

УДК 621.891

А. М. СМЫСЛОВ, К. С. СЕЛИВАНОВ

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ФРЕТТИНГ-СТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Проведенные исследования комплекса эксплуатационных свойств образцов из титанового сплава ВТ6 после различных технологических методов упрочнения показывают, что наиболее предпочтительным из исследованных вариантов является комбинированная вакуумная ионо-имплантационная обработка с последующим нанесением многослойного вакуумно-плазменного покрытия системы Ti-TiN. Она обеспечивает повышение фреттинг-стойкости, конструктивной усталости, и сопротивление поверхности абразивному износу. *Плазменная обработка; защитное покрытие; фреттинг; технология*

Детали газотурбинных двигателей (ГТД) эксплуатируются в жестких условиях: большие растягивающие напряжения, высокие температуры, действия агрессивных сред и знакопеременные нагрузки при вибрации. При этом основным видом повреждения поверхностей (до 84% случаев [1]), приводящим к поломке деталей, является усталостное разрушение. Анализ причин отказов узлов и агрегатов ГТД в ходе их длительной эксплуатации в составе полноразмерных изделий, а также результатов стендовых испытаний, периодически проводимых на авиадвигателестроительных предприятиях [1, 2], показывает, что одной из основных причин зарождения большинства усталостных дефектов, приводящих к разрушению, является фреттинг-износ или фреттинг-коррозия.

Особенно остро проблема возникновения и развития этого процесса стоит при эксплуатации лопаток ГТД с бандажными и антивибрационными полками. Например, износ бандажных полок лопаток компрессора и турбины из-за вибрации вызывает уменьшение, а иногда и полное срабатывание конструкционного и эксплуатационного натяга. Как показывает опыт эксплуатации авиационных компрессоров [3], к 800–1000 часам их наработки предварительный натяг на полках исчезает, а к 3–4 тысячам часов между полками возникает зазор до 2,5 мм. В результате этого происходит увеличение амплитуды виброперемещений и величины переменных напряжений пера лопатки, что может служить причиной снижения ее вибрационной прочности и, как следствие, усталостного разруше-

ния. Кроме этого, следствием износа бандажных полок является постепенное ухудшение рабочих характеристик двигателя: уменьшение КПД компрессора и турбины, увеличение расхода топлива, уменьшение запасов газодинамической устойчивости и увеличение уровня вибраций, которое может привести к аварийным ситуациям [2].

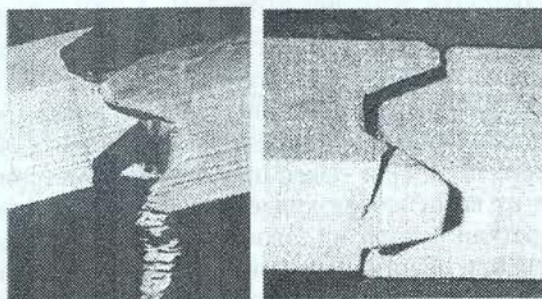


Рис. 1. Разрушение бандажных полок лопаток из титанового сплава ТС5 после наработки 7,38 тыс. часов по причине развития фреттинг-износа

Проблема фреттинга особенно актуальна для титановых сплавов, которые благодаря своему малому весу и высокой прочности нашли широкое применение при изготовлении лопаток компрессора ГТД и лопаток паровых турбин. В то же время контактные поверхности лопаток, изготовленных из этих материалов, проявляют весьма низкие антифрикционные свойства, склонность к адгезионному взаимодействию, что ведет к их схватыванию, образованию задиров, снижению усталостной прочности и, как следствие, разрушению [2], рис. 1.

Методы защиты от фреттинг-износа и фреттинг-коррозии объединяют в себе раз-



личные технологические способы обработки поверхностей. В настоящее время наиболее применяемым способом является нанесение различных защитных покрытий на контактирующие поверхности [1, 2, 4–7]. При этом исходный материал деталей исключается из процесса трения. Износ перемещается в так называемое «третье тело», образовавшееся материалами покрытий.

