

УДК 621.452.3 – 42:621.793

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ВАКУУМНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ЛОПАТОК ГТД С КОНЦЕНТРАТОРОМ

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

tm@usatu.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 18.10.2016

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы, связанные с исследованием сопротивления усталости и параметров поверхностного слоя лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава ВТ6 после комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки. Выполнено фрактографическое исследование изломов после испытаний на усталость с концентратором напряжений.

**Ключевые слова:** остаточные поверхностные напряжения; обработка; лопатка; сопротивление усталости.

Как известно, поверхностный слой играет большую роль в обеспечении сопротивления усталости различных деталей [1–3, 8, 9]. Качество их поверхности может быть охарактеризовано микрогеометрией неровностей, физико-химическим и структурно-фазовым составом, глубиной и степенью наклепа, остаточными напряжениями, возникающими в процессе обработки деталей [4]. Остаточные напряжения продолжают действовать в деталях при отсутствии внешних сил.

В настоящее время в большинстве случаев традиционные методы отделочно-упрочняющей обработки применительно к новым конструктивным исполнениям лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) исчерпали свои возможности по обеспечению качества поверхности и эксплуатационных свойств. Учитывая, что в условиях длительной эксплуатации их разрушения, как правило, начинаются с поверхности, либо в тонком поверхностном слое, который формируется на окончательных этапах обработки, представляют особый интерес методы, обеспечивающие требуемые эксплуатационные свойства. Важнейшей характеристикой лопаток компрессора является сопротивление усталости, которое также во многом обусловлено эрозионными и коррозионными процессами на их профильной части.

Вместе с тем по опыту многих предприятий в настоящее время большой интерес в производстве лопаток ГТД представляют технологии,

включающие ионную имплантацию с последующим нанесением многослойных вакуумно-плазменных защитных покрытий – комплексная вакуумная ионно-плазменная обработка (КВИПО), в том числе для решения задач защиты от коррозии и эрозии.

С целью изучения влияния повреждений на усталостную долговечность лопаток компрессора из титанового сплава ВТ6 были проведены их сравнительные испытания на усталость при наличии концентратора напряжений.

Одним из наиболее эффективных и современных методов обработки поверхностного слоя, позволяющим кардинально изменить его физико-химическое и структурно-фазовое состояние и, как следствие, повысить предел выносливости и циклическую долговечность, является ионное модифицирование (имплантация). Большой вклад в развитие этой области внесли работы ученых М. И. Гусевой, Н. Н. Коваля, Ю. Р. Колобова, Ф. Ф. Комарова, Н. А. Ночовой, В. В. Овчинникова, Дж. Поута, А. И. Рябчикова, Ю. П. Шаркеева, В. А. Шулова, Дж. Хирвонена и других.

Известно, что КВИПО включает в себя последовательное проведение процессов ионной очистки, ионного модифицирования поверхностного слоя и нанесение вакуумного ионно-плазменного многослойного покрытия (работы В. А. Барвинка, С. Н. Григорьева, С. А. Мубояджана и др.). Вместе с тем применительно к лопаткам компрессора ГТД из титановых сплавов не в полной мере изучены их элементный и

структурно-фазовый состав, шероховатость, микротвёрдость, остаточные напряжения (в частности, в местах возникновения усталостных трещин) при КВИПО в сравнении с серийной технологией на стадии изготовления, а также после длительной эксплуатационной наработки в составе полноразмерного изделия.

В большинстве случаев в практике производства деталей для определения остаточных напряжений используются механические методы, основанные на измерении прогибов или деформаций деталей при их разрезке, высверливании, снятии слоев [10]. Другим направлением определения остаточных напряжений являются физические методы, в частности, рентгеновский метод, основанный на измерении эффектов, определяющих степень искажения кристаллической решетки [11]. Следует отметить, что рентгеновский метод позволяет определять средние остаточные напряжения первого рода в поверхностном слое толщиной 30–50 мкм.

