

УДК 621.785.53

О.Л. ЛУКЬЯНЕНКО¹, Г.В. ПУХАЛЬСКАЯ², Л.П. СТЕПАНОВА²,
С.В. ЛОСКУТОВ²

¹ОАО «Мотор Сич», Украина²Запорожский национальный технический университет, Украина

ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ИЗ СПЛАВА VT8M

В статье рассмотрено влияние комплексного упрочнения лопаток I-й ступ. компрессора из титанового сплава VT8M на формирование текстуры, остаточных напряжений и сопротивление усталости.

Компрессор, сплав VT8M, лопатка, остаточное напряжение, сопротивление усталости

Введение

Одними из высоконагруженных деталей в значительной мере определяющих ресурс вертолетного двигателя ТВЗ-117, являются лопатки I-й ступ. компрессора из титанового сплава VT8M. Анализ отказов компрессоров показывает, что в основном это происходит из-за эрозионных повреждений лопаток и разрушений входных кромок при соударении с инородными телами.

Поэтому повышение несущей способности (параметров выносливости и сопротивления воздействию эрозии) лопаток компрессора, работающих при воздействии знакопеременных нагрузок и центробежных сил, является актуальной задачей, решаемой комплексной обработкой на финишных операциях технологического процесса.

Решение такой задачи базируется на определении закономерностей формирования характеристик поверхностного слоя и параметров выносливости серийных лопаток после нанесения диффузионного покрытия с последующим поверхностным деформационным упрочнением.

При жестких условиях эксплуатации по причине снижения параметров выносливости из-за значительного количества и размеров эрозионных повреждений неоднократно имел место сьем двигателя.

В работе [1] показано, что лопатки компрессора в процессе эксплуатации подвергаются воздействию песка, пыли и др. частиц, что приводит к появлению эрозионных повреждений на поверхности пера в виде питтинга и срезания входной и выходной кромок, снижающих сопротивление усталости.

Следует отметить, что эрозионные повреждения создают не только концентраторы напряжений, но и приводят к значительному изменению геометрических параметров лопаток, что ухудшает их эксплуатационные характеристики.

При работе двигателя, как отмечено в работе [2] наибольшие растягивающие напряжения в лопатках первых ступеней компрессора вызывают центробежные силы. Лопатки из титановых сплавов очень чувствительны к концентраторам напряжений в виде надрезов (царапин), резко снижающих сопротивление усталости. Следовательно, для этих лопаток упрочняющая обработка, сопровождающая формированием текстуры и остаточных сжимающих напряжений, более эффективна.

Формирование характеристик поверхностного слоя лопаток компрессора из титановых сплавов при различных отделочно-упрочняющих методах обработки происходит в результате взаимосвязанных явлений, происходящих в очаге деформирования и в прилегающих к нему зонах: многократных упруго-

пластических деформаций, приводящих к изменению пластических свойств металла, фазового состава и микроструктуры.

Барьерный эффект упрочненного приповерхностного слоя глубиной порядка размера зерна связан с затруднительностью выхода дислокаций и эстафетной передачей деформаций из внутренних объемов металла. Дислокации также задерживаются границами упрочненных зерен приповерхностного слоя. Большое значение имеет соотношение деформированного слоя и внутреннего объема металла, поскольку это связано с формированием остаточного напряженного состояния.

1. Формулирование проблемы

Одна из важнейших проблем для ГТД – это защита лопаток I-й ступени компрессора от эрозионных повреждений, резко снижающих сопротивление усталости.

Для увеличения стойкости лопаток к эрозии в настоящее время на некоторых двигателях (ТВЗ-117ВМА-СБМ1) применяется покрытие нитрид титана (TiN), которое наносится вакуумным ионно-плазменным методом толщиной 2 ... 4 мкм.

Целью работы является обеспечение несущей способности лопаток компрессора из титановых сплавов формированием рационального сочетания характеристик поверхностного слоя путем нанесения плазменного покрытия и поверхностным пластическим деформированием, обеспечивающих высокие показатели выносливости и износостойкости.

