

УДК 621.787.4

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕ-ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ

© 2012 М. Б. Сазонов, А. Н. Волков, 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 слоев протекает неравномерно. Она начинается в зернах 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 решетки, скопления у препятствий (границы зерен, 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 решетки, возрастает внутренняя потенциальная энергия, усиливаются внутри и междокристаллитные напряжения. В результате изменяются пластические свойства материала, условия для зарождения и распространения усталостных трещин.

При росте давления в зоне контакта, степени деформации, плотности дислокаций и вакансий до определенного предела происходит исчерпание пластических свойств материала (перенаклеп), приводящее к разрыхлению 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 надежность, 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, 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 дифрактометра «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). Съемка образцов производилась на $CuK\alpha$ -излучении.

По расчетному значению площади S (mm^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 упрочняюще-отделочной обработки и расчетные данные представлены в таблице 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 108 циклов. Из таблицы 1 видно, что при ОМШ, по сравнению с полированием, происходит значительное уширение интерференционных линий и тем больше, чем выше скорость полета микрошариков (сила удара и время обработки). Соответственно возрастают - искажение кристаллической решетки от 1,28 -10⁻³ до 1,56 -10⁻³, остаточные напряжения сжатия у поверхности от 100 до 450...550 МПа, уменьшаются размеры блоков от 3,0 до

1,4.. 2,5-10-8 см. Применение после ОМШ дополнительного ВКПАЛ приводит к съему очень тонкого, но наиболее сильно упрочненного слоя. Поэтому в верхнем слое искажения решетки 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 поверхностного слоя шарами диаметром 2...3 мм, входящими в состав рабочей среды этих процессов. Аналогичные, но еще большие изменения происходят при ГДО+ВУ - процессах с наибольшим силовым воздействием. При этих видах обработки лопаток компрессора ГТД наблюдается сквозной проклеп кромок и перенаклеп поверхностного слоя. Оптимизация упрочнения до определенного 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 использовались установка, состоящая из вакуумной камеры и комплекса электронной аппаратуры. Количество ЭЭЭ оценивалось средней интенсивностью I экзоэлектронной эмиссии.

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

№ Серии	Вид обработки	Анализ уемые линии	S, Мм ²	h, мм	B, Мм	$\beta \cdot 10^3$, рад	$\Delta a/a \cdot 10^{-3}$	D 10-8, см	Σ , МПа	σ_{-1} , МПа
1	Исходное состояние поверхности ного слоя	102	6070	131	46,33		1,25	2,1		
		203	5400	100	54,00					
1	Полировка	102	8080	128	63,12	3,5	1,28	3,0	-100	370
		203	3290	42	78,33	11,9				
2	ОМШ(v=38 м/с, t=3мин)	102	5280	72	73,33	5,1	1,54	2,5	-450	
		203	5610	64	87,65	14,79				
3	ОМШ(v=46 м/с, t=3мин)	102	5810	81	71,73	5,4	1,54	2,49	-530	360
		203	4090	42	97,38	15,66				
4	ОМШ(v=46 м/с, t=3мин)	102	40054	52	77,02	5,9	1,56	2,48	-450	
		203	440	38	116,84	17,7				
4	ОМШ(v=46 м/с, t=6мин)	102	9220	129	71,47	5,3	1,52	2,52	-300	430
		203	6610	68	97,21	15,7				
5	ОМШ+ВК ПАЛ	102	6370	75	84,93	6,7	1,58	1,8	-340	400
		203	3620	49	73,88	18,1				
6	ОМШ+ВШ	102	5200	54	96,30	9,0	1,7	1,4	-550	500
		203	3280	32	102,5	23,4				
7	ОМШ+ВУ	102	6670	84	79,40	11,3	1,75		-300	340
		203	2350	24	97,92	36,4				

В табл. 2 приведены опытные данные о величине интенсивности ЭЭЭ других образцов из сплава ВТ9 после различных видов отделочно-упрочняющей обработки, показана связь J с параметрами качества поверхностного слоя. Номера серий образцов совпадают с табл. 1.

Из табл. 2 видно, что величина интенсивности ЭЭЭ существенно зависит от напряженно-деформированного состояния и шероховатости поверхностного слоя. При увеличении шероховатости после ОМШ с Ra 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.

При примерно одинаковом уровне шероховатости (серии 6, 7, 8) интенсивность экзоэмиссии возрастает с увеличением деформационного упрочнения (остаточных напряжений). Из таблицы 2 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 упрочнения 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 надежности технологического процесса финишной обработки.

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

№ сер	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+ВКПА Л	-280	0,2	1400	460
6	ОМШ+ВШ	-310	0,5	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

INFLUENCE OF THE STRENGTHENING-FINISHING TREATMENT ON STRUCTURE-ENERGY STATE OF SURFACE LAYER AND FATIGUE RESISTANCE

© 2012 M. B. Sazonov, A. N. Volkov, 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 VT9. 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

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.

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.

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.

Sazonov Michael Borisovitch, Candidate in Engineering Science, reader. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: fdla@ssau.ru. Area of research: machining of materials.

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

Schiqrinyev Iia Alexandrovitch, enqineer 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.