Исследование сопротивления усталости образцов из сплава Ti-6Al-4V в зависимости от уровня остаточных напряжений в поверхностном слое (по данным ФГУП «ЦИАМ») показало, что при прочих равных условиях (шероховатость образцов ~ 0,5 мкм, глубина залегания максимальных остаточных напряжений 50 мкм) предел выносливости образцов с остаточными напряжениями на базе  $10^7$  циклов отличается от предела выносливости образцов без остаточных напряжений, причем сжимающие остаточные напряжения увеличивают предел выносливости, а растягивающие – уменьшают. Поэтому упрочнение поверхности, приводящее к образованию сжимающих остаточных напряжений, благоприятно влияет на сопротивление усталости. Однако в условиях воздействия повышенных температур, что характерно для лопаток компрессора последних ступеней ГТД происходит интенсификация диффузионных процессов в наклепанном слое, релаксация остаточных напряжений, разупрочнение слоя и, как следствие, снижение предела выносливости.

Длительные стендовые испытания ГТД, а также их эксплуатация в составе полноразмерных изделий показывает, что наличие растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое является причиной образования и развития усталостных трещин [5] и, как следствие, снижение циклической долговечности лопаток.

## ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ

В работе изучалось влияние на сопротивление усталости лопаток 2 ступени компрессора вентилятора ГТД следующих вариантов обработки поверхности: КВИПО и виброшлифования (финишная серийная обработка). Лопатки изготавливались из титанового сплава средней прочности ВТ6 (Ti-6Al-4V) с двухфазной ( $\alpha+\beta$ )-структурой со следующими механическими свойствами:  $\sigma_e = 1064$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 940$  МПа,  $\delta = 16\%$ ,  $\psi = 41\%$ ,  $S_k = 1655$  МПа. Данный титановый сплав может применяться как в отожженном, так и в закаленном состоянии. Его предел выносливости может быть повышен на 25–30 % по сравнению с отожженным состоянием посредством упрочняющей термической обработки. В связи с невысокой прокаливаемостью сплава, детали, предназначенные для упрочняющей термической обработки, должны иметь размеры сечения, не превышающие 30–40 мм [6].

Проведённым исследованием микрогеометрии поверхности показало, что после КВИПО наблюдается уменьшение параметра Ra – в 1,4 раза, а Rz – в 1,5 раза по сравнению с базовой технологией обработки – виброшлифованием.

Исследование микротвёрдости выполнялось на приборе ПМТ-3. По результатам исследования получено, что эквивалентная наработка  $\tau = 33\%$  в составе полноразмерного ГТД исследуемых вариантов окончательной обработки поверхности пера лопаток под действием температуры и знакопеременных нагрузок приводит к её разупрочнению и, как следствие, снижению микротвёрдости. Так для технологии виброшлифования значение микротвёрдости на поверхности составляет 4200 МПа, а для КВИПО – 23380 МПа. После эквивалентной наработки микротвёрдость снижается до 4039 МПа для виброшлифованных лопаток и до 21020 МПа для лопаток после КВИПО.

Комплексную вакуумную ионно-плазменную обработку лопаток производили на установке УВН-1БС с источником газовой плазмы с накальным катодом ПИНК и аксиально-симметричными электродуговыми испарителями. Наносили многослойное защитное покрытие толщиной  $h = 12-16$  мкм системы  $(Ti-Ti_2N-TiN) \cdot n$ , где  $n$  – число слоев, см. рис. 1. Режим обработки включал в себя: очистку ионами Ag; ионное модифицирование  $N^+$ ; ионную очистку  $Ti^+$ ; последовательное нанесение покрытия  $(Ti-Ti_2N-TiN) \cdot n$  – раз.



**Рис. 1.** Наклонный шлиф по входной кромке лопатки 2 ст. КНД из титанового сплава ВТ6 – многослойное покрытие системы (Ti–Ti<sub>2</sub>N–TiN)-n в результате КВИПО

