

А. М. Смыслов, М. К. Смыслова, А. И. Дубин

## О ВЗАИМОСВЯЗИ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ПАРАМЕТРАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ

Рассматриваются вопросы, связанные с исследованием выносливости 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. Приводятся рекомендации по практическому применению технологии КВИПО поверхности. *Остаточные поверхностные напряжения; технология; лопатка; сопротивление усталости; частота собственных колебаний*

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение эксплуатационных свойств лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) является одной из наиболее важных и актуальных задач в авиадвигателестроении. Лопатки компрессора относятся к одним из многочисленных и ответственных деталей двигателя, в целом ряде случаев определяющих его ресурс и эксплуатационную надежность [3, 4].

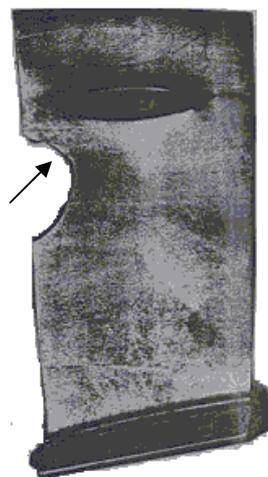
Надежность и долговечность лопаток компрессора ГТД в большой степени зависят от физико-химического и структурно-фазового состава, глубины и степени наклепа, микрогеометрии и остаточных поверхностных напряжений (ОПН).

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 [1] и, как следствие, снижение 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 надежности 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 ступени компрессора низкого давления из сплава ВТ6, наработка 8848 часов (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 особенно 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.

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. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЛОПАТОК

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

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

где  $\sigma_c$  – напряжения в лопатке без наработки,  $\sigma_r$  – напряжения в лопатке, имеющей наработку.

Сравнительную оценку выносливости проводили на вновь изготовленных лопатках без наработки ( $\tau = 0$ ), а также с наработкой (эквив.  $\tau = 25000$  ч.). Также исследовалось влияние температуры и эксплуатационной наработки на изменение (снижение) ОПН.

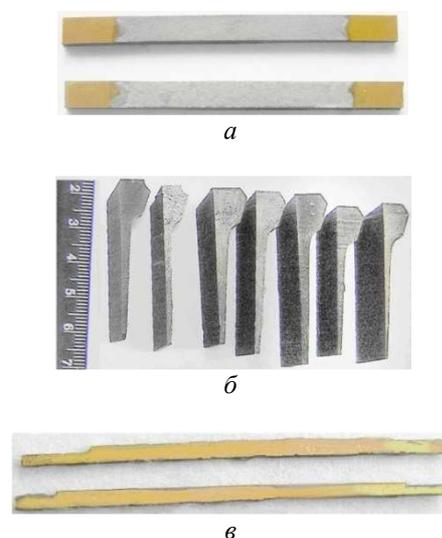
Оценку ОПН осуществляли путем послойного травления по методике [2]. Процесс определения ОПН реализовался на разработанной установке [5] и заключался в регистрации деформаций перемещений образца в процессе его электрохимического травления и последующей математической обработке полученных значений с использованием 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 надежности лопаток компрессора может быть рекомендована КВИПО, включающая в себя ионную модификацию в сочетании нанесением многослойного вакуумно-плазменного защитного покрытия системы (Ti-Ti<sub>2</sub>N-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 накаливаемым 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/см<sup>2</sup>), высокоэнергетическое – на установке «Вита» ( $E = 30$  кэВ,  $D = 2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>).