Развитие фреттинга значительно сдерживается на поверхностях, покрытых пластичными материалами [4], которые способны претерпевать многочисленное деформирование без разрушения и не склонны к окислению. Так, в настоящее время для защиты хвостовиков лопаток ГТД от фреттинга применяется покрытие из технического серебра, которое способствует повышению долговечности деталей в 1,5–2,0 раза. Кроме этого, для уменьшения фреттинг-износа применяют покрытия на кадмиевой и никель-кадмиевой основе, электролитические слои золота, меди, олова [1, 4]. Известен способ предотвращения фреттинг-коррозии между литым алюминиевым картером и корпусом подшипника с помощью лужения [5]. Ряд авторов исследовали возможность снижения фреттинг-коррозии с помощью полимерных и других неметаллических покрытий [6].

Эффект применения защитных покрытий обусловлен тем, что прослойка из менее прочного, но пластичного материала приводит к уменьшению напряжений и деформаций в узле трения, выполняя функции смазочного материала [4, 7], а также предохраняет материал от воздействия кислорода [8] и развития фреттинг-коррозии. Кроме этого, при использовании пластичного покрытия может увеличиваться фактическая площадь контакта. При этом будет снижаться удельное давление и связанная с ним интенсивность износа.

Основными сдерживающими факторами применения покрытий являются обеспечение высокой адгезии к подложке и выбор оптимальной толщины, поскольку тонкое покрытие не обеспечивает эффективную защиту, а толстое — имеет низкую адгезионную и усталостную прочность. Кроме того, с увеличением толщины растет вероятность развития фреттинг-износа самого покрытия [5], а также резко снижается фреттинг-усталостная прочность поверхностных слоев в результате возникновения в них растягивающих напряжений [9]. Таким образом, использование покрытий и предотвращение взаимодействия основных материалов поверхностей не исключает их разрушения, поскольку в по-

верхностном слое будут продолжать развиваться усталостные процессы, обусловленные внутренним трением при фреттинге.

В качестве примера эксплуатационного разрушения детали с защитным покрытием в результате фреттинга можно привести поломку рабочих лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 с защитным покрытием на основе карбида вольфрама ВК25. Металлографическими исследованиями было установлено, что разрушение происходило на контактных поверхностях антивибрационных полок в результате развития усталостных дефектов, которые привели к сколу покрытия и разрушению пера лопатки, рис. 2.



Рис. 2. Бандажные полки рабочих лопаток компрессора ГТД (наработка 8,8 тыс. часов) после разрушения по причине фреттинг-износа

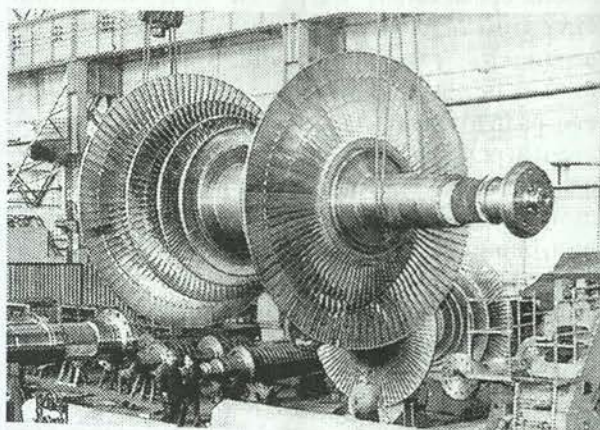


Рис. 3. Ротор паровой турбины ТЭС «Альхолма» производства ОАО «ЛМЗ» с упрочненными рабочими лопатками

В настоящее время наиболее перспективными методами обработки поверхности, с которыми ряд исследователей [10–16] связывает возможность значительного повышения эксплуатационных свойств деталей машин, являются ионно-имплантационные и вакуумно-плазменные технологии, а также их комбинации. Преимущества этих технологий наиболее полно используют при изготовлении ответственных деталей газотурбинных двигателей [12, 13] и лопаток турбин паровых энергетических установок из титановых сплавов, работающих в условиях высоких температур, давлений и агрессивных сред, рис. 3.