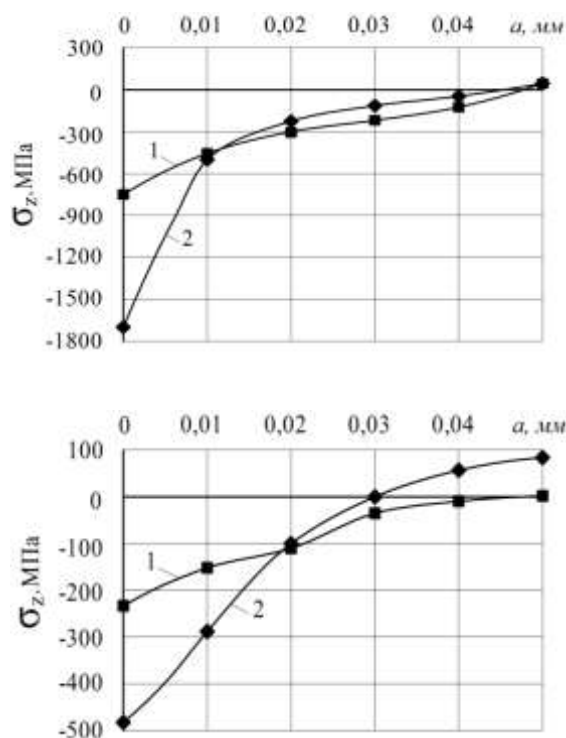
### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Определение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя лопаток производилось методом полосок академика Н. Н. Давиденкова на установке, прототипом которой служил прибор ПИОН. Основные экспериментальные методики определения остаточных напряжений изложены в работах [2, 7]. Для исследования остаточных напряжений в поверхностном слое из лопаток электроэрозионным способом вырезались образцы (полоски). Статистически обработанные результаты исследования представлены на рис. 2.

Проведенные исследования показали, что глубина поверхностного слоя, на которой остаточные напряжения меняют знак, составляет для КВИПО 30–45 мкм, что несколько меньше, чем для серийной технологии – 40–50 мкм. В лопатках, изготовленных по технологии КВИПО, как в исходном состоянии, так и после эксплуатационной наработки наблюдается уровень максимальных сжимающих остаточных напряжений, соответственно, в 2,4 и в 1,9 раза больший, чем в лопатках, изготовленных по серийной технологии. Это свидетельствует о большей релаксационной стойкости остаточных напряжений в варианте применения технологии КВИПО.

Таким образом, КВИПО в процессе эксплуатации оказывает благоприятное влияние и на релаксационную стойкость остаточных напряжений лопаток, что объясняется иной природой возникновения остаточных напряжений, в сравнении с методами поверхностного пластического деформирования – комплексным влиянием дислокационного, твердорастворного и дисперсионного механизмов. Указанная природа связана с различием в кристаллических решетках материалов основы, имплантированного вещества и покрытия, а также с иными механизмами релаксации (движение дислокаций тормозится

границами слоев покрытия и структуры). При этом диффузия в имплантированном материале и релаксация с пониженными скоростями приводит к переходу остаточных напряжений на другой, более высокий уровень [9].



**Рис. 2.** Осевые остаточные напряжения в поверхностном слое лопаток компрессора: в исходном состоянии и после наработки в течение  $\tau = 33\%$ :

1 – серийная технология; 2 – КВИПО

### ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ

Испытания на усталость лопаток после длительной наработки в составе полноразмерного изделия проведенные в условиях симметричного изгиба по первой (основной) форме колебаний при комнатной температуре показали, что после эксплуатации ( $\tau = 33\%$ ) наблюдается снижение пределов выносливости по серийной технологии до 380 МПа и 420 МПа – по КВИПО соответственно.

При этом установлено, что рассеяние по долговечности для кривых усталости сплава ВТ6 после КВИПО в 1,5–1,8 раза меньше по сравнению с серийной технологией.

Построенные графически кривые усталости с вероятностью  $p = 0,5$  показали, что для технологии КВИПО кривая имеет меньший наклон –

Таблица 1

показатель кривой усталости  $m_0 = 10,4$ , для базового варианта  $m_c = 5,6$  (что отражает характеристику живучести), соответственно, можно предположить большую долговечность деталей в сравнении с серийным вариантом обработки. После эквивалентной наработки  $\tau = 33 \%$  для КВИПО показатель  $m_0 = 13,1$ , а для серийного варианта  $m_c = 7,4$ .

В дальнейшем были проведены исследования по влиянию концентратора напряжений имитирующего забоину на кромке рабочих лопаток КНД из сплава ВТ6 на их усталостную долговечность в условиях симметричного изгиба по первой (основной) форме колебаний при комнатной температуре.

Концентратор (рис. 3) представлял собой забоину глубиной 0,3 мм, выполнялся специальным электродом на электроэрозионном станке. Размеры концентратора выбирались исходя из имеющегося опыта ремонтной работы с лопатками после эксплуатационной наработки в составе полноразмерного изделия.

