

УДК 621.793.7

В.А. БОГУСЛАЕВ, В.Г. ЯКОВЛЕВ*ОАО "Мотор Сич", Запорожье, Украина*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ВАЛОВ ГТД

Рассмотрено влияние упрочнения (детонационное напыление + алмазное выглаживание) на сопротивление усталости образцов без концентраторов напряжений и с напрессованными втулками из стали 40ХН2МАШ.

газотурбинный двигатель, усталость вала, детонационное напыление, алмазное выглаживание

Введение

В связи с непрерывным ужесточением условий работы и режимов эксплуатационной нагруженности валов газотурбинных двигателей, возрастанием требований к уменьшению их металлоемкости, исследования по оценке влияния поверхностного деформационного упрочнения являются актуальными.

Несущая способность валов газотурбинных двигателей в значительной мере определяется состоянием их поверхностного слоя, который формируется на финишных этапах технологического процесса.

В работе [1] показан усталостный излом в зоне галтели вала винта газотурбинного двигателя АИ-24, вызванный наличием конструктивных и технологических концентраторов напряжений от следов обработки.

В процессе эксплуатации имеют место случаи разрушения валов и дисков ГТД, связанные с появлением и развитием усталостных трещин в местах концентрации напряжений от следов обработки (рисок, царапин) после таких финишных операций как шлифование и полирование.

Известно, что применение алмазного выглаживания частично повышает сопротивление усталости образцов из стали 40ХН2МАШ.

1. Формулирование проблемы

Для повышения несущей способности валов газотурбинных двигателей применяется алмазное выглаживание, область использования которого остается довольно узкой.

При изготовлении валов из легированных сталей для достижения необходимой точности и шероховатости поверхности применяют операцию шлифования.

При этом шлифование сопровождается образованием поверхностного слоя, часто с большими растягивающими напряжениями, структурными и фазовыми превращениями, снижающими несущую способность материала.

На поверхности после шлифования остаются следы обработки, являющиеся резкими концентраторами напряжений.

В некоторых случаях для улучшения качества поверхности после шлифования применяют полирование.

Полирование не всегда обеспечивающее получение желаемых результатов.

Более целесообразным методом окончательной обработки валов является комплексное упрочнение, которое заключается в алмазном выглаживании после шлифования детонационного покрытия шлифованной поверхности вала.

2. Результаты исследования

Для оценки эффективности комплексного упрочнения высоконагруженных деталей были проведены исследования влияния алмазного выглаживания на качество поверхности и выносливость образцов из стали 40ХН2МАШ.

Исследования проводили на образцах диаметром 10 мм и радиусом переходной поверхности 10 мм из стали ($HV\ 2900\ldots 3200\text{ МПа}$) 40ХН2МАШ и образцах из этого же материала с напрессованными втулками. Алмазное выглаживание выполняли синтетическим алмазом АСПК, заправленным по сфере радиусом 2,5 мм за один рабочий ход. Глубина напыленного слоя составляла 0,1 мм, скорость выглаживания была равна 0,5 м/с, подача – 0,08 мм/об. В качестве СОЖ применяли масло И-20А.

Кромки втулок со стороны внутренней поверхности и торца округляли по радиусу 1 мм. Внутреннюю поверхность втулок шлифовали и полировали до получения параметра шероховатости $Ra = 0,25\ldots 0,40\text{ мкм}$.

Перед напрессовкой втулок на образцы их нагревали до 200 °С.

Подготовка деталей под напыление заключалась в том, что предварительно прошлифованные образцы устанавливались в кассету и обдувались на пескоструйной установке гранулированным до 40 мкм электрокорундом Э14А. Давление воздуха при обдувке 0,25 – 0,3 МПа. Расстояние от обрабатываемой поверхности до сопла порядка 130 – 150 мм.

Проведенные исследования шероховатости поверхности показали, что параметр Ra уменьшается с 1,7 мкм при шлифовании детонационного покрытия до $Ra = 0,8\text{ мкм}$ при выглаживании. Покрытие становится более однородным, что особенно важно при его работе в условиях абразивной эрозии.

Выглаживание деталей с детонационным покрытием даже при незначительной толщине необходимо вести с большей нормальной силой. Это позволяет деформировать поверхностный слой на более значи-

тельную глубину, не опасаясь переупрочнения материала.

Для расчета оптимального усилия выглаживания деталей с различной предшествующей обработкой рекомендуют формулу Л.А. Хворостухина [2], которая хорошо подтверждается практикой.

Рассчитанное по этой формуле усилие выглаживания $P_{y\text{ опт}}$ оказалось равным 300 Н при упрочнении как напыленных, так и шлифованных (исходных) образцов.

На усталость образцы испытывали при изгибе в одной плоскости с частотой резонансных колебаний основного тона 430-440 герц до появления макроизлома.