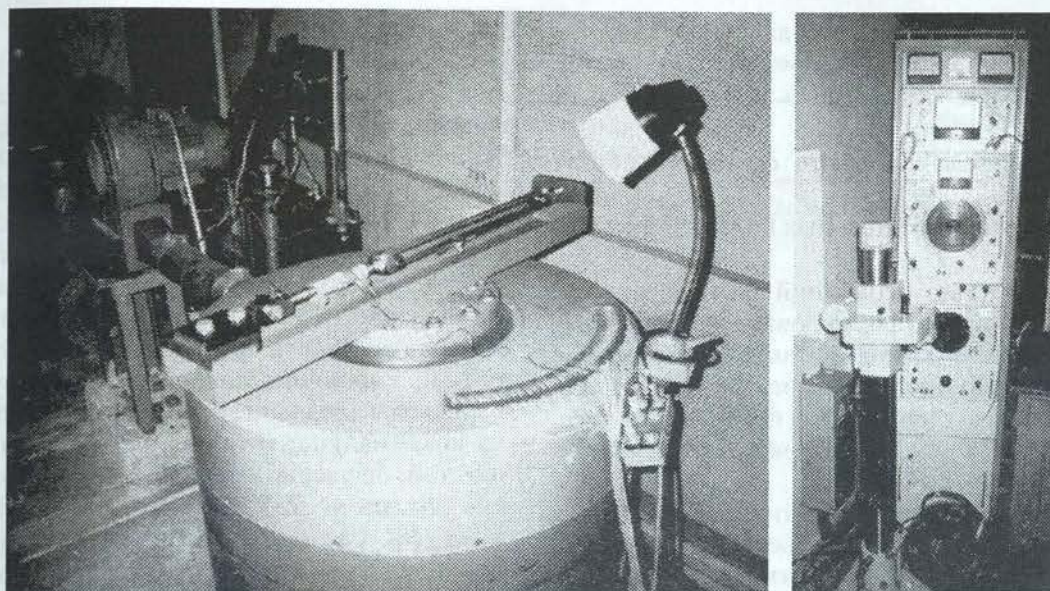


Рис. 4. Общий вид установки для испытания на износ при фреттинге и блока управления (справа)

Кроме этого, имеется опыт применения рассматриваемых технологий для эффективного повышения износостойкости металлорежущих инструментов, инструментов для экструзии и волочения [10, 11], штамповочной оснастки, пар трения, а также увеличения коррозионной стойкости и циклической долговечности [14–16] различных деталей машин.

#### Исследование износа поверхности при фреттинге

Для проведения испытаний на износ при фреттинге и фреттинг-коррозии была спроектирована конструкция и изготовлена установка [17], отвечающая требованиям ГОСТ 23.211-80 на проведения подобного типа испытаний (рис. 4). Установка позволяет проводить испытания на фреттинг трибосопрежений типа «вал–втулка» или «вал–полувтулка» (рис. 5) в диапазоне амплитуд взаимного смещения от 10 до 200 мкм при нагрузке от 5 до 20 МПа.

Испытания на износ при фреттинге проводились на образцах (рис. 5) из титанового сплава ВТ6, обработанных по следующим вариантам (табл. 1):

**вариант 1:** полирование без упрочнения (П), исходное состояние;

**вариант 2:** П + ионная очистка аргоном (ИО- $Ar^+$ ) + ионная имплантация азота (ИИ- $N^+$ );

**вариант 3:** П + ИО- $Ar^+$  + ИИ- $N^+$  + вакуумно-плазменное покрытие нитридом титана (TiN) толщиной 8–9 мкм;

**вариант 4:** П + ИО- $Ar^+$  + ИИ- $N^+$  + многослойное вакуумно-плазменное покрытие (Ti-TiN) толщиной 15–18 мкм;

**вариант 5:** П + ИО- $Ar^+$  + ИИ- $N^+$  + Ti-TiN толщиной 23–25 мкм;

**вариант 6:** П + ИО- $Ar^+$  + ИИ- $N^+$  + Ti-TiN толщиной 40–43 мкм;

**вариант 7:** П + детонационное нанесение покрытия карбида вольфрама WC (80%) + Co (20%);

**вариант 8:** П + сверхзвуковое нанесение покрытия WC (86%) + Co (10%) + Cr (4%).

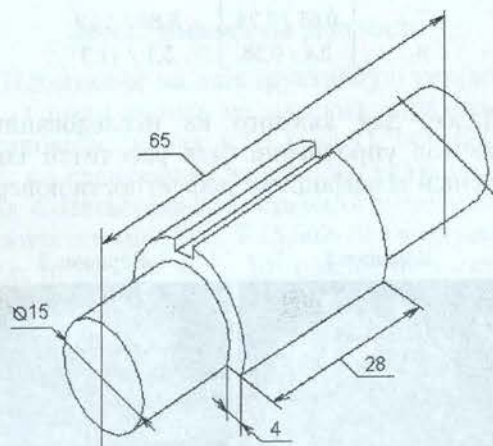


Рис. 5. Испытываемое на фреттинг сопряжение «вал–полувтулка»