Испытания на усталость проводились на электродинамическом вибростенде ВЭДС-400 при симметричном цикле нагружения по первой изгибной форме колебаний, при комнатной температуре на трех уровнях напряжений.

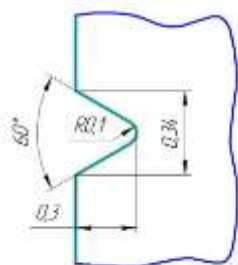


Рис. 3. Вид и размеры концентратора напряжений

За критерий разрушения принималось снижение резонансной частоты колебаний на 10 Гц. После испытаний лопатки проверялись неразрушающим методом контроля ЛЮМ 1-ОВ.

Проведённый анализ изломов показал, что все очаги трещин усталости локализованы во впадине концентратора. Разрушения носят усталостный характер, металлургических дефектов в основе материала исследуемых образцов не обнаружено. Трещины усталости имеют сквозное распространение. Данные по сравнительной наработке исследуемых деталей приведены в табл. 1.

№	Напряжение, МПа	Отношение наработки КВИПО / серийная технология
1	350	1,03
2	300	1,21
3	280	1,25
СРЕДНЕЕ		1,16

Таким образом установлено, что КВИПО поверхности пера лопаток обеспечивает формирование более стабильного напряженного состояния с преобладанием напряжений сжатия в условиях ионной имплантации и многослойного защитного вакуумного ионно-плазменного покрытия. При этом средняя наработка (долговечность) лопаток после КВИПО в среднем в 1,16 раза выше, чем лопаток, обработанных по серийной технологии.

#### ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗЛОМОВ

После проведения испытаний на усталость лопаток с концентратором напряжений для изучения механизма разрушения были вскрыты изломы и выполнен их фрактографический анализ методом просвечивающей микроскопии на растровом электронном микроскопе модели JSM-6490LV. На рис. 4 приведена фотография излома по вскрытой трещине лопатки серийного варианта технологии.

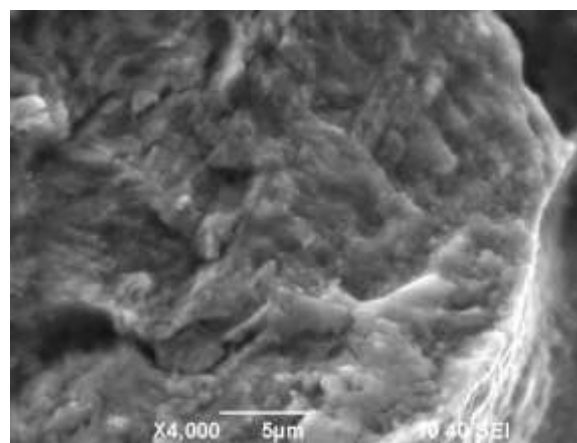
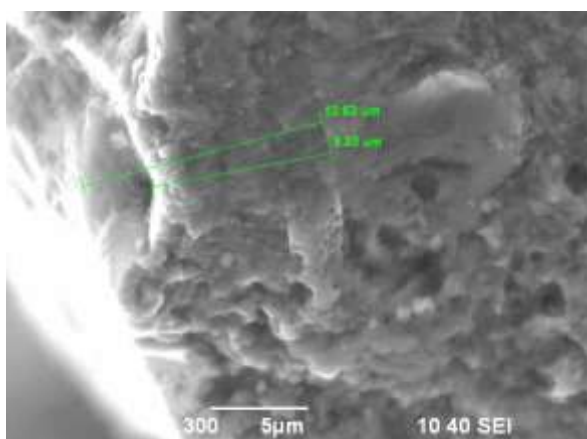


Рис. 4. Излом лопатки, материал ВТ6, серийная технология, с концентратором, 5 мкм от очага,  $\times 4000$

Установлено, что по линии надреза имеются множественные очаги, рельеф излома бугристый, микротрещины более разориентированы и получили свое развитие в разных направлениях.

Получено, что на расстоянии 5 мкм от очага ширина усталостных бороздок составляет 0,55–0,65 мкм. По мере движения трещины от очага она увеличивается и на расстоянии 50 мкм ширина бороздок составляет 0,65–0,70 мкм.

