УДК 621.9.011

К ВОПРОСУ О РЕЛАКСАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© 2011 А. М. Смыслов[1], М. К. Смыслова[1], А. И. Дубин[2]

[1]Уфимский государственный авиационный технический университет
[2]Уфимское моторостроительное производственное объединение

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) технологий. Приводятся рекомендации по практическому применению технологии КВИПО поверхности.

Остаточные поверхностные напряжения (ОПН), технология, лопатка, ресурс, сопротивление усталости, частота собственных колебаний, обработка.

Одной из наиболее важных и актуальных задач в авиадвигателестроении является обеспечение эксплуатационных свойств лопаток компрессора ГТД. Лопатки компрессора относятся к одним из многочисленных и ответственных деталей двигателя, в целом ряде случаев определяющих его ресурс и эксплуатационную надёжность [3,4].

Надёжность и долговечность лопаток компрессора ГТД в большой степени зависят от физико-химического и структурно-фазового состава, глубины и степени наклёпа, 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 [1] и, как следствие, снижения долговечности лопаток (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 надёжности в дальнейшем.

Как известно [3], остаточные напряжения, возникающие в ходе технологического процесса обработки лопаток, а также при их эксплуатации в составе ГТД, изменяются. При этом устойчивость напряжений резко снижается при эксплуатации лопаток в условиях циклического нагружения. 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 [3].

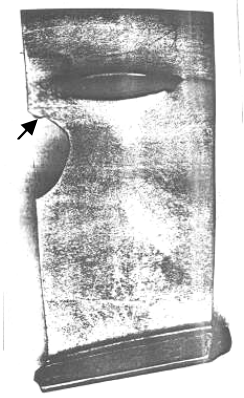


Рис. 1. Разрушение лопатки 2-й ступени компрессора низкого давления из сплава ВТ6, наработка 8848 час (показано место зарождения очага разрушения)

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 [1]. Определение ОПН крайне важно при внедрении в технологический процесс новых методов их обработки и вы-

боре при этом оптимальных технологических режимов.

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

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

Исследование остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток

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

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

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 (τ=0), а также с наработкой (τ = 10000 ч). Также исследовалось влияние температуры и эксплуатационной наработки на изменение (снижение) ОПН.

Оценку ОПН осуществляли путём послойного стравливания по методике [2]. 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.

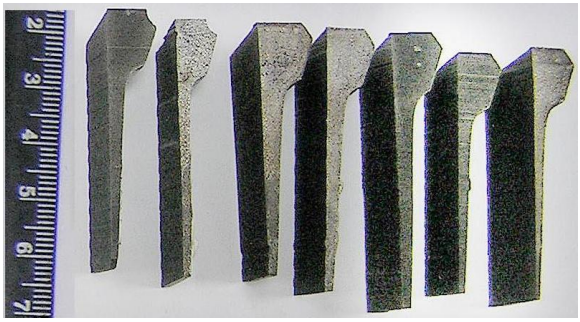
Установлено, что при нагреве титановых сплавов существует связь между релаксацией напряжений и снижением степени деформационного упрочнения. Для повышения устойчивости к процессу релаксации и, как следствие, обеспечения эксплуатационной надёжности лопаток компрессора может быть рекомендована КВИПО, включающая в себя ионную модификацию в сочетании с многослойным вакуумно-плазменным защитным покрытием системы $(Ti\text{-}Ti_2N\text{-}TiN)\cdot n$, где n- число слоёв 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.

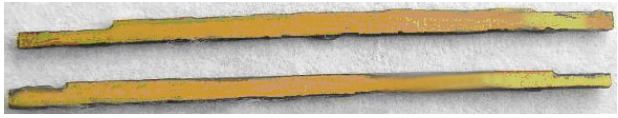
КВИПО образцов проводили на установке ННВ-6.6 с источником газовой плазмы с накальным катодом ПИНК и аксиально-симметричными электродуговыми испарителями, при этом наносили многослойное защитное покрытие толщиной 16 мкм. Модифицирование поверхности выполняли ионами азота: низкоэнергетическое на установке ННВ-6.6 (энергия ионов Е=0,9 кэВ, доза Д=$2\cdot10^{19}$ ион/см^2), высокоэнергетическое – на установке «Вита» (Е=30 кэВ, Д=$2\cdot10^{17}$ ион/см^2).

Внешний вид экспериментальных образцов представлен на рис. 2.

а



б



в

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

Средние значения по результатам исследования трёх образцов каждого вида приведены на рис. 3.

