

УДК 621.787.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ ППД НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ

© 2012 А. Н. Волков, М. Б. Сазонов, И. А. Чигринёв

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

Рассматриваются вопросы влияния различных методов упрочняющей и отделочной обработки на состояние поверхностного слоя – шероховатость, остаточные напряжения, тонкую структуру и внутреннюю потенциальную энергию поверхностного слоя, на сопротивление усталости образцов из титанового слоя. Показана функциональная связь между этими параметрами и пределом выносливости образцов.

Упрочнение, деформация, шероховатость, остаточные напряжения, структура, поверхностный слой, дефекты.

Усталостное разрушение, как правило, начинается с поверхности. Поэтому сопротивление усталости весьма значительно зависит от состояния поверхностного слоя - шероховатости, структуры материала, поверхностных дефектов и остаточных напряжений (ОН). Эти факторы непосредственно связаны с видом финишной обработки деталей, обуславливающей характер и степень деформации, изменение структуры и энергетического уровня материала.

При обработке деталей поверхностно-пластическим деформированием (ППД) деформация верхних слоёв протекает неравномерно. Она начинается в зёрнах в виде скольжений по кристаллографическим плоскостям с наиболее плотной упаковкой атомов и совпадающих с направлением максимальных касательных напряжений. По мере наращивания силы деформацией охватываются и другие зерна. В процессе скольжений происходит движение дислокаций и вакансий и лавинообразный рост их числа. Взаимодействие дислокаций между собой, пересечение их линий движения, встреча с другими несовершенствами кристаллической решётки, скопления у препятствий (границы зёрен, блоков, включений) приводит к увеличению сопротивления их движения, то есть к упрочнению материала. При этом тонкая кристаллическая структура претерпевает существенные изменения. Происходит дробление блоков, увеличение микроискажений решётки, возрастает внутренняя потенциальная энергия, усиливаются внутри - и межкристаллитные напряжения. В результате изменяются пластические свойства материала, условия для зарождения и распростране-

ния усталостных трещин.

При росте давления в зоне контакта, степени деформации, плотности дислокаций и вакансий до определённого предела происходит исчерпание пластических свойств материала (перенаклёп), приводящее к разрывлению металла, снижению его прочности и выносливости.

Установление связи между структурно-энергетическим состоянием материала и сопротивлением усталости позволяет оптимизировать процесс упрочняющей обработки, обеспечить контроль технологического процесса обработки и его надёжность, повысить эксплуатационные характеристики деталей и изделий.

Исследования изменения параметров тонкой структуры в связи с остаточными напряжениями и сопротивлением усталости проводились на специальных тонкостенных образцах с сечением 12x1 мм. Образцы изготавливались из титанового сплава ВТ9, широко используемого для изготовления лопаток компрессора ГТД. Финишные операции при изготовлении образцов после полирования проводились различными способами ППД и отделки: обработка микрошариками диаметром 0,16...0,3 мм (ОМШ) на различных режимах - отдельно и в сочетании с виброшлифованием (ВШ), виброупрочнением (ВУ) или виброконтактным полированием мелкозернистой абразивной лентой (ВКПАЛ); гидродробеструйная обработка (ГДО) шарами диаметром 2...3 мм в сочетании с ВУ.

Параметры тонкой структуры и искажения кристаллической решетки определялись на поверхности с помощью дифракто-

метра Дрон-3. В качестве эталонного образца использовался полированный недеформированный материал, термообработанный по ТУ. Со всех образцов снимались рентгенограммы двух линий - с малым значением суммы квадратов индексов (102) и с большим - (203). Съёмка образцов производилась на $\text{CuK}\alpha$ -излучении.

По расчётному значению площади S (мм^2) под кривой распределения интенсивности и высоте линии h (мм) рентгенограммы определялось экспериментальное уширение дифракционной линии $B = S / h$ (мм), затем рассчитывались физическое истинное уширение линий β , микроискожения кристаллической решетки $\Delta a / a$, блочность D .