2. Результаты исследования

Для оценки эффективности комплексного упрочнения пера лопаток из сплава ВТ8М были проведены исследования выносливости, текстуры и остаточных напряжений.

Для повышения эрозионной стойкости лопаток I-й ступ. компрессора из сплава ВТ8М применяли покрытие TiN методом КИБ.

Были проведены исследования по эффективности применения комплексной обработки лопаток – напыление нитридом титана TiN + ультразвуковое упрочнение шариками (УЗУ). Ультразвуковое упрочнение шариками лопаток выполняли в течение 10 мин по серийной технологии после виброполирования (ВП). Оценка эффективности комплексной обработки проводили по результатам испытаний на усталость лопаток после наработки (Н. 833 ч) ускоренным методом «лестницы» на базе $2 \cdot 10^7$ циклов.

Испытания на усталость лопаток проводили на электродинамическом вибростенде ВЭДС-200 при симметричном цикле нагружения, окружающей температуре и частоте собственных колебаний по первой изгибной форме $f = 600 \dots 630$ Гц. Величину задаваемого напряжения определяли при помощи тензодатчика, наклеенного на спинке лопатки в месте действия максимальных вибронапряжений. Испытания лопаток прекращали при падении частоты собственных колебаний на 3...5%, что соответствовало появлению микротрещины длиной 1...2 мм. Расчет среднего значения предела выносливости для вероятности разрушения 50 % производили по разрушенным лопаткам (σ_{-1}^P).

Результаты статистической обработки результатов испытаний представлены в табл. 1.

Одним из важных параметров выносливости, характеризующих уровень долговечности при напряжениях выше предела выносливости, является коэффициент живучести [3]. Живучесть характеризуется относительным количеством циклов до разрушения. По результатам испытаний лопаток на усталость был рассчитан коэффициент живучести K_i по следующей формуле:

$$K_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot N_i}{n \cdot N_{\sigma} \sigma_{-1}^P},$$

где σ_i , N_i – напряжение и число циклов до разрушения лопаток при испытании на усталость; n – число лопаток, испытанных при уровнях напряжений, пре-

вышающих рассчитанное значение предела выносливости σ_{-1}^P ; N_0 – базовое число циклов при испытании лопаток на усталость ($2 \cdot 10^7$ цикл); σ_{-1}^P – предел выносливости лопаток, МПа.

Таблица 1

Параметры выносливости лопаток

Параметры выносливости, МПа	ВП	ВП + КИБ	ВП + КИБ + УЗУ
$\bar{\sigma}_{-1}$	518	590	614
$\bar{S}_{\sigma-1}$	8,7	26,8	35
$\sigma_{-1}(p=10\%)$	507	556	575

Одной из наиболее эффективных характеристик поверхностного слоя лопаток компрессора являются остаточные сжимающие напряжения, уменьшающие уровень динамических напряжений от изгибно-крутильных колебаний и статических напряжений от действия центробежных сил, что уменьшает вероятность зарождения усталостных трещин, в том числе и при наличии эксплуатационных повреждений на кромках пера лопаток. Поэтому появляется возможность управлять несущей способностью лопаток с целью получения максимально возможной долговечности за счет регулирования параметров остаточных напряжений отделочно-упрочняющими методами.

Для оценки влияния комплексной обработки на формирование напряженного состояния поверхностного слоя пера лопаток I-й ступ. компрессора из сплавов ВТ8М были определены остаточные напря-

жения рентгеноструктурным методом на дифрактометре ДРОН-3М.

Для исследований применяли излучение $\text{Co}\beta$ при размере рентгеновского пучка 1×10 мм [4]. Измерения напряжений выполняли на входной кромке и в средней части лопаток со стороны спинки. Использовали несколько (3...5) углов ψ и три съемки с одного и того же места лопатки при каждом из этих углов. Площадь облучаемого участка на поверхности образца составляла 1...10 мм.

Величину микронапряжений II-го рода (остаточные микродеформации, отн. ед.) оценивали по уширению дифракционных пиков. Измерения выполнялись на кобальтовой трубке (КВ-линия) при ускоряющем напряжении 30кВ и токе 30мА. Осуществляли трёхкратное сканирование поверхности с шагом 0,1 град и постоянной времени 7с.

