

УДК 621.9.011

А.И. Дубин

Открытое акционерное общество «Уфимское моторостроительное производственное объединение»

О РЕЛАКСАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

Рассмотрены вопросы, связанные с исследованием сопротивления усталости и параметров поверхностного слоя лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) из титанового сплава ВТ6. Проводится сравнительная оценка комплексной вакуумно-плазменной обработки (КВИПО) поверхности и серийной (базовой) технологией. по параметрам релаксации остаточных напряжений. Исследуемые образцы вырезались из различных мест лопаток. Представлены результаты проведенных сравнительных испытаний на усталость по первой изгибной форме колебаний. Показано преимущество варианта КВИПО. Приводятся рекомендации по промышленному применению технологии КВИПО по поверхности.

Ключевые слова: остаточные поверхностные напряжения (ОПН), технология, лопатка, ресурс, сопротивление усталости, частота собственных колебаний (ЧСК), обработка.

Введение

К числу наиболее важных и актуальных задач в авиадвигателестроении относится обеспечение эксплуатационных свойств лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД). Лопатки компрессора относятся к одним из многочисленных и ответственных деталей двигателя, в целом ряде случаев определяющих его ресурс и эксплуатационную надежность [1,2].

Надежность и долговечность лопаток компрессора ГТД в большой степени зависят от физико-химического и структурно-фазового состава, глубины и степени наклепа, микрогеометрии и остаточных поверхностных напряжений (ОПН).

ОПН оказывают значительное влияние на сопротивление усталости деталей, работающих в условиях статических и знакопеременных нагрузок. С одной стороны, при стендовых испытаниях, а с другой в процессе эксплуатации, наличие растягивающих ОПН является причиной образования и развития усталостных трещин [3] и, как следствие, снижение долговечности лопаток см. рис. 1.

Необходимость оценки ОПН в деталях сложных форм, в местах, которые являются концентраторами напряжений (кромки пера лопаток компрессора, радиусы перехода пера к полке замка), является особенно актуальной при эксплуатации ГТД с большим ресурсом, в том числе для прогнозирования его надежности в дальнейшем.

Как известно [1], остаточные напряжения, возникающие в ходе технологического процесса обработки лопаток, а также при их эксплуата-

ции в составе ГТД изменяются. При этом, устойчивость напряжений резко снижается при эксплуатации лопаток в условиях циклического нагружения.

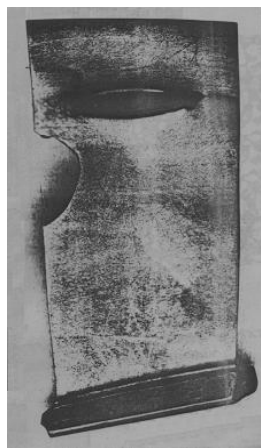


Рис. 1. Усталостное разрушение лопатки 2 ступени компрессора низкого давления из сплава ВТ6, наработка 8848 час (стрелкой показано место зарождения очага разрушения)

Это обусловлено, прежде всего тем, что предел текучести при циклическом нагружении значительно ниже, чем при статическом. Кроме того, циклические нагрузки могут привести к заметному повышению температуры металла, интенсифицирующей процесс релаксации остаточных напряжений [1].

Как правило, для достижения требуемого уровня выносливости и циклической долговечности, ставится задача определить не только знак

остаточных напряжений, но и их уровень, глубину залегания, характер распределения [3]. Определение ОПН крайне важно при внедрении в технологический процесс новых методов их обработки и выборе, при этом, оптимальных технологических режимов.

Исходя из этого, задача точного определения ОПН, с минимальным влиянием субъективных факторов, является весьма актуальной.

В статье на примере рабочих лопаток компрессора из сплава ВТ6 рассмотрены вопросы релаксации напряжений в результате пластической деформации металла, температуры (350...400 °С) и длительности ее воздействия, а также от внешних нагрузок.