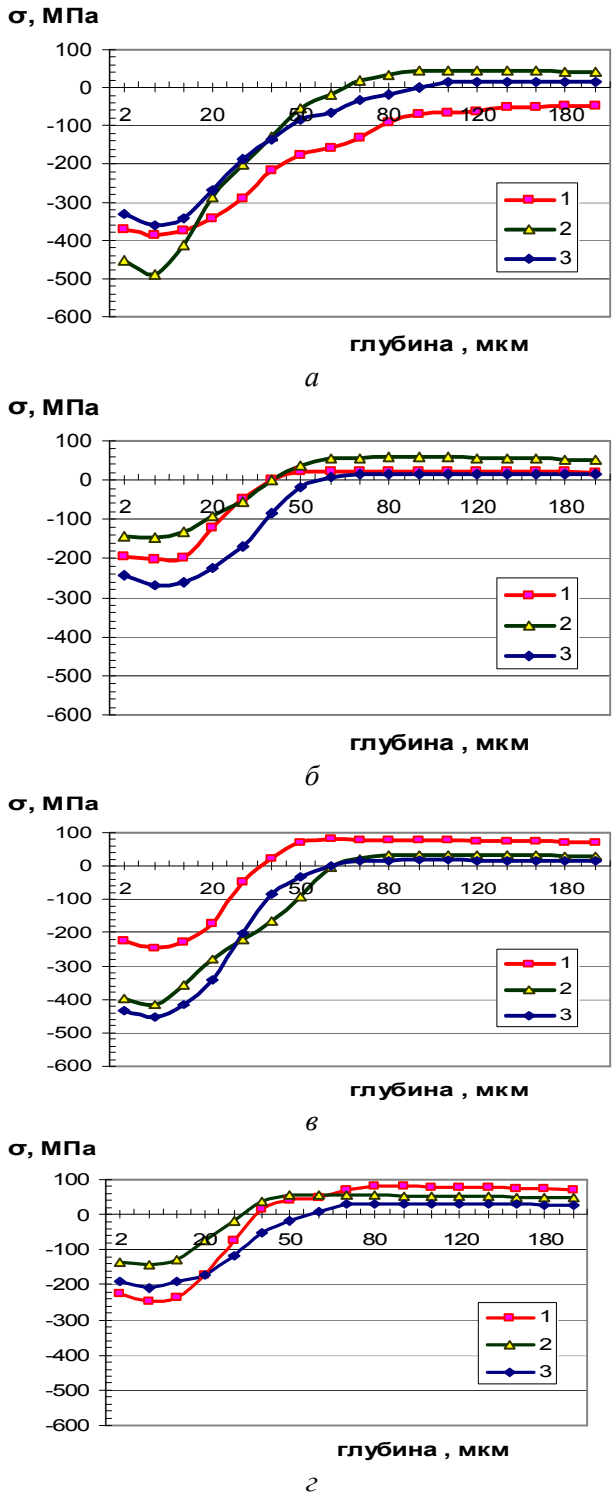


Рис. 3. ОПН со стороны корыта (а,б) и со стороны спинки (в,г) лопатки компрессора из титанового сплава ВТ6 после серийной обработки: а,в- на стадии изготовления; б,г- после эксплуатации: 1 - на входной кромке; 2 - в середине сечения; 3 - на выходной кромке

Результаты показывают, что полной релаксации ОПН после эксплуатации не происходит. Для образцов, изготовленных по серийной технологии при одинаковости упрочнения всей поверхности пера лопаток, эпюры ОПН имеют подобную форму с наличием подслойного максимума, однако наблюдается различие в величине напряжений. На образцах, изготовленных по технологии с применением КВИПО поверхности как для исходного состояния, так 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.

Исследование частот собственных колебаний

Одной из характеристик, определяющих несущую способность лопаток компрессора, является частота их собственных колебаний. В связи с нанесением на лопатку защитного покрытия по технологии КВИПО произведена сравнительная оценка распределения частот их собственных колебаний (ЧСК) по первой изгибной (основной) форме до и после нанесения покрытия. Для реализации эксперимента была спроектирована и изготовлена специальная лазерная измерительная система. Обработку результатов осуществляли по специально разработанной компьютерной программе. Измерительная система состояла из источника питания, устройства сбора данных, триангуляционного лазерного датчика, компьютера с программным обеспечением и принтера. Лазерный измеритель крепился на консольном поворотном штативе и настраивался на измеряемый объект. Результаты приведены на рис. 4.

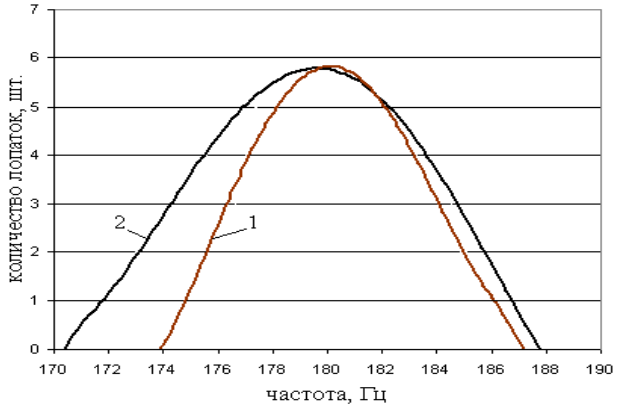
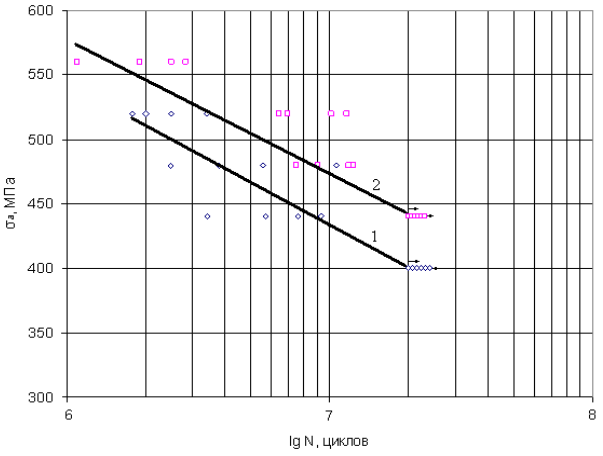


Рис. 4. Распределение частот собственных колебаний лопаток 2-й ступени из сплава ВТ6 ротора КНД изд. АЛ31СТ по основному тону: 1) серийная технология, 2) технология КВИПО

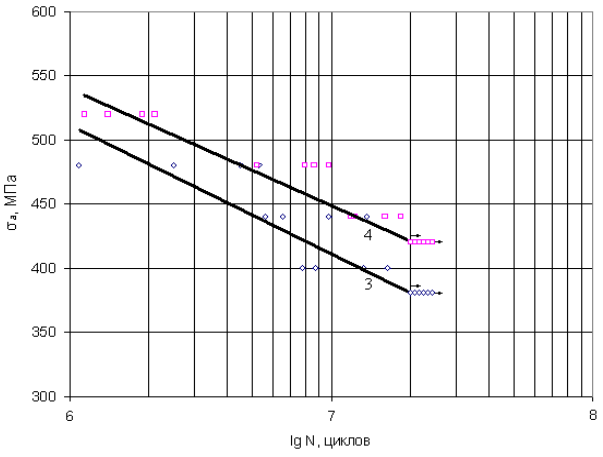
Установлено, что ЧСК лопаток компрессора, изготовленные по серийной технологии, находятся в диапазоне частот 174…188 Гц (среднее арифметическое значение 180 Гц); после КВИПО - 170…188 Гц (среднее арифметическое значение 178 Гц). Смещение диапазона частот в левую область объясняется незначительным увеличением массы лопаток после нанесения защитного покрытия.

Исследование выносливости лопаток компрессора

Для изучения сопротивления усталости лопаток компрессора из титанового сплава ВТ6 исследовалась их выносливость по первой изгибной форме колебаний (с учётом результатов определения ЧСК, рис. 4) на базе испытаний $N=2\cdot10^7$ циклов нагружения в соответствии с ОСТ 1.00870-77.



а

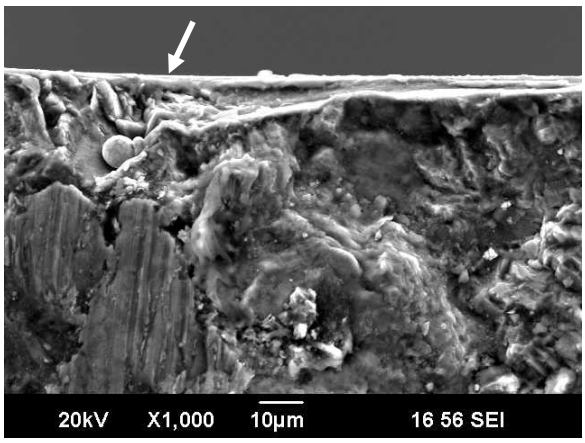


б

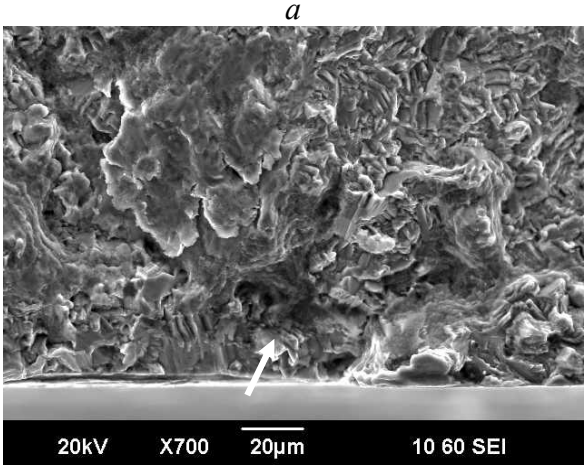
Рис. 5. Кривые усталости лопаток компрессора из титанового сплава ВТ6: а - в исходном состоянии: 1- серийная технология, 2 - технология КВИПО; б - после эксплуатации τ = 10000 час: 3 - серийная технология, 4 - технология КВИПО

Приведенные результаты оценки выносливости, в том числе и после длительной наработки лопаток в составе полноразмерного изделия (рис. 5) 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 380 МПа и 420 МПа соответственно.

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. 6,а), в то время как для КВИПО характерно наличие подповерхностных очагов зарождения усталостных трещин (рис. 6,б).



а



б

Рис. 6. 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 (τ = 10000 ч) 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.

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 надёжности 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 слоёв.

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.

Библиографический список

1. Архипов, А.Н. Определение остаточных напряжений в поверхностных слоях изделий сложной формы [Текст] / А.Н. Архипов, А.Б. Пряжников, С.Е. Морозов // Научно-технический отчёт ЦИАМ № 11376 - 1989. –72с.

2. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток двигателей [Текст]: метод. материалы / НИАТ.-1965. -20с.

3. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин [Текст] / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. - 240с.

4. Петухов, А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД [Текст] / А.Н. Петухов - М.: Машиностроение, 1993. - 240с.

5. Смыслов, А.М. Определение остаточных поверхностных напряжений в деталях ГТД с использованием лазерного интерферометра [Текст] / 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 [Текст] / М.К. Смыслова // Уфа: Вестн. УГАТУ.- Уфа, 2004. - Т.5.- №3(11). - С. 76-83.

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

ABOUT RELAXATIONAL RESISTANCE OF THE COMPRESSOR'S BLADES FROM TITANIUM ALLOYS

© 2011 A. M. Smyslov [1], M. K. Smyslova [1], A. I. Dubin [2]

[1]Ufa's state aircraft technical univercity
[2]Ufa's engine-building company

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 is described. Recommendations for practice use of CVPT technology are given.

Surface residual stresses (SRS), technology, blade, resource, fatigue strength, natural oscillations frequency (NOF), treatment.

Информация об авторах

Смыслов Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Уфимского государственного авиационного технического университета. Тел.: (347) 273-07-63. Область научных интересов: формирование новых свойств поверхности с использованием ионных, плазменных и электронных пучков в соответствии с условиями эксплуатации деталей.

Смыслова Марина Константиновна, кандидат технических наук, доцент Уфимского государственного авиационного технического университета. Тел.: (347) 273-07-63. Область научных интересов: формирование новых свойств поверхности с использованием ионных, плазменных и электронных пучков в соответствии с условиями эксплуатации деталей.

Дубин Алексей Иванович, начальник лаборатории Уфимского моторостроительного производственного объединения. Тел.: 8-987-25-68-620. E-mail: alexey.dubin@rambler.ru. Область научных интересов: сопротивление усталости, релаксационная стойкость лопаток компрессора и турбины ГТД, остаточные поверхностные напряжения.

Smyslov Anatoly Mikhailovich, Doctor of Engineering Science, professor, the manager of the mashin-building technology chair in Ufa's state aircraft technical university. Phone: (347) 273-07-63. Area of research: a new property of the surface forming by using ion, plasma and electron bunches according service conditions of the parts.

Smyslova Marina Konstantinovna, Candidate of Engineering Science, Ufa's state aircraft technical university. Phone: (347) 273-07-63. Area of research: a new property of the surface forming by using ion, plasma and electron bunches according service conditions of the parts.

Dubin Alexey Ivanovich, the manager of the laboratory of Ufa's engine-building company. Phone: 8 987-25-68-620. E-mail: alexey.dubin@rambler.ru. Area of research: fatigue strength, relaxational resistance of the compressor's and turbine's blades GTE, surface residual stresses.