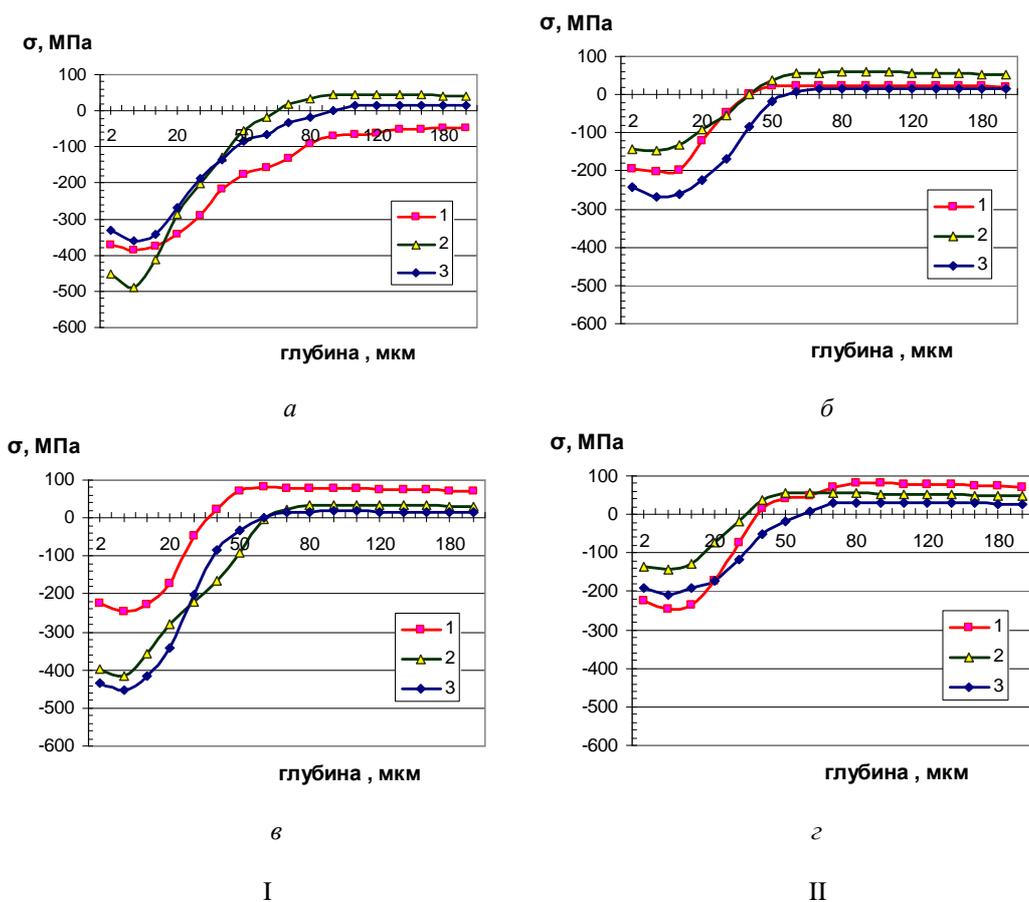
Внешний вид экспериментальных образцов, вырезанных из лопаток электроэрозионным способом, представлен на рис. 2.



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

Результаты анализа средних значений по результатам исследования 3-х образцов каждого вида (см. рис. 3) 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 подслойногo максимума, однако, наблюдается различие в величине напряжений.

Параметр  $S_{\sigma}$  для серийного варианта составляет 0,332, для варианта КВИПО – 0,267, вместе с тем, на образцах, изготовленных по технологии с применением КВИПО поверхности 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.



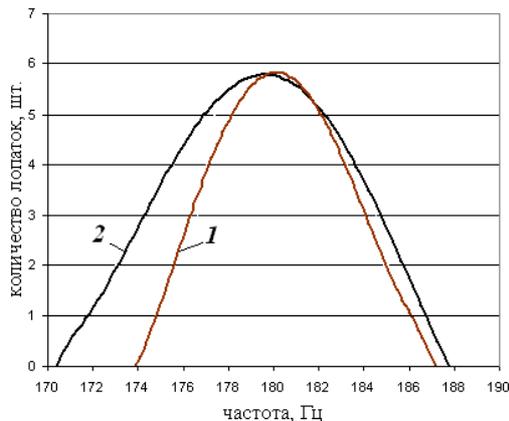
**Рис. 3.** ОПН со стороны корыта (I) и со стороны спинки (II) лопатки компрессора из титанового сплава ВТ6 после серийной обработки: *а, в* – на стадии изготовления; *б, г* – после эксплуатации:  
*1* – на входной кромке; *2* – в середине сечения; *3* – на выходной кромке

Это свидетельствует о большей релаксационной стойкости технологии с применением КВИПО.