1. Экспериментальная часть

1.1. Исследование остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток

Для сравнительной оценки релаксации остаточных напряжений применялся безразмерный параметр – отношение напряжений:

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_t}{\sigma_c}, \quad (1)$$

где σ_c – напряжения в лопатке, изготовленной по серийной технологии;

σ_t – напряжения в лопатке, изготовленной по технологии с применением КВИПО поверхности.

Сравнительную оценку выносливости проводили на вновь изготовленных лопатках без наработки ($\tau = 0$), а также с наработкой ($\tau = 10000$ час). Также исследовалось влияние температуры и эксплуатационной наработки на изменение (снижение) ОПН.

Оценку ОПН осуществляли путем послойного травления по методике [4]. Процесс определения ОПН реализовался на разработанной установке [5] и заключался в регистрации деформаций перемещений образца в процессе его электрохимического травления и последующей математической обработке полученных значений с использованием компьютера.

Установлено, что при нагреве титановых сплавов существует связь между релаксацией напряжений и снижением степени деформационного упрочнения. Для повышения устойчивости к процессу релаксации и, как следствие, обеспечения эксплуатационной надежности лопаток компрессора может быть рекомендована КВИПО, включающая в себя ионную модификацию в сочетании с многослойным вакуумно-плазменным защитным покрытием системы (Ti-Ti₂N-TiN)-n, где n – число слоев покрытия [6].

Известно [6,7], что при КВИПО, с одной стороны, происходит повышение сопротивления усталости в результате ионного модифицирования, а с другой – возможно его снижение при последующем нанесении покрытия (увеличивающееся с ростом толщины покрытия). Результирующее влияние обработки на сопротивление усталости зависит от толщины покрытия и его внутренней структуры, а также от степени предшествующего упрочнения поверхностного слоя.

КВИПО образцов проводили на установке ННВ-6.6 с источником газовой плазмы с накатным катодом ПИНК и аксиально-симметричными электродуговыми испарителями, при этом наносили многослойное защитное покрытие толщиной 16 мкм. Модифицирование поверхности выполняли ионами азота: низкоэнергетическое на установке ННВ-6.6 (энергия ионов $E = 0,9$ кэВ, доза $D = 2 \cdot 10^{19}$ ион/см²), высокоэнергетическое – на установке «Вита» ($E = 30$ кэВ, $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см²).

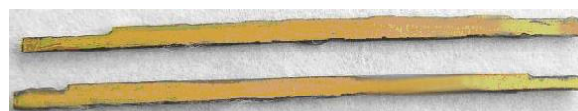
Внешний вид экспериментальных образцов представлен на рис. 2.



а)



б)



в)

Рис. 2. Образцы для определения ОПН: а) из профильной части пера; б) из переходной части профиля пера к замковой части; в) из кромок пера

Средние значения по результатам исследования 3-х образцов каждого вида приведены на рисунке 3.