В качестве рабочих линий выбраны линии (220) и (330). Ширина линий исходного образца (без микронапряжений) определена на образце после вакуумного отжига при температуре 900°C и выдержке в печи 4,5 ч.

Качественный анализ уровня микронапряжений второго рода проводили по величине размера дифракционных линий. Увеличение размера находили путем вычисления интегральной ширины линии по кривой распределения ее интенсивности, которая представляет собой отношение интегральной интенсивности дифракционного профиля к высоте ее максимума.

Результаты исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения остаточных напряжений у поверхности лопаток

Способ обработки	Остаточные напряжения σ , МПа		Остаточные микродеформации, отн. ед	
	Спинка	Входная кромка	Спинка	Входная кромка
ВП	–301	–348	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
ВП + КИБ + УЗУ(10)	–545	–615	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$

Как видно из табл. 2 после комплексной обработки уровень остаточных сжимающих напряжений

I-го рода увеличивается практически в два раза по сравнению с виброполированием.

Большой интерес представляет вопрос взаимосвязи характеристик покрытия с изменениями в структуре поверхностного слоя лопаток. Исследовали структурные изменения, фазовый состав, формирование текстуры α -фазы, а также самого покрытия TiN с помощью рентгеноструктурного анализа в медном излучении с монохроматизацией дифракционного излучения.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью компьютера, сопряженного с дифрактометром ДРОН-1.

Характер текстуры α -фазы оценивали с использованием дифракционных линий 004 и 110 по методике, разработанной в работе [5]. Соотношение интенсивности выбранных линий обозначено параметром $\varepsilon = I_{004}/I_{110}$. Дифракционное отражение 4-го порядка 004 получено при дифракции рентгеновских лучей от плоскостей базисного типа (0001), плоскости $(11\bar{2}0)$, характеризующей наличие призматической компоненты в текстуре α -фазы. Характер изменения параметра ε давал возможность качественно охарактеризовать кристаллографическую ориентацию зерен α -фазы, возникающую в процессе различных обработок. Такая информация носит сравнительный качественный характер и не может претендовать на количественную оценку текстуры, так как на интенсивность дифракционных линий, кроме текстуры, влияют также другие факторы интенсивности для различных дифракционных максимумов. Надежность такой оценки подтверждается низким значением параметра ε , равного 0,42 для порошкового нетекстурованного материала лопатки.

Оценивали также влияние ориентации зерен α -фазы на формирование текстуры нитридного покрытия TiN. Наличие преимущественного роста кристаллитов TiN выявлено с использованием параметра $p = I_{111}/I_{200}$, в числителе которого I_{111} – интенсивность линии 111, а в знаменателе – I_{200} – интенсивность линии 200. О формировании существенной текстуры покрытия можно было судить по значительному превышению параметра p для всех

образцов по сравнению с таким же параметром для нетекстурованного образца нитрида титана полученного измельчением слоя покрытия в порошок.

Проведено сравнительное изучение структуры поверхностного слоя лопаток после виброполирования (ВП), а также ультразвуковой обработкой шариками с предварительным нанесением покрытия TiN.

Как показал анализ (табл. 3) при обработке шариками деформация в поверхностном слое способствовала увеличению зерен α -фазы ориентированных относительно поверхности лопатки базисной плоскостью (0001). После УЗУ параметр ε для спинки составлял 2,0, в тоже время после виброполирования без обработки УЗУ ε равняется 1,09. Кромка в процессе изготовления лопатки подвергалась значительно большей деформации по сравнению со спинкой и при обработке УЗУ наклепывается значительно меньше.

Таблица 3

Параметры ε и p , характеризующие текстурованность поверхностного слоя лопаток

Способ обработки	$\varepsilon = I_{004}/I_{110}$		$p = I_{111}/I_{200}$	
	Спинка	Входная кромка	Спинка	Входная кромка
ВП	1,09	1,38	6,2	3,2
ВП + КИБ + УЗУ(10)	2,00	1,80	14,6	13,2

Анализ текстуры покрытия показал существенное совпадение характера изменения значений параметра p для покрытия (табл. 3) и параметра ε для α -фазы.