**2. 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 крепил-

ся на консольном поворотном штативе и настраивался на измеряемый объект. Результаты приведены на рис. 4.



**Рис. 4.** Распределение частот собственных колебаний лопаток 2 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.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

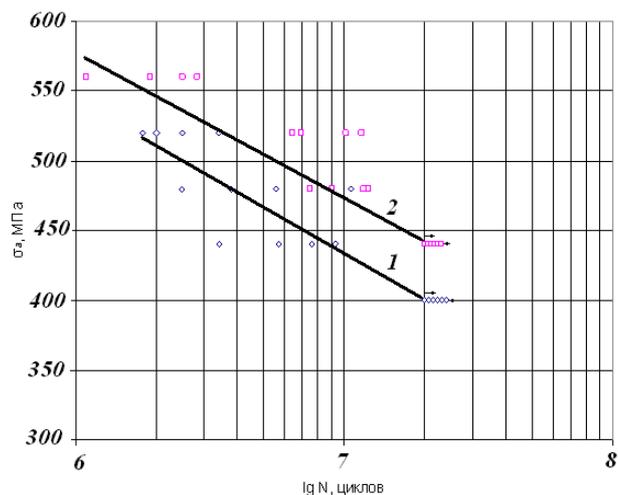
Для изучения сопротивления усталости лопаток компрессора из титанового сплава ВТ6 проводились их испытания по первой изгибной форме колебаний (с учетом результатов определения ЧСК см. рис. 4) на базе испытаний  $N = 2 \cdot 10^7$  циклов нагружения в соответствии с ОСТ 1.00870-77.

Приведенные графические результаты испытаний лопаток без наработки и после длительной наработки лопаток в составе полно-размерного изделия (см. 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 этом случае условие обеспечения величины минимально допустимого предела выносливости 400 МПа по отношению к серийному варианту не выполняется.

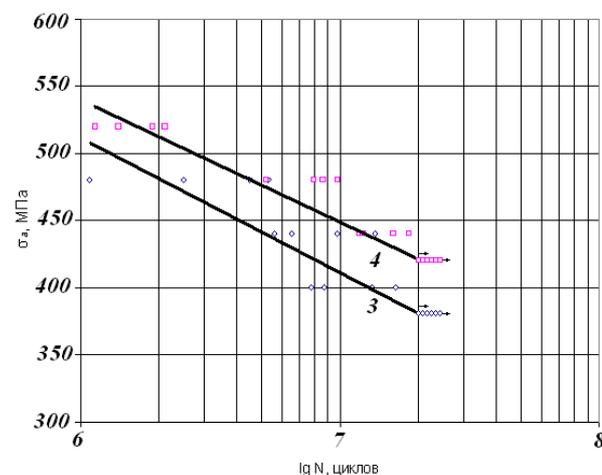
Проведенными исследованиями лопаток после эксплуатации установлено, что микроструктура основного материала соответствует термообработанному двухфазному  $\alpha + \beta$  состоянию титанового сплава ВТ6, соответствует 3...4 типу микроструктур шкалы № 2 ОСТ1 90006-86 (см. рис. 6).

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. 7, а), в то время как для КВИПО характерно наличие подповерхностных очагов зарождения усталостных трещин (рис. 7, б).