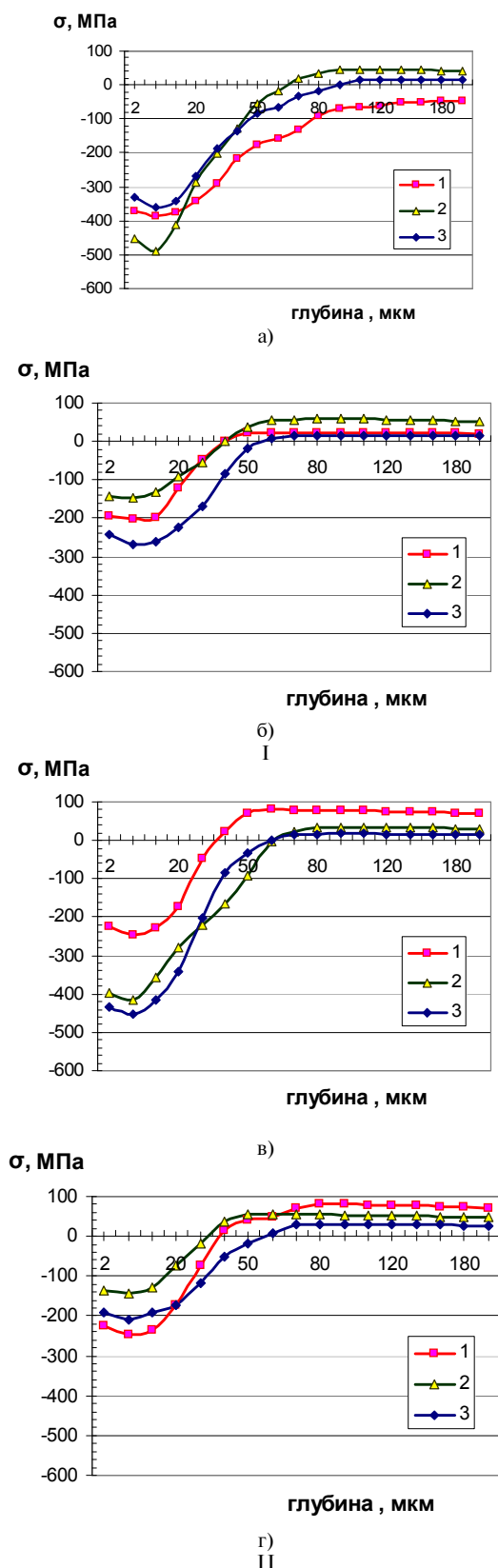
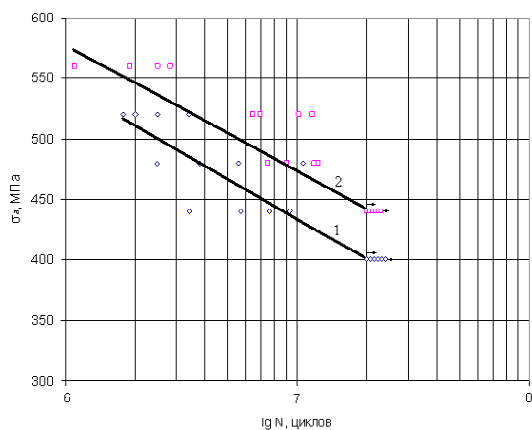


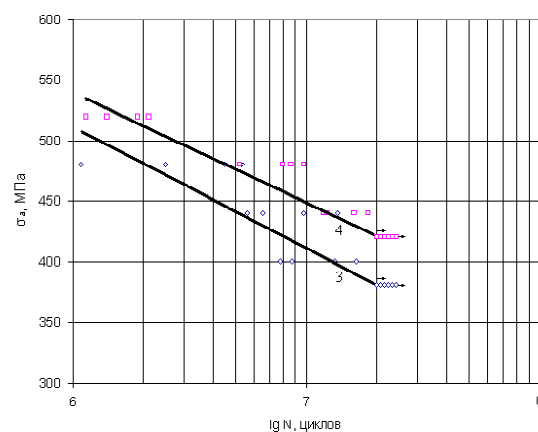
Рис. 3. ОПН со стороны корыта (I) и со стороны спинки (II) лопатки компрессора из титанового сплава ВТ6 после серийной обработки: а, в – на стадии изготовления; б, г – после эксплуатации: 1 – на входной кромке; 2 – в середине сечения; 3 – на выходной кромке

1.2. Исследование выносливости лопаток компрессора

Для изучения сопротивления усталости лопаток компрессора из титанового сплава ВТ6 исследовалась их выносливость по первой изгибной форме колебаний (с учетом ранее полученных результатов определения частот собственных колебаний) на базе испытаний $N = 2 \cdot 10^7$ циклов нагружения в соответствии с ОСТ 1.00870-77.