На рис. 5 приведена фотография излома по вскрытой трещине лопатки после выполнения КВИПО.



**Рис. 5.** Излом лопатки, материал VT6, КВИПО, с концентратором, 5 мкм от очага,  $\times 4300$

По результатам исследования получено, что на расстоянии 5 мкм от очага ширина усталостных бороздок составляет 0,25–0,30 мкм, а на расстоянии 50 мкм – 0,45 мкм, что на 0,20–0,25 мкм меньше, чем у лопатки, изготовленной по серийной технологии.

При движении вдоль линии надреза отмечаются также множественные усталостные очаги, образующие общий фронт развития магистральной трещины, преимущественно в одном направлении в непересекающихся плоскостях. Характер рельефа фрактографического излома сглаженный, при этом каких-либо признаков охрупчивания покрытия не выявлено.

По результатам проведенного фрактографического исследования установлено различие в местах образования очагов изломов лопаток, изготовленных по серийной технологии и КВИПО. Очаги усталостных изломов лопаток, изготовленных по серийной технологии, расположены на поверхности, в то время как для лопаток с КВИПО характерно наличие подповерхностных очагов зарождения усталостных трещин глубиной залегания 3–5 мкм от границы основной ма-

териал – покрытие. Механизм усталостного разрушения на образцах с КВИПО тот же, что и на образцах без покрытия. Однако наличие модифицированного слоя и многослойного покрытия способствует релаксации остаточных напряжений с пониженными скоростями, что является сдерживающим фактором при развитии усталостной трещины и положительно влияет на долговечность лопаток.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что комплексная вакуумная ионно-плазменная обработка поверхностного слоя пера лопаток компрессора из титанового сплава VT6 повышает предел выносливости на 10% и обеспечивает меньшее его снижение при длительной эксплуатации по сравнению с серийной технологией изготовления.

Выявлено, что в результате использования КВИПО лопаток компрессора в поверхностном слое формируется стабильное напряженно-деформированное состояние, обеспечивающее большую релаксационную стойкость с меньшим рассеянием остаточных напряжений в поверхностном слое по сравнению с лопатками, изготовленными по серийной технологии.

Установлено, что очаги усталостных изломов лопаток, изготовленных по серийной технологии, расположены на поверхности, в то время как для лопаток с КВИПО характерно наличие подповерхностных очагов зарождения усталостных трещин на глубине 3–5 мкм от границы «основной материал–покрытие».

Испытания на усталость при наличии концентратора напряжений (забоины) показали, что долговечность лопаток, обработанных КВИПО в 1,16 раза выше, чем у виброшлифованных лопаток.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев И. В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении. М.: Mashgiz, 1971. 278 с. [ I. V. Kudryavtsev, *Internal stresses as a reserve of strength in mechanical engineering*, (in Russian). Moscow: Mashgiz, 1971. ]
2. Биргер И. А. Остаточные напряжения. М.: Mashgiz, 1963. 232 с. [ I. A. Birger, *Residual stresses*, (in Russian). Moscow: Mashgiz, 1963. ]
3. Сулима А. М., Евстигнеев М. И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1974. 256 с. [ A. M. Sulima and M. I. Evstigneev, *The quality of the surface layer and the fatigue strength of parts made of heat-resistant and titanium alloys*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1974. ]
4. Жернаков В. С. Сопротивление материалов – механика материалов и конструкций. Уфа: УГАТУ, 2012. 495 с. [ V. S. Zhernakov, *Strength of Materials – Mechanics of materials and structures*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2012. ]

5. **Абраимов Н. В., Елисеев Ю. С., Крымов В. В.** Авиационное материаловедение и технология обработки металлов. М.: Высшая школа, 1998. – 444 с. [ N. V. Abraimov, Y. S. Eliseev, V. V. Krymov, *Aviation Materials and technology of metal working*, (in Russian). Moscow: Vicshaya Shkola, 1998. ]

6. **Солонина О. П., Глазунов С. Г.** Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 448 с. [ O. P. Solonina and S. G. Glazunov, *Aviation Materials and technology of metal working*, (in Russian). Moscow: Metallurgy, 1976. ]