Для оценки эффективности нанесения детонационных покрытий и деформационного упрочнения можно вполне корректно проводить испытания образцов методом "лестницы" с определением ограниченного предела выносливости и параметров его рассеяния [3].

Определение зависимости между задаваемым напряжением в опасном сечении образцов и амплитудой колебаний пера было проведено расчетным методом с использованием формул теории упругости.

Результаты испытаний на усталость представлены в табл. 1, 2.

Как видно из табл.1, 2 алмазное выглаживание повышает предел выносливости напыленных образцов из стали 40ХН2МАШ с учетом его рассеяния для вероятности разрушения $P = 10\%$ с 476 МПа до 540 МПа (на 13%) и образцов с концентраторами напряжений (напрессованными втулками) с 342 до 431 МПа, также на 13%.

Повышение пределов выносливости упрочненных комплексным методом (детонационное напыление + алмазное выглаживание) образцов из стали 40ХН2МАШ вызвано образованием благоприятного микрорельефа поверхности, увеличение степени наклепа, формированием текстуры и сжимающих остаточных напряжений высокого уровня.

Таблица 1

Параметры выносливости цилиндрических образцов

Параметры выносливости	Шлифование (исходные)	Шлифование + детонационное напыление	Детонационное напыление + выглаживание
$\bar{\sigma}_{-1}$, МПа	498	510	574
$\bar{S}_{\sigma-1}$, МПа	8,7	26,8	26,8
$\bar{\sigma}_{-1}$ ($p = 10\%$), МПа	487	476	540

Таблица 2

Параметры выносливости образцов с напесованными втулками

Параметры выносливости	Шлифование (исходные)	Шлифование + детонационное напыление	Детонационное напыление + выглаживание
$\bar{\sigma}_{-1}$, МПа	382	366	442
$\bar{S}_{\sigma-1}$, МПа	8,7	19,1	8,7
$\bar{\sigma}_{-1}$ ($p=10\%$), МПа	371	342	431

Для оценки характера усталостного разрушения образцов и определения места зарождения трещин на исследуемых образцах был применен микрофрактографический метод исследования.

Изучению подвергались усталостные изломы образцов из стали 40ХН2МАШ, окончательно обработанных детонационным напылением после шлифования и алмазным выглаживанием после детонационного напыления. Напыленный образец был испытан при напряжении $\sigma_i = 560$ МПа и отработал 1524200 циклов, выглаженный $\sigma_i = 710$ МПа и отработал 1605400 циклов, т.е. примерно одинаковое количество.

Исследования усталостных изломов образцов проводили с помощью электронного растрового микроскопа ISM-T300.

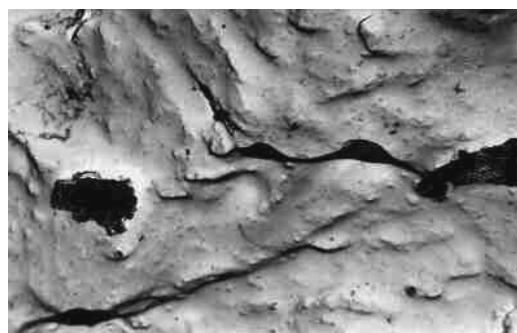
Перед проведением исследований шлифов производили их декорование (850° , 2 ч, вакуум) для получения качественного и контрастного изображения структуры.

Визуальное изучение усталостных изломов образцов показало наличие нескольких зон. Начальная зона усталостного разрушения на выглаженном образце расположена под поверхностью на глубине 0,2 мм, что произошло в результате поверхностного упрочнения.

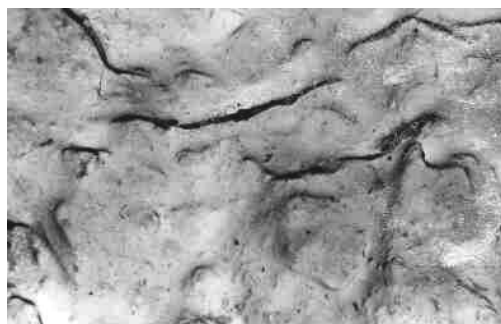
Электронно-фрактографический анализ позволил обнаружить отличие в строении изломов, обусловленное уровнем вязкости разрушения, что вызвано упрочнением поверхности при выглаживании.

На микрофрактограммах (рис. 1 и 2), которые сняты с различных участков усталостной зоны излома видно, что рельеф носит сглаженный характер.

Отчетливо видны следы локальной пластической деформации и глубокие микрополосы. В обоих случаях вблизи долома рельеф становится более грубым. Следы разрушения в виде вытянутых чашек наблюдаются в основном на образце после детонационного напыления.



