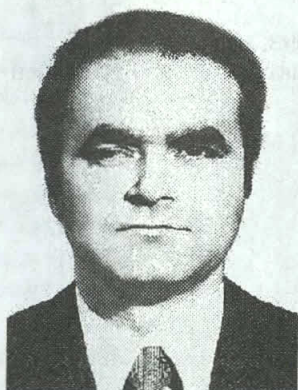


## ПРОБЛЕМЫ И КОНЦЕПЦИИ

УДК 621.438-192

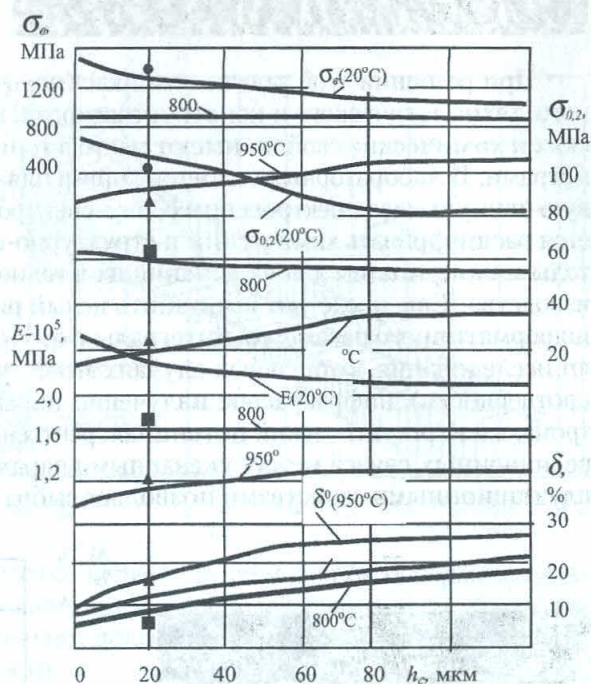
**В. С. МУХИН****КАЧЕСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ  
СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ ГТД  
В СВЯЗИ С ТЕХНОЛОГИЕЙ ИХ ОБРАБОТКИ****Мухин  
Виктор Сергеевич**

профессор, зав. кафедрой технологии машиностроения УГАТУ. Засл. деятель науки и техн. РБ и РФ. Член-корреспондент АН РБ, и. о. академика-секретаря отделения техн. наук. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1962). Д-р техн. наук (защ. в МАИ, 1975). Исследования в области повышения прочности, надежности и долговечности деталей технологическими методами; разработки новых технологий. Научный руководитель и консультант четырех докторов и более двух десятков кандидатов наук. Автор более 200 научных трудов, в том числе монографии «Модифицирование поверхностей деталей ГТД по условиям эксплуатации» (М.: Машиностроение, 1995) и учебного пособия «Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных материалов» (Уфа: УАИ, 1987, гриф Минвуза СССР).

**Э**ксплуатационные свойства деталей машин (надежность и долговечность) определяются конструкцией и технологией изготовления. При конструировании в зависимости от условий эксплуатации (ресурс, нагрузка, температура, окружающая среда) выбирается соответствующий материал, рассчитывается геометрический облик, выполняются прочностные расчеты, проводятся стендовые испытания и др. В этот период добиваются получения необходимых характеристик машины (или агрегата), например, газодинамических характеристик компрессора газотурбинного двигателя (ГТД). Безусловно, на этом же этапе в самом общем виде решается и «судьба» технологии изготовления: метод получения материала заготовки, термическая и химико-термическая обработка, методы формообразования и упрочнения, контроля, сборки и др. К наиболее сложным задачам для конструктора относятся выбор и назначение специальных технологий для модифицирования поверхностей деталей. С одной стороны, модифицирование поверхности (формирование специальной макро- и микрогеометрии собственно поверхности, изменение химического и структурно-фазового состава, твердости, прочностных и пластических свойств некоторого приповерхностного слоя) детали необходимо, ибо разрушение, как правило, начинается с поверхности и если не применить специальную технологию упрочнения (защиты), детали не будут обладать необходимыми прочностью, долговечностью и надежностью. С другой стороны, у конструктора нет необходимой информации, раскрывающей взаимосвязь между технологией (свойствами поверхности) и эксплуатационными свойствами материала детали. Даже для таких широко применяемых процессов, как резание и деформационное упрочнение (методы алмазного выглаживания, дробеструйная обработка, обкатка роликами и др.), конструктору не известны свойства металла поверхностного слоя, такие как: прочность и пластичность, коэффициент линейного расширения, модуль упругости, ударная вязкость и др. Лишь в отдельных случаях приводятся данные по свойствам металла поверхностного слоя после операций формообразования [1] (рис. 1). Если так, то выполнить с достаточной точностью

прочностные расчеты не представляется возможным. В этой связи на этапе создания машины, ее доводки и отработки технологии изготовления выполняется широкий спектр теоретико-экспериментальных работ, цель которых — обеспечить работоспособность деталей и тактико-технические характеристики изделия. И здесь важно конструктору иметь опережающий технологический задел, позволяющий на базе принципиально новых технологий создавать конструкции изделий новых поколений, как это было, например, при создании и освоении промышленностью электронно-лучевой сварки. На базе этой технологии конструкторам удалось реализовать совершенно новые подходы к конструированию, а технологам — к изготовлению ротора компрессора ГТД нового поколения [2].