Полученные результаты можно объяснить, учитывая следующие соображения. Известно [6], что в зависимости от типа кристаллической решетки преимущественную скорость роста имеют плоскости с наибольшей ретикулярной плоскостью и наибольшим межплоскостным расстоянием, какой и является плоскость (111) для ГЦК решетки нитрида титана. Величина параметра p , полученного для нетекстурованного нитридного покрытия, снятого с поверхности лопатки и измельченного в порошок, равна 0,55.

Существенное превышение значений параметра p для упрочненной лопатки свидетельствует о преимущественной ориентации зерен нитридного покрытия, когда параллельно поверхности лопатки в покрытии зерна ориентированы плоскостями (111), что должно благоприятно влиять на износостойкость, так как плоскость (111) является наиболее плотноупакованной.

В работе [7] сообщается, что наилучшими эксплуатационными характеристиками обладают износостойкие покрытия TiN, ориентированные плоскостью (111) на быстрорежущем инструменте.

Возникновение преимущественной текстуры нитридного покрытия будет определяться наиболее благоприятным ориентационным сопряжением кристаллических решеток подложки и покрытия [8]. Близкие характеристики структуры в этом плане имеют плоскость (111) ГЦК решетки нитрида титана и базисная плоскость (0001) ГПУ решетки α -фазы. Расчеты показывают, что расстояние между атомами в наиболее плотноупакованной плоскости (111) составляет $t = \frac{a\sqrt{2}}{2} = 2,98 \text{ \AA}$, (где $a = 4,23 \text{ \AA}$ – период решетки TiN). Параметр решетки α -Ti равняется приблизительно $2,95 \text{ \AA}$ и определяется уровнем легирования сплава. Именно это значение характеризует расстояние между атомами в плоскости (0001) α -фазы. Таким образом, если на поверхности лопатки, как на подложке, большинство зерен ориентировано базисной плоскостью (0001), то межфазная граница между покрытием и поверхностью лопатки, по-видимому, скорее всего, будет когерентной, что обеспечивает преимущественное развитие в процессе формирования покрытия кристаллов TiN с наиболее благоприятной ориентировкой (111).

Заключение

Проведенные исследования показали, что комплексное упрочнение сопровождается формирова-

нием благоприятных характеристик поверхностного слоя, что приводит к повышению среднего значения предела выносливости с 518 (ВП) до 614 МПа и с учетом рассеяния σ_{-1}^p с 507 (ВП) до 575 МПа.

Литература

1. Формирование характеристик поверхностного слоя лопаток компрессора комплексной обработкой / В.А. Богуслаев, П.Д. Жеманюк, В.К. Яценко и др. // Вестник двигателестроения. – 2003. – № 1. – С. 41 – 46.
2. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. – М.: Машиностроение, 1981. – 368 с.
3. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием / В.К. Яценко, Г.З. Зайцев, В.Ф. Притченко и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
4. Повышение точности и производительности рентгенодифрактометрических измерений макроскопических напряжений / Б.А. Серпецкий, С.В. Лоскутов, В.В. Левитин и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Физические методы исследования и контроля. – 1998. – № 3. – С. 28 – 31.
5. Вплив технології виготовлення на текстурованість лопаток ГТД / П.Д. Жеманюк, В.Ю. Олыша-нецький, Л.П. Степанова и др. // Металознавство та обробка металів. – 1998. – № 3. – С. 22 – 27.
6. Шаскольская М.П. Кристаллография. – М. 1976. – 391 с.
7. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / А.А. Внуков, Л.В. Марков, Л.А. Лаврова, Н.Ю. Бердышев. – К.: Техника, 1992. – 143 с.
8. Бабад-Захрапин А.А., Кузнецов Г.Д. Текстурированные высокотемпературные покрытия. – М.: Автомиздат. – 1980. – 176 с.

Поступила в редакцию 8.06.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Качан, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.