а)



б)

Рис. 4. Кривые усталости лопаток компрессора из титанового сплава ВТ6: а) – в исходном состоянии: 1 – серийная технология, 2 – технология КВИПО; б) – после эксплуатации $\tau = 10000$ час: 3 – серийная технология, 4 – технология КВИПО

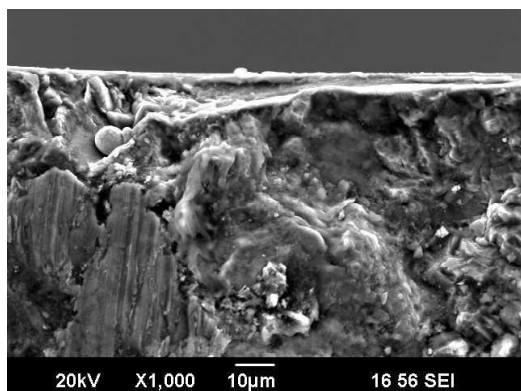
2. Анализ полученных результатов

Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что полной релаксации ОПН после эксплуатации не происходит. Для образцов, изготовленных по серийной технологии при одинаковости упрочнения всей поверхности пера ло-

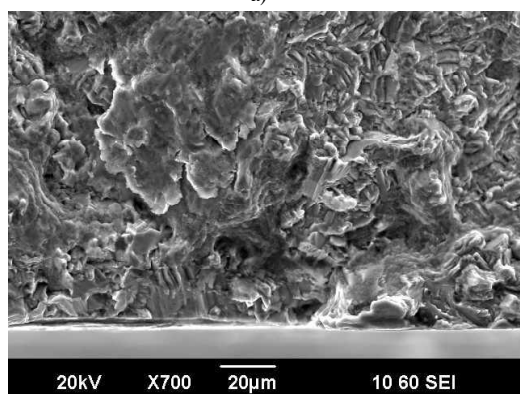
патов, эпюры ОПН имеют подобную форму с наличием подслоя максимума, однако, наблюдается различие в величине напряжений.

На образцах, изготовленных по технологии с применением КВИПО, как для исходного состояния, так и после эксплуатационной наработки, наблюдается уровень максимальных ОПН сжатия, соответственно в 2,4 и в 1,9 раза больший, чем на образцах серийного варианта. Это свидетельствует о большей релаксационной стойкости технологии с применением КВИПО. Приведенные результаты оценки выносливости, в том числе и после длительной наработки лопаток в составе полноразмерного изделия (см. рис. 4) показывают, что предел выносливости лопаток, обработанных по серийной технологии, составляет 400 МПа, по технологии КВИПО - 440 МПа; после эксплуатации наблюдается снижение пределов выносливости по обоим вариантам до, соответственно, 380 МПа и 420 МПа.

В изломах лопаток по обоим сравниваемым вариантам наблюдаются выраженные притертости, свидетельствующие об усталостном характере развития трещин. Установлено, что очаги изломов лопаток, изготовленных по серийной технологии, лежат на поверхности (рис. 5 а), в то время как для КВИПО характерно наличие подповерхностных очагов зарождения усталостных трещин (рис. 5 б).



а)



б)

Рис. 5. Электронно-микроскопическая фрактограмма изломов лопаток компрессора: а) серийная технология; б) технология КВИПО. Стрелками показаны очаги разрушения

Длительная наработка лопаток обуславливает релаксацию их физико-химического и структурно-фазового состава поверхностного слоя и, как следствие, выносливости.

Полученные результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1
Экспериментальные значения параметров по исследуемым вариантам

Параметр	Серийная технология	Технология КВИПО
	до/после эксплуатации	
σ_{-1} , МПа	400 / 380	440 / 420
$\sigma_{сж.макс.}$ МПа	-497 / -165	-1176 / -315
Глубина перехода Δ , мкм	45 / 50	45 / 30
$\sigma_{раст.макс.}$ МПа	98 / 79	62 / 92
HV _{0,05} , МПа	420 / 354	2330 / 2100

Анализ полученных результатов свидетельствует, что наблюдается корреляционная зависимость между уровнем выносливости, величиной и характером остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток. Длительная эксплуатация ($\tau = 10000$ час.) лопаток приводит к релаксации свойств поверхности, связанных с процессами окисления, разупрочнения, изменения химического и структурно-фазового состава. Вместе с тем, у лопаток, обработанных по технологии КВИПО стабильность физико-химического состояния поверхностного слоя выше, что в конечном итоге обеспечивает более высокие значения их пределов выносливости и, как следствие, эксплуатационной надежности.