$l = 0$



$l = 0,1$

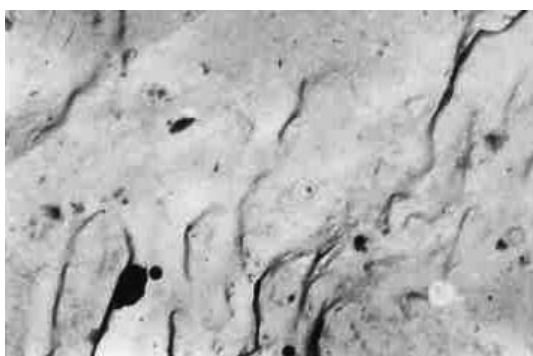


$l = 0,2$

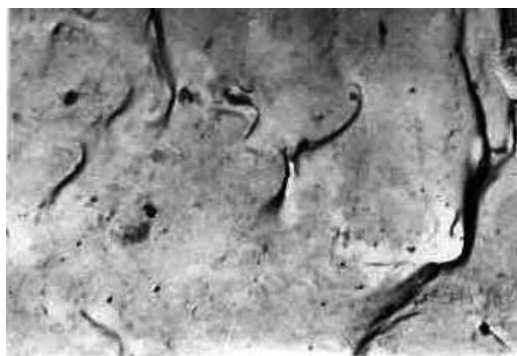


$l = 0,3$

Рис. 1. Микрофрактограмма усталостного излома образца с детонационным напылением – 4000х



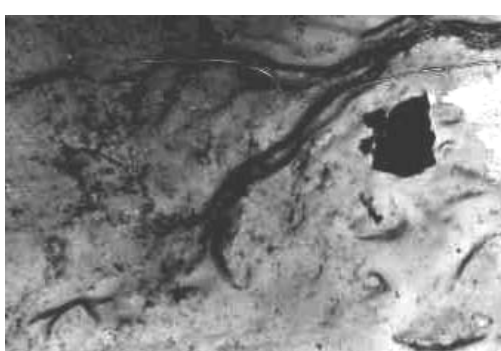
$l = 0$



$l = 0,1$



$l = 0,2$



$l = 0,3$

Рис. 2. Микрофрактограмма усталостного излома образца с напылением и последующим выравниванием – 4000^х

Как видно из рис. 1, микрополосы на напыленном образце расположены перпендикулярно направлению роста трещины.

Ряды микрополос в поверхностном слое выглаженных образцов до глубины 0,2 мм ориентированы по направлению роста трещины. По-видимому, фронт распространения усталостной трещины замедляется в упрочненной области, что вызывает изгиб микрополос.

С увеличением расстояния от поверхности излома более 0,3 мм различие в направлении микрополос исчезает.

Следовательно, электронно-микроскопический анализ усталостных изломов образцов подтвердил, что упрочнение замедляет распространение усталостной трещины, которая зарождается под поверхностью в зоне перехода сжимающих остаточных напряжений в растягивающие.

Электронно-фрактографический анализ позволил обнаружить отличие в строении изломов, обусловленное уровнем вязкости разрушения, что вызвано упрочнением поверхности при выглаживании.

На микрофрактограммах отчетливо видны следы локальной пластической деформации и глубокие микрополосы. В обоих случаях вблизи долома рельеф становится более грубым. Следы разрушения в виде вытянутых чашек наблюдаются в основном на образце после детонационного напыления. Как видно из рис. 1 микрополосы на напыленном образце расположены перпендикулярно направлению роста трещин.

Ряды микрополос в поверхностном слое выглаженных образцов до глубины 0,2 мм ориентированы по направлению роста трещин. По-видимому, фронт распространения усталостной трещины замедляется в упрочненной области.

Это вызывает изгиб микрополос. С увеличением расстояния от поверхности излома более 0,3 мм различие в направлении микрополос исчезает.

Выводы

Установлено, что комплексное упрочнение повышает предел выносливости образцов без концентраторов напряжений и с напрессованными втулками на 13% по сравнению со шлифованными образцами (без покрытия).

Электронно-микроскопический анализ усталостных изломов образцов подтвердил, что упрочнение замедляет распространение усталостной трещины, которая зарождается под поверхностью в зоне перехода сжимающих остаточных напряжений в растягивающие.

Литература

1. Яценко В.К., Зайцев Г.З., Притченко В.Ф. и др. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием. — М.: Машиностроение, 1985 — 232 с.
2. Хворостухин Л.А., Плешивцев Н.В., Бибаев В.Н. Отделочно-упрочняющая обработка алмазным выглаживанием // Вестник машиностроения. — 1969. — № 8. — С. 48 — 50.
3. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: Справочник. — М.: Металлургия, 1978. — 304 с.

Поступила в редакцию 8.06. 2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.