7. **Рахмарова М. С., Серебренников Г. З.** Определение остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток двигателей. М.: НИАТ, 1965. 20 с. [ M. S. Rahmarova, G. Z. Serebrennikov, *Determination of residual stresses in the surface layer of the pen engine blade*, (in Russian). Moscow: NIAT, 1965. ]

8. **Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Вакулук В. С.** Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. 125 с. [ V. F. Pavlov, V. A. Kirpichev, V. S. Vakulyuk, *Prediction of fatigue strength of surface hardened components for residual stresses* (in Russian). Samara: Publisher SSC of RAS, 2012. ]

9. **Смыслов А. М., Смыслова М. К., Дубин А. И.** К вопросу о релаксационной стойкости лопаток компрессора из титановых сплавов // Вестник СГАУ. 2011. № 3 (27). Ч. 2. С. 227–232. [ A. M. Smyslov, M. K. Smyslova, A. I. Dubin "On the question of the relaxation resistance of compressor blades made of titanium alloys", (in Russian), in *Vestnik SGAU*, no. 3 (27), part 2, pp. 227-232, 2011. ]

10. **Подзей А. В., Сулима А. М., Евстигнеев М. И.** Технологические остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1973. 216 с. [ A. V. Podzey, A. M. Sulima, M. I. Evstigneev, *Technological residual stresses*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1973. ]

11. **Миркин Л. И.** Рентгеноструктурный анализ машиностроительных материалов: справочник. М.: Машиностроение, 1979. 132 с. [ L. I. Mirkin, *X-ray analysis of engineering materials*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1979. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**СМЫСЛОВ Анатолий Михайлович**, проф. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепл. двигателям лет. аппаратов (УГАТУ, 1993), Иссл. в обл. ионно-имплант. и вакуумно-плазм. модиф. поверхности.

**СМЫСЛОВА Марина Константиновна**, доцент каф. оборуд. и технол. свар. производства. Дипл. инж.-технол. (УАИ, 1978). Канд. техн. наук по тепл. двигателям лет. аппаратов (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. ионно-имплант. и вакуумно-плазм. модиф. поверхности.

**ДУБИН Алексей Иванович**, ст. преподават. каф. технологии машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по динамике и прочности машин (СГАУ, 2015). Иссл. в обл. сопротивл. усталости, релакс. стойкости и остат. напряжений.

#### METADATA

**Title:** Research of the complex vacuum ion-plasma treatment effect on the fatigue strength of GTE blades with the concentrator.

**Authors:** A.M. Smyslov<sup>1</sup>, M.K. Smyslova<sup>1</sup>, A.I. Dubin<sup>1</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>tm@usatu.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 3 (73), pp. 38-43, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The problems of the fatigue strength study and surface layer parameters of a gas turbine engine compressor blades from titanium alloy VT6 after complete vacuum ion-plasma treatment are considered. Fractometrical analysis breaks after fatigue tests with a stress concentrator is achieved.

**Key words:** Surface residual stresses; treatment; blade; fatigue strength.

**About authors:**

**MAKAROVA, Ekaterina Sergeevna**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Automated Systems. Master of Technics & Technology (UGATU, 2010).

**MIRONOV, Valeriy Viktorovich**, Prof., Dept. of Automated Systems. Dipl. Radiophysicist (Voronezh State Univ., 1975). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 1978), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 1995).

**SMYSLOV, Anatoliy Mikhaylovich**, Prof., Dept. of Mechanical Engineering Technology. Dipl. engineer-technol. (UAI, 1973). Dr. of Tech. Sci. in heat engines of aircraft (UGATU, 1993). Investigation in area of ion-implantation and vacuum-plasma surface modification.

**SMYSLOVA, Marina Konstantinovna**, Assoc. Prof., Dept. of Engineering Technology and Welding Equipment Production. Dipl. engineer-technol. (UAI, 1978). Cand. of Tech. Sci. in heat engines of aircraft (UGATU, 1992). Investigation in area of ion-implantation and vacuum-plasma surface modification.

**DUBIN, Aleksey Ivanovich**, Senior Lect., Dept. of Mechanical Engineering Technology. Dipl. engineer-technol. (UGATU, 2000). Cand. of Tech. Sci. in dynamics and strength of machines (SGAU, 2015). Investigation of fatigue strength, relaxation resistance and surface residual stresses.