Испытания были проведены на базе  $2 \cdot 10^5$  циклов на электродинамическом стенде ВЭС-500 при следующих режимах, моделирующих условия эксплуатации рабочих лопа-



ток компрессора низкого давления газотурбинного двигателя:

- удельное давление в месте контакта 10 МПа (1 кгс/мм<sup>2</sup>);
- амплитуда взаимного смещения образцов  $100 \pm 25$  мкм;
- частота относительных колебаний от 100 до 130 Гц.

В результате испытаний на поверхности образцов было сформировано характерное для фреттинга пятно контакта со вторичными продуктами износа: окислами и частицами материала разрушенной поверхности, следами абразивного воздействия, усталостными микротрещинами, рис. 6.

Для оценки дефектности поверхности и расчета коэффициента фреттинг-стойкости по пятну контакта были сняты профилограммы и определены основные характеристики шероховатости:  $Ra$  и максимальное отклонение профиля  $R_{max}$  (табл. 1).

Таблица 1  
Результаты исследования шероховатости поверхности

Вариант метода обработки	Перед испытаниями / после испытаний	
	$Ra_1/Ra_2$	$R_{max1}/R_{max2}$
1	0,32 / 2,5	2,51 / 43,6
2	0,32 / 0,33	3,68 / 5,28
3	0,23 / 0,49	2,48 / 5,09
4	0,69 / 0,85	5,26 / 5,09
5	0,78 / 0,79	4,98 / 5,98
6	0,68 / 0,68	5,81 / 5,38
7	0,65 / 1,24	8,86 / 14,2
8	0,4 / 0,58	5,1 / 11,3

Далее, для каждого из исследованных вариантов упрочнения был рассчитан комплексный коэффициент дефектности поверх-

ности:

$$k = Ra(1 - Ra/R_{max}) \in (0 \dots Ra). \quad (1)$$

При стремлении величины максимального отклонения профиля к величине шероховатости поверхности ( $R_{max} \rightarrow Ra$ ) коэффициент  $k \rightarrow 0$ , что соответствует минимальной (величине) дефектности поверхности. В этом случае поверхность лишена концентраторов напряжений в виде глубоких впадин профиля шероховатости: рисок, царапин. И наоборот, при наличии поверхностных дефектов: вырывов, каверн, питтингов и других, величина максимального отклонения профиля будет намного превышать шероховатость поверхности ( $R_{max} \gg Ra$ ), при этом (коэффициент)  $k \rightarrow Ra$ . Расчеты коэффициента дефектности поверхности  $k$ , а также его изменение  $dk$  в результате износа при фреттинге приведены в табл. 2.

Коэффициент фреттинг-стойкости поверхности рассчитывали как отношение коэффициентов дефектности:  $k_1$  — перед и  $k_2$  — после испытаний:

$$dk = k_2/k_1. \quad (2)$$

Расчетные значения коэффициента фреттинг-стойкости приведены в табл. 2.

По изменению коэффициента дефектности  $dk$  можно судить о динамике изменения параметров шероховатости  $Ra$  и  $R_{max}$  в результате фреттинга. Уменьшение коэффициента  $dk < 1$  ( $k_2 < k_1$ ) указывает на то, что в результате фреттинг-износа величина шероховатости  $Ra$  увеличивается быстрее, чем величина максимального отклонения профиля  $R_{max}$  (по формуле (1)), что свидетельствует о протекании нормального, равномерного износа без образования дефектов поверхности в виде (поверхностных) концентраторов напряжений: вырывов, микротрещин.