Результаты обмера зарегистрированных интерференционных линий на образцах после различных видов упрочняющей отделочной обработки и расчётные данные представлены в табл.1. Здесь же для сопоставления приведены технологические остаточные напряжения у поверхности. Пределы выносливости образцов определялись усталостными испытаниями на электродинамическом стенде при частоте 190 Гц на базе 10^8 циклов. Из табл. 1 видно, что при ОМШ, по сравнению с полированием, происходит значительное уширение интерференционных линий и тем больше, чем выше скорость полёта микрошариков (сила удара и время обработки).

Соответственно возрастают искажение кристаллической решетки от $1,28 \cdot 10^{-3}$ до $1,56 \cdot 10^{-3}$, остаточные напряжения сжатия у поверхности от 100 до 450...550 МПа, уменьшаются размеры блоков от 3,0 до $1,4...2,5 \cdot 10^{-8}$ см. Применение после ОМШ дополнительного ВКПАЛ приводит к съёму очень тонкого, но наиболее сильно упрочнённого слоя. Поэтому в верхнем слое искажения решётки и остаточные напряжения становятся меньше, а размеры блоков несколько возрастают. Применение дополнительной обработки ВШ и, в особенности, ВУ приводит к обратному эффекту - увеличиваются уширения интерференционных линий, искажения решетки, уменьшаются размеры блоков. Остаточные напряжения у поверхности снижаются в связи со смещением максимума на глубину. Это обусловлено дополнительной деформацией и упрочнением по-

верхностного слоя шарами диаметром 2...3 мм, входящими в состав рабочей среды этих процессов. Аналогичные, но ещё большие изменения происходят при ГДО+ВУ - процессах с наибольшим силовым воздействием. При этих видах обработки лопаток компрессора ГТД наблюдается сквозной проклёп кромок и перенаклёп поверхностного слоя. Оптимизация упрочнения до определённого предела позволяет повысить предел выносливости с 340 до 500 МПа. Переупрочнение поверхностного слоя и снижение остаточных напряжений и поверхности при ГДО+ВУ приводит к уменьшению сопротивления усталости. Таким образом, в зоне допустимого увеличения упрочнения происходит уменьшение размеров блоков, увеличение искажений кристаллической решетки и примерно пропорциональное увеличение уровня остаточных макронапряжений сжатия, что объединяет их в оценке степени деформации и упрочнения поверхностного слоя. Повышение внутренней потенциальной энергии в поверхностном слое образцов сопровождается усилением экзоэлектронной эмиссии (ЭЭЭ). Для контроля энергетического состояния использовалась установка, состоящая из вакуумной камеры и комплекса электронной аппаратуры. Количество ЭЭЭ оценивалось средней интенсивностью I экзоэлектронной эмиссии.

В табл. 2 приведены опытные данные о величине интенсивности ЭЭЭ других образцов из сплава ВТ9 после различных видов отделочно-упрочняющей обработки, показана связь I с параметрами качества поверхностного слоя. Номера серий образцов совпадают с табл. 1. Из таблицы видно, что величина интенсивности ЭЭЭ существенно зависит от напряжённо-деформированного состояния и шероховатости поверхностного слоя. При увеличении шероховатости после ОМШ с R_a от 0,2 до 1,1...1,2 мкм (серии 1,2,3,4,5,9) интенсивность ЭЭЭ снижается с 720 до 410...680 имп/с, что связано с большим рассеиванием эмиссии электронов. Наблюдаемый разброс данных можно объяснить значительным влиянием и разным уровнем деформации упрочнения и остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, которые повышают общий уровень внутренней энергии и соответственно увеличивают экзоэмиссию.