Рис. 1. Эпюры изменения прочностных и пластических свойств по глубине поверхностного слоя дефлекторов из сплава ХН55ВМТФКЮ. Точение  $t = 0,5$  мкм,  $s = 0,1$  мм/об,  $v = 7$  м/мин. Графики построены по тарировочным зависимостям «твердость-свойство». Темные точки — прямые микромеханические испытания



При решении проблемы обеспечения прочности технологическими методами приходится решать целый ряд взаимосвязанных задач, относящихся к областям материаловедения, конструирования, технологии, диагностики, управления, моделирования и др., безусловно, с учетом экономических и экологических аспектов [3]. Касаясь решения этих задач, следует отметить, что технологическое воздействие на заготовку, как правило, приводит к кардинальным изменениям физико-механических свойств, химического и структурно-фазового состава металла поверхностного слоя. Для каждого процесса эти изменения разные, но они всегда имеют место. При формообразовании резанием, например, вследствие весьма высоких температур и контактных нагрузок, скорости и интенсивности пластической деформации, адгезионного и диффузионного процессов между инструментом и обрабатываемым материалом, приповерхностный слой толщиной до 40 мкм резко отличается по внутренней напряженности, структуре, химическому и фазовому составу, твердости, прочности, пластичности, ударной вязкости, коэффициенту линейного расширения и др. от основной массы детали (рис. 1, 2). Не менее резкие изменения свойств поверхности протекают при применении специальных методов деформационного упрочнения, ионной имплантации, обработке электронным лучом, лазером, электроискровым легированием, плазменном воздействии при создании покрытий и др. Именно эти изменения и легли впоследствии в основу создания специальных упрочняющих технологий. Однако изменения свойств металла поверхностного слоя протекают не только на всех этапах технологического воздействия вследствие технологической наследственности, но и постоянно происходят в процессе эксплуатации машины (при воздействии напряжений, температуры, агрессивных сред и др.) (рис. 3). При этом исходное, технологией определяемое состояние поверхности значительно влияет на интенсивность изменения (разупрочнения) поверхности при эксплуатации. Следовательно, способы придания поверхности специальных свойств, как и технология финишной обработки в целом, должны выбираться в строгой зависимости от условий эксплуатации детали (по температуре, окружающей среде, нагрузкам, ресурсу и др.).

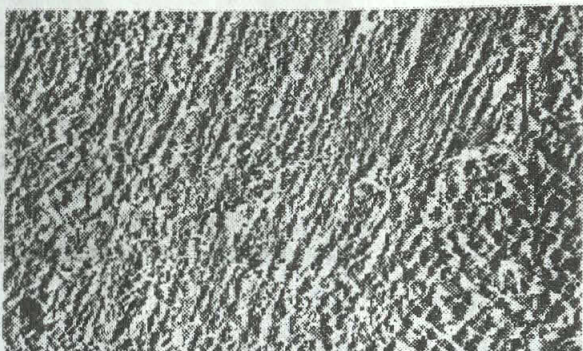


Рис. 2. Изменение микроструктуры по глубине поверхностного слоя замка лопатки турбины из сплава ХН51ВМТЮКФ  $\times 9000$  (выход на поверхность слева, справа исходная структура с интерметаллидной фазой Ni<sub>3</sub> (Al, Ti). Обработка протягиванием

При решении этой задачи возникает целый ряд трудностей методического, информационного, технологического и конструкторского плана. В частности, указанные изменения физических и химических свойств имеют место в тонком приповерхностном слое, измеряемом микрометрами. В лабораторных условиях, применяя современные методы анализа, такие как: вторичную ионную масс-спектрографию, оже-спектрографию, электронную микроскопию и др. — удается расшифровать химический и структурно-фазовый состав поверхностного слоя. Но эти методы малоприменимы для включения их в технологический процесс машиностроительного производства. Еще предстоит выполнить целый ряд исследований, чтобы определиться с выбором информативного параметра, интегрально отображающего свойства поверхности. Как показывают исследования, в отдельных случаях это могут быть экзоэлектронная эмиссия, твердость (микротвердость), инфракрасное излучение, параметры субмикроструктуры, работа выхода электрона, электростатический потенциал, рентгеновская люминесценция и др. Установление корреляционных связей между указанными параметрами, режимами операций упрочнения и эксплуатационными свойствами позволяет выбрать и оптимизировать технологический процесс.