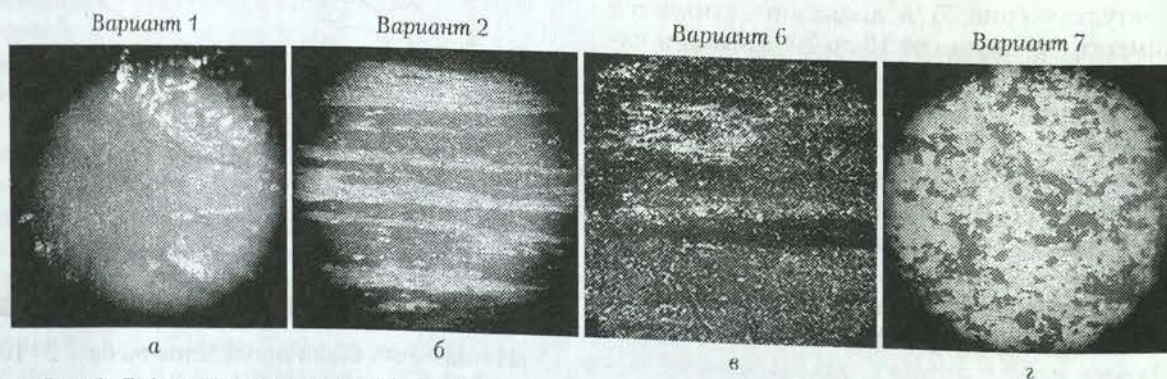


Рис. 6. Дефекты поверхности в области пятна контакта, характерные для фреттинг-изнашивания,  $\times 600$ : а — пленка окислов, б — следы абразивного воздействия с частицами разрушенного материала поверхности, в — пленка окисла и следы абразивного воздействия, г — питтинги и объединяющие их микротрещины



Таблица 2

## Результаты расчета коэффициента фреттинг-стойкости

Вариант метода обработки	Коэффициент дефектности поверхности перед и после испытаний на фреттинг			Коэффициент фреттинг-стойкости $D = (dk)_1 / (dk)_{i=1..s}$
	перед испытанием $k_1$	после испытания $k_2$	изменение $dk = k_2/k_1$	
1	0,28	2,36	8,44	1
2	0,28	0,48	1,69	5,01
3	0,21	0,44	2,12	3,98
4	0,60	0,71	1,18	7,15
5	0,66	0,69	1,04	8,10
6	0,60	0,59	0,99	8,53
7	0,60	1,13	1,88	4,49
8	0,37	0,55	1,49	5,65

При увеличении  $dk > 1$  ( $k_2 > k_1$ ), наоборот, величина  $R_{\max}$  увеличивается быстрее, чем величина  $R_a$ , что свидетельствует об образовании больших отклонений профиля поверхности, возникновении различных дефектов и концентраторов напряжения.

Для сравнения вариантов упрочнения между собой и выбора наиболее предпочтительного был рассчитан коэффициент фреттинг-стойкости (табл. 2), показывающий во сколько раз изменяется стойкость образцов после упрочнения по сравнению с исходным состоянием, полирование без упрочнения.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что все из исследованных методов обработки в той или иной степени препятствуют развитию поверхностных дефектов при фреттинге и могут применяться для повышения стойкости к изнашиванию при фреттинге. При этом наиболее предпочтительным является вакуумно-плазменное нанесение многослойного покрытия системы Ti-TiN толщиной от 15 до 43 мкм (варианты обработки 4–6), повышающие фреттинг-стойкость поверхности по сравнению с исходным состоянием (полирование без упрочнения) более чем в 7 раз.

### Исследование микротвердости поверхности

Исследование микротвердости поверхности образцов из титанового сплава ВТ6 после различных методов упрочняющей обработки проводилось на приборе НЕОРНОТ-21 при нагрузке 0,50 Н по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 9450-76. Результаты измерений приведены в табл. 3. Полученные данные позволяют судить об изменении прочности поверхности и оценить влияние каждой

из исследованных обработок на стойкость к изнашиванию при фреттинге.

Таблица 3

## Результаты исследования микротвердости HV

Вариант метода обработки	Перед испытанием	После испытания
1	437	364
2	619	623
3	1097	973
4	1865	1342
5	2335	1783
6	2433	1950
7	1145	462
8	954	582

### Исследование на усталость

Испытания на конструктивную усталость ( $\sigma_{-1}$ ) проводились на плоских образцах из титанового сплава ВТ6 (рис. 7), обработанных по следующим вариантам, указанным в табл. 4. Испытания на усталость выполнялись в соответствии с ГОСТ 25.502-79 в воздушной среде на базе  $N = 2 \cdot 10^7$  циклов на электродинамическом вибростенде ВЭДС-400. После испытаний все образцы подвергались люминесцентному контролю для выявления возможных трещин.