Заключение

Таким образом, проведенными исследованиями показано, что при воздействии эксплуатационных нагрузок и температуры на лопатки из титановых сплавов (на примере сплава ВТ6) происходит релаксация напряжений и снижение степени деформационного упрочнения. Для повышения устойчивости поверхности к процессу релаксации и, как следствие, обеспечения эксплуатационной надежности лопаток компрессора рекомендована технология КВИПО, включающая в себя ионную модификацию в сочетании с многослойным вакуумно-плазменным защитным покрытием толщиной $h = 16$ мкм системы $(Ti-Ti_2N-TiN)_n$, где $n = 6$ - число слоев.

Положительное действие ионной имплантации в составе КВИПО заключается в блокировании процессов окисления и разупрочнения

поверхности, что, в сравнении с базовыми технологиями упрочнения, выражается в меньшем снижении уровня выносливости. Все вышеперечисленное обуславливает больший ресурс лопаток и их эксплуатационную надежность.

Перечень ссылок

1. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240с.
2. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993. – 240с.
3. Архипов А.Н. Определение остаточных напряжений в поверхностных слоях изделий сложной формы / А.Н. Архипов, А.Б. Пряжников, С.Е. Морозов. / Научно-технический отчет ЦИАМ № 11376. – 1989. – 72с.
4. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток двигателей. Методические материалы / НИАТ. – 1965г. – 20с.

5. Смыслов А.М. Определение остаточных поверхностных напряжений в деталях ГТД с использованием лазерного интерферометра / А.М. Смыслов, С.П. Павлинич, А.И. Дубин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №11. – С.47-49.

6. Смыслова М.К. Исследование и разработка комбинированных ионно-плазменных технологий, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств лопаток газовых и паровых турбин // Уфа: Вестник УГАТУ, т.5, №3(11), 2004. – С.76-83.

7. Смыслов А.М., Технология и оборудование для упрочнения больших размеров лопаток паровых турбин из титановых сплавов / А.М. Смыслов, Ю.М. Дыбленко, М.К. Смыслова // VI Междунар. конф. «Вакуумные технологии и оборудование». – Харьков, 2003. – С.173–177.

Поступила в редакцию 21.07.2011

А.І. Дубін. Про релаксаційну стійкість лопаток компресора

Розглянуто питання, пов'язані з дослідженням опору втомленості й параметрів поверхневого шару лопаток компресора газотурбінного двигуна (ГТД) з титанового сплаву VT6. Проводиться порівняльна оцінка комплексної вакуумно-плазмової обробки (КВПО) поверхні й серійною (базовою) технологією по параметрах релаксації залишкових напруг. Досліджувані зразки вирізалися з різних місць лопаток. Представлено результати проведених порівняльних випробувань на втомленість за першою вигинною формою коливань. Показано перевагу варіанта КВПО. Приводяться рекомендації із промислового застосування технології КВПО поверхні.

Ключові слова: залишкові поверхневі напруги (ЗПН), технологія, лопатка, ресурс, опір втомленості, частота власних коливань (ЧВК), обробка.

A.I. Dubin. About relaxational resistance of the compressor's blades

The questions of fatigue strength and surface parameters of the compressor's blades gas-turbine's engine (GTE) from titanium alloy VT6 investigation are considered. The complex vacuum-plasma treatment of the surface (CVPT) comparing with serial (base) technology by surface residual stresses relaxation is described. The specimen were cut from different areas of the blade. Compare fatigue test results by first bend form are shown. CVPT technology is given a better result. Recommendations for industrial use of CVPT technology are given.

Key words: surface residual stresses (SRS), technology, blade, resource, fatigue strength, natural oscillations frequency (NOF), treatment.