данных по измерению микротвердости при обработке для режимов 1-3 и 4-7 выявлено, что наибольший прирост микротвердости на образцах типа I наблюдается при упрочнении стеклянными шариками, где среднее значение НК составляет 1200-1500 единиц. При обработке стальной дробью микротвердость возрастает до 800-900 НК.

Анализ измерений микротвердости в образцах типа II также указывает на более эффективный режим при обработке стеклянными шариками, что проявляется в поперечных замерах (участки 1-6) и особенно наглядно - на участке 7 (рис. 7).

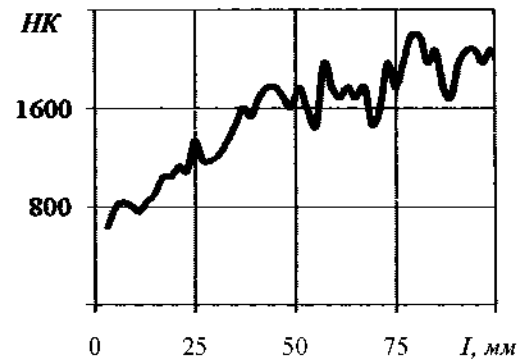
Проведенный анализ значений микротвердости поперек образца (участки 1-6) показал стабильное значение микротвердости (500-600 НК) на замере №6. Наибольшее значение микротвердости наблюдается на участках 4, 5.

Данные по измерению микротвердости в образцах типа I, II

№ режима	№ образца	Микротвердость на образцах типа I, НК				Микротвердость на образцах типа II на соответствующих участках, НК						
		Неупр. сторона	Зона 1	Зона 2	Зона 3	1	2	3	4	5	6	7
1	17 (тип I) 44 (тип II)	490- 2300	500- 550	980- 1200	800- 1200	950- 1050	1000- 1050	1200- 2200	1400- 2500	1400- 2200	550- 560	500- 2500
2	· 10 (тип II)					1000- 1050	1000- 1050	1000- 1050	1000- 1050	1400- 1500	550- 560	500- 2000
3	55 (тип I) 38 (тип II)	450- 800	450- 600	800- 1500	500- 1000	1500- 1600	1600- 2000	1400- 1500	1400- 1500	1500- 2000	550- 560	500- 2200
4	· 11 (тип II)					900- 1000	500- 600	950- 1050	1100- 1150	1100- 1200	500- 700	980- 1500
5	43 (тип I) 16 (тип II)	450- 2100	480- 580	600 1000	980- 1400	1000- 1100	600- 900	1000- 1500	1000- 1100	1050- 1100	500- 600	500- 1000
6	· 15 (тип II)					850- 900	950- 1050	600- 1000	500- 1000	1000- 1500	500- 700	550- 2000
7	27 (тип I)	2100- 3100	500- 600	500- 600	800- 900							
8	59 (тип I)	400- 3100	550- 900	600- 1500	500- 5000							



Р и с. 6. Характерное изменение микротвердости в травленной зоне (зона №1) образца типа I



Р и с. 7. Характерное изменение микротвердости по всей длине образца типа II

По всей видимости, это связано с тем, что в наиболее нагруженных зонах 1 и 2 (см. рис. 3) при изгибе в процессе усталостных испытаний, во-первых, произошла релаксация остаточных напряжений в упрочненном слое, а во-вторых, наблюдалось «разрыхление» материала вследствие накопления поврежденное™, что и привело к снижению характеристик микротвердости. На периферийных же участках 4 и 5, в которых напряжения при изгибе в процессе усталостных испытаний незначительны, микротвердость сохраняет достаточно высокое значение.

При сопоставлении значений микротвердости на образцах типа I (без усталостных испытаний) и типа II (на которых проводились испытания на усталость) выявлено, что максимальные значения микротвердости в зонах 2, 3 образцов типа I значительно ниже микротвердости периферийной части образцов типа II.

Результаты следующего этапа - измерения шероховатости - представлены в табл. 4-7. Первоначально анализу подвергались образцы типа I с неупрочненной стороны. Результаты замеров R_z и R_q показаны в табл. 4.

Таблица 4
Результаты измерения шероховатости образцов типа I с неупрочненной стороны

№ режима	№ образца	R_z , мкм	R_q , мкм
1	17	2,06	0,47
2	48	1,56	0,30
3	55	2,47	0,55
4	50	1,50	0,23
5	43	2,28	0,38
6	53	2,56	0,59
7	27	2,32	0,50
8	59	1,86	0,40

Табл. 5 иллюстрирует влияние режима травления на изменение шероховатости (в зоне травления для каждого образца проводилось по два измерения).

Приведенные в табл. 4 и 5, свидетельствуют о росте параметров шероховатости после травления.

Результаты по измерению шероховатости после упрочнения (зона 3, рис. 1, а) показаны в табл. 6.

Из анализа данных таблиц можно сделать вывод, что режимы травления и дробеструйной обработки оказывают примерно одинаковое влияние на рост параметров шероховатости. Вместе с тем при сопоставлении результатов изменения шероховатости при обработке в режимах 1-3 и 4-6 выявлено, что стеклянные шарики изменяют шероховатость в меньшей степени, чем стальная дробь.

В заключение рассматривалось влияние усталостных испытаний на изменение шероховатости. Результаты замеров по участкам, указанным на рис. 4, представлены в табл. 7.