Полученные результаты усталостных испытаний представлены в табл. 4.

### Результаты исследований

1. Установлено, что все из исследованных методов обработки препятствуют развитию поверхностных дефектов образцов из титанового сплава ВТ6 при фреттинге и могут



применяться для повышения их фреттинг-стойкости. При этом наиболее предпочтительной является комбинированная вакуумная ионно-имплантационная обработка с последующим нанесением многослойного вакуумно-плазменного покрытия системы Ti-TiN толщиной от 15 до 43 мкм, обеспечивающая повышение целого комплекса эксплуатационных характеристик:

- коэффициента фреттинг-стойкости до 7 раз;
- усталостной прочности на 20% (до  $\sigma_{-1} = 480$  МПа);
- абразивной стойкости поверхности более чем в 2–3 раза.
- величины микротвердости, которая остается наибольшей как в исходном состоянии, так и после испытания на фреттинг-износ по сравнению с другими вариантами обработки.

2. Разработаны режимы высокоскоростного нанесения многослойного покрытия системы Ti-TiN со скоростью  $v = 20$  мкм/ч при неподвижном объекте и  $v = 10$  мкм/ч при вращающемся вокруг собственной оси объекте.

3. Разработана технология упрочнения материала лопаток из сплава ВТ6 методом ионной имплантации с нанесением многослойного покрытия из нитрида титана толщиной до 43 мкм.

4. Сформулированы технологические рекомендации по ее использованию.

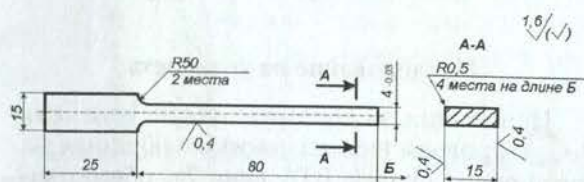


Рис. 7. Образец для усталостных испытаний

Таблица 4  
Результаты испытаний  
на усталостную прочность

Вариант метода обработки	Усталостная прочность на базе $N = 2 \cdot 10^7$ циклов, $\sigma_{-1}$ , МПа
1	400
2	480
5	440
6	400
7	340
8	380

## Обсуждение результатов

Проведенные исследования комплекса эксплуатационных свойств образцов из титанового сплава ВТ6 после различных технологических методов упрочнения показывают, что наиболее предпочтительным из исследованных вариантов является комбинированная вакуумная ионно-имплантационная обработка с последующим нанесением многослойного вакуумно-плазменного покрытия системы Ti-TiN. Она обеспечивает повышение фреттинг-стойкости, конструктивной усталости, и сопротивление поверхности абразивному износу. В настоящее время по предлагаемой технологии обработаны и находятся в эксплуатации рабочие лопатки паровой турбины ТЭС «Альхолма» (производства ОАО «ЛМЗ», Санкт-Петербург), рабочие лопатки осевого компрессора газоперекачивающего аппарата ГТК 10-4 ООО «Тюментрансгаз». Обработаны стойки и сектора направляющего аппарата газоперекачивающего агрегата АЛ31СТ (производства ОАО «УМПО», Уфа), рис. 8.

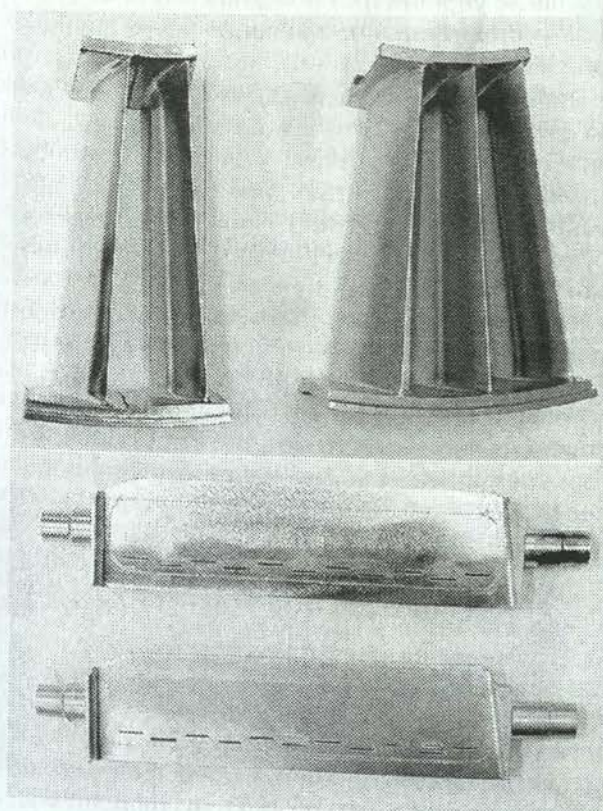


Рис. 8. Стойка и сектор направляющего аппарата газоперекачивающего агрегата АЛ-31СТ после упрочняющей обработки