Таблица 1. Параметры рентгенограмм, измеренные и физические уширения образцов из сплава ВТ9, обработанных различными способами

№ серии	Вид обработки	Анализируемые линии	S , мм ²	h , мм	B , мм	$\Delta a/a \cdot 10^{-3}$	$D10^{-8}$, см	$\sigma_{ост}$, МПа	σ_{-1} , МПа
	Исходное состояние поверхностного слоя	102 203	6070 5400	131 100	46,33 54,00	1,25	2,1		
1	Полирование	102 203	8080 3290	128 42	63,12 78,33	1,28	3,0	-100	370
2	ОМШ($v=38$ м/с, $t=3$ мин)	102 203	5280 5610	72 64	73,33 87,65	1,54	2,5	-450	
3	ОМШ($v=46$ м/с, $t=3$ мин)	102 203	5810 4090	81 42	71,73 97,38	1,54	2,49	-530	360
4	ОМШ($v=46$ м/с, $t=6$ мин)	102 203	4005 4440	52 38	77,02 116,84	1,56	2,48	-450	
5	ОМШ + ВК ПАЛ	102 203	9220 6610	129 68	71,47 97,21	1,52	2,52	-300	430
6	ОМШ + ВШ	102 203	6370 3620	75 49	84,93 73,88	1,58	1,8	-340	400
7	ОМШ + ВУ	102 203	5200 3280	54 32	96,30 102,5	1,7	1,4	-550	500
8	ГД О+ ВУ	102 203	6670 2350	84 24	79,40 97,92	1,75	1,3	-300	340

Таблица 2. Зависимость интенсивности экзоэлектронной эмиссии (ЭЭЭ) от параметров качества поверхностного слоя и предела выносливости образцов из сплава ВТ9

№ серии	Вид обработки	Параметры качества поверхностного слоя			Предел выносливости σ_{-1} , МПа
		$\sigma_{ост}$, МПа	Ra, мкм	I , имп/с	
1	Полирование	-100	0,3	720	370
2	ОМШ ($v=38$ м/с, $\tau=3$ мин)	-480	1,1	410	320
3	ОМШ ($v=46$ м/с, $\tau=3$ мин)	-510	1,2	680	380
4	ОМШ ($v=46$ м/с, $\tau=6$ мин)	-420	1,6	400	340
5	ОМШ+ВКПАЛ	-280	0,2	140	460
6	ОМШ+ВШ	-310	0,50	700	380
7	ОМШ+ВУ	-540	0,9	900	460
8	ГДО+ВУ	-280	0,6	600	360
9	Полирование+ВКПАЛ	+50	0,2	500	340

При примерно одинаковом уровне шероховатости (серии 6, 7, 8) интенсивность экзоэмиссии возрастает с увеличением деформационного упрочнения (остаточных напряжений). Из табл. 2 также видно, что с увеличением интенсивности ЭЭЭ предел выносливости образцов возрастает по линейной зависимости при сравнительно небольшом разбросе данных. Это объясняется тем, что предел выносливости возрастает в большей мере с увеличением степени упроч-

нения поверхностного слоя и ОН и в меньшей мере зависит от шероховатости поверхности. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о функциональной связи между пределом выносливости, параметрами тонкой кристаллической структуры и интенсивностью ЭЭЭ. Эти параметры могут быть критериями оптимизации упрочнения поверхностного слоя, средством контроля степени упрочнения и надёжности технологического процесса финишной обработки.

RESEARCH OF INFLUENCE OF METHODS SPD ON STRUCTURE SURFACE LAYER AND RESISTANCE OF FATIGUE

© 2012 A. N. Volkov, M. B. Sazonov, I. A. Schigrinyev

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

Methods of combining surface-plasto deformation pieces from titanium alloy BT9. Research of quality of surface layer is fulfilled. Functional dependence is determined between hardness limit, fine crystalline structure parameters and intensity of exoelectronic emission.

Hardening, deformation, roughness, residual stresses, structure, surface layer, defects.

Информация об авторах

Волков Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механической обработки материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: механическая обработка материалов.

Сазонов Михаил Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры механической обработки материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: механическая обработка материалов.

Чигринёв Илья Александрович, инженер кафедры механической обработки материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: механическая обработка материалов.

Volkov Alexander Nikolaevich, Candidate in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Materials Machining. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: fdla@ssau.ru. Area of research: machining of materials.

Sazonov Michael Borisovich, Candidate in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Materials Machining. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: fdla@ssau.ru. Area of research: machining of materials.

Schigrinyev Ilya Alexandrovich, engineer of Materials Machining Department. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: fdla@ssau.ru. Area of research: machining of materials.