Таблица 5
Результаты измерения шероховатости образцов типа I в зоне травления

№ режима	№ образца	R_z , мкм	R_p , мкм
1	17	5,26 / 6,07	1,06 / 1,14
2	48	5,48 / 5,81	1,03 / 1,09
3	55	4,73 / 4,54	1,03 / 1,04
4	50	5,08 / 4,87	0,96 / 0,95
5	43	4,28 / 5,25	0,95 / 1,05
6	53	5,70 / 5,16	1,11 / 0,95
7	27	6,34 / 6,51	1,11 / 1,31
8	59	4,58 / 5,96	0,83 / 0,94

Таблица 6
Результаты измерения шероховатости образцов типа I в зоне упрочнения

№ режима	№ образца	R_z , мкм	R_p , мкм
1	17	3,80	0,78
2	48	5,42	1,15
3	55	5,84	1,17
4	50	4,28	0,89
5	43	4,22	0,99
6	53	6,92	1,47
7	27	7,27	1,60
8	59	6,01	1,14

Таблица 7
Результаты измерения шероховатости на образцах типа II

№ режима	№ образца	Замер 1		Замер 2		Замер 3		Замер 4		Замер 5		Замер 6	
		R_z , мкм	R_p , мкм	R_z , мкм	R_p , мкм	R_z , мкм	R_p , мкм	R_z , мкм	R_p , мкм	R_z , мкм	R_p , мкм	R_z , мкм	R_p , мкм
1	44	5,07	0,74	5,12	0,79	4,71	0,73	5,84	0,88	5,32	0,75	8,71	1,93
2	10	6,56	0,98	5,93	0,94	5,16	0,97	5,41	0,94	6,96	1,03	6,00	1,00
	39	6,42	1,05	5,70	0,98	5,26	1,04	7,54	1,30	6,98	1,12	6,03	1,04
3	38	6,36	1,06	6,10	1,03	6,73	1,08	7,19	1,28	6,35	1,14	6,10	1,09
	32	7,53	1,33	6,36	1,06	6,04	1,05	6,23	1,06	6,82	1,17	7,01	1,17
4	11	5,48	0,96	7,83	1,52	7,99	1,63	8,27	1,59	6,38	1,32	6,82	1,42
	12	6,74	1,44					7,21	1,45	7,11	1,34	7,84	1,50
5	16	9,84	2,18	8,83	1,79	9,27	1,78	8,36	1,73	8,88	1,99	9,32	1,89
	17	9,20	1,95					9,82	2,00	7,95	1,57	10,7	2,17
6	15	12,4	2,43					11,8	2,49	12,0	2,50	15,7	3,02

Исследования шероховатости, проведенные с обратных сторон образцов, дают примерно такие же значения.

Анализ результатов, представленных в табл. 6 и 7, указывает на незначительное повышение шероховатости после испытаний на усталость. Данные из табл. 7 подтверждают полученные ранее выводы о том, что обработка поверхности стальной дробью значительно влияет на рост шероховатости.

Выводы по работе. Проведенный анализ образцов в исходном состоянии (после шлифовки), травленных образцов, упрочненных образцов и образцов, подверженных испытаниям на усталость, позволяет сформулировать нижеследующие выводы.

1. Образцы в исходном состоянии имеют полосчатую структуру с выступами и впадинами, ширина которых составляет 25-40 мкм, и отличаются достаточно неоднородными значениями микротвердости. Разброс значений в этой зоне составляет 2700 НК. Измерение шероховатости осуществлялось вдоль полос, поэтому ее значения достаточно малы.

2. Травление, проведенное на образцах типа I, приводит к однородности значений микротвердости и росту значений шероховатости.

3. Сопоставление режимов дробеструйной обработки на образцах типа I указывает на то, что обработка стеклянными шариками - более выгодный режим с точки зрения повышения микротвердости и незначительного увеличения шероховатости.

4. Испытания на усталость, проведенные на образцах типа II, оказывают существенное влияние на рост микротвердости в периферийной зоне.

5. Усталостные испытания не оказывают существенного влияния на шероховатость поверхности.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию (проект РНП 2.1.1 / 3397, государственный контракт №П818/

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. Кирпичев В.А., Букатый А.С. Влияние режимов пневмодробеструйной обработки на остаточные напряжения, микротвердость и сопротивление усталости // Физика прочности и пластичности материалов: Труды XVII Междунар. конф. - Самара: СамГТУ, 2009. - Т. 1. - С. 109-111.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2009 г.

UDC 621.787:539.319

INFLUENCE OF HIGH-CYCLE FATIGUE ACTIONS ON PHYSICAL-MECHANICAL STATE OF THE PLANE SAMPLES HARDENED CASE

V.P. Radchenko \ A.P. Morozov \ A.S. Bukatiy²

¹ Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskay str., Samara, 443100

² Samara State Aerospace University,
244, Moskovskoe sh. str., Samara, 443086

The influence on the characteristics roughness and microhardness of high-cycle fatigue actions of the plane samples from the alloy El698 VD, previously hardened in the rate of the air shot blasting, was researched. It became clear, that microhardness correlates with the value of the compressing remaining tensions at hardened case, but roughness doesn't depend on rates and character of fatigue actions.

Key words: plane samples, hardening, fatigue actions, remaining tensions, microhardness, roughness