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петухов, А. Н.** Сопротивление усталости деталей ГТД / А. Н. Петухов. М. : Машиностроение, 1993. 232 с.
2. **Любимов, Р. В.** Прогнозирование и технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД, работающих в условиях фреттинг-коррозии : дис. канд. техн. наук / Р. В. Любимов. Рыбинск : РГАТА, 2000. 193 с.
3. **Ковшов, А. Г.** Разработка триботехнических методов расчета и повышения фреттинг-стойкости деталей турбокомпрессоров из сплавов титана BT9 и BT3-1 : дис. ... канд. техн. наук / А. Г. Ковшов. Киев : Киевск. ин-т инженеров гражд. авиации. 1988. 129 с.
4. **Петухов, А. Н.** Усталость замковых соединений лопаток компрессоров / А. Н. Петухов // Труды ЦИАМ. № 1213. М., 1987. 36 с.
5. **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника / Д. Н. Гаркунов. М. : Машиностроение, 1985. 423 с.
6. **Голего, Н. Л.** Фреттинг-коррозия металлов / Н. Л. Голего [и др.]. Киев : Техніка, 1974. 272 с.
7. **Ермичев, В. А.** Исследование фреттинг-стойкости пленок пластичных металлов / В. А. Ермичев [и др.] // Трение и износ. 1998. № 3. С. 398–400.
8. **Улиг, Г. Г.** Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / Г. Г. Улиг, Р. У. Реви. Л. : Химия, Ленингр. отд., 1989. 455 с.
9. **Алябьев, А. Я.** Влияние плазменного напыления на усталостную прочность стали 30ХГСА в условиях фреттинг-коррозии / А. Я. Алябьев [и др.] // Физико-химическая механика материалов. 1977. № 4. С. 11–15.
10. **Белый, В. А.** Ионная имплантация и создание триботехнических материалов. Трибология. Исследование и приложения: опыт США и стран СНГ / под. ред. В. А. Белого [и др.]. М. : Машиностроение, 1993. С. 220–236.
11. **Белый, В. А.** Применение ионного легирования для повышения эксплуатационных характеристик деталей машин и оборудования / В. А. Белый [и др.]. Минск : БелНИИТИ, 1985. 44 с.
12. **Смыслов, А. М.** Комбинированные технологии на базе ионно-имплантационного модифицирования поверхности, обеспечивающие повышение ресурса и надежности лопаток компрессора и турбины ГТД : дис. ... д-ра техн. наук / А. М. Смыслов. Уфа : УАИ, 1993. 326 с.
13. **Смыслов, А. М.** Повышение эксплуатационных свойств лопаток компрессора из титановых сплавов ионным модифицированием поверхности на установке «ВИТА» / А. М. Смыслов [и др.] // Авиационная промышленность. 1992. № 5. С. 18–24.
14. **Хирвонен, Д.** Ионная имплантация / под ред. Д. Хирвонена. М. : Металлургия, 1985. 391 с.
15. **Рисел, Х.** Ионная имплантация / Х. Рисел, И. Руге. М. : Мир, 1983. 360 с.
16. **Васильев, В. Ю.** Влияние имплантации ионов молибдена и вольфрама на коррозионную стойкость стали 0X18H10T / В. Ю. Васильев [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. 1984. № 5. С. 144–147.
17. **Пат. РФ № 2173846 на изобретение.** Устройство и способ испытания на стойкость при фреттинге и фреттинг-коррозии / Н. И. Коробейников [и др.].

## ОБ АВТОРАХ



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



**Селиванов Константин Сергеевич**, ст. науч. сотр. той же каф. Дипл. инж.-механик (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2000). Иссл. свойств поверхности после ионно-имплантационного и вакуумно-плазменного модифицирования.