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

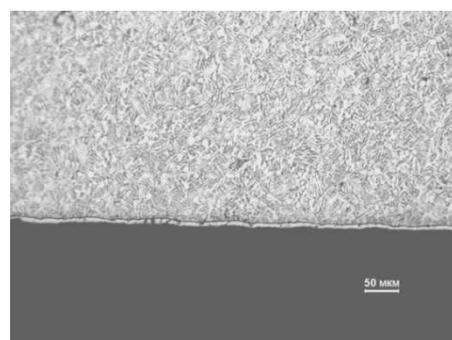


а

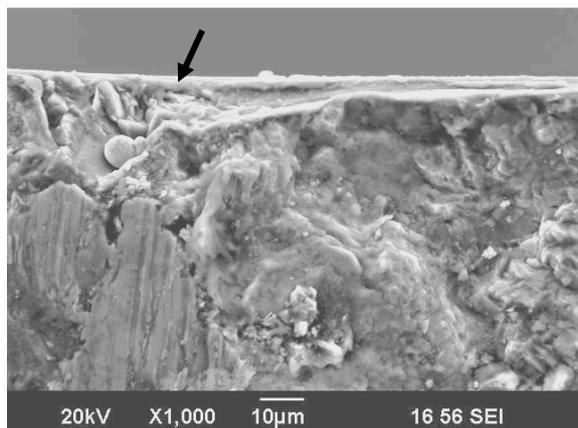


б

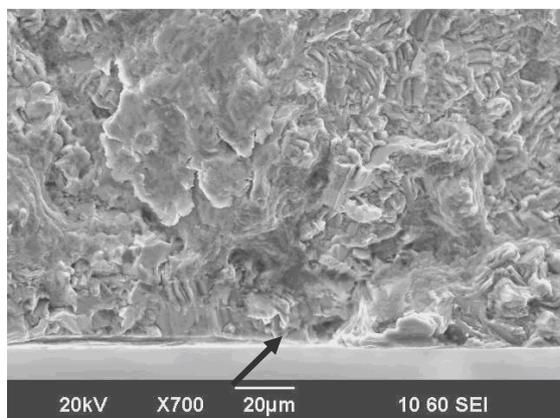
**Рис. 5.** Кривые усталости лопаток компрессора из титанового сплава ВТ6: а – в исходном состоянии: 1 – серийная технология, 2 – технология КВИПО; б – после эксплуатации (эквив.  $\tau = 25000$  час): 3 – серийная технология, 4 – технология КВИПО



**Рис. 6.** Микроструктура в поперечном сечении лопатки, обработанной по технологии КВИПО



а



б

**Рис. 7.** Электронномикроскопическая фрактограмма изломов лопаток компрессора: а – серийная технология; б – технология КВИПО. Стрелками показаны очаги разрушения

Полученные результаты сведены в таблицу.

Таблица  
Экспериментальные значения напряжений по исследуемым вариантам

Параметр	Серийная технология	Технология КВИПО поверхности
	до/после эксплуатации	
$\sigma_{-1}$ , МПа	400 / 380	440 / 420
$\sigma_{сж.макс.}$ , МПа	-497 / -165	-1176 / -315
Глубина перехода $\Delta$ , мкм.	45 / 50	45 / 30
$\sigma_{раст.макс.}$ , МПа	98 / 79	62 / 92
$HV_{0,5}$ , МПа	420 / 354	2330 / 2100

Анализ полученных результатов свидетельствует, что наблюдается корреляционная зависимость между сопротивлением усталости и величиной остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток. Длительная эксплуатация (эквивалент  $\tau = 25000$  час.) лопаток приводит к релаксации свойств поверхности, связанной 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

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  $(Ti-Ti_2N-TiN) \cdot n$ , 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 (виброгалтовка, виброшлифовка), выражается в повышении сопротивления усталости и обеспечении минимально допустимого предела выносливости. Все вышесказанное обуславливает больший ресурс лопаток и их эксплуатационную надежность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

4. **Петухов А. Н.** Сопротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993. 240 с.

5. **Смыслов А. М., Павлиннич С. П., Дубин А. И.** Определение остаточных поверхностных напряжений в деталях ГТД с использованием лазерного интерферометра // 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 // Вестник УГАТУ. 2004. Т. 5, № 3(11). С. 76–83.

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

#### ОБ АВТОРАХ

**Смыслов Анатолий Михайлович**, зав. каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер-технолог (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по производству двигателей ЛА (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. ионно-имплант. и вакуумно-плазм. модиф. поверхности.

**Смыслова Марина Константиновна**, доц. каф. оборудования и технологии сварочн. произв-ва. Дипл. инженер-технолог (УАИ, 1978). Канд. техн. наук (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. ионно-имплант. и вакуумно-плазм. модиф. поверхности.

**Дубин Алексей Иванович**, начальник лаборатории ОАО «УМПО». Дипл. инженер-технолог (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. сопротивления усталости, релаксационной стойкости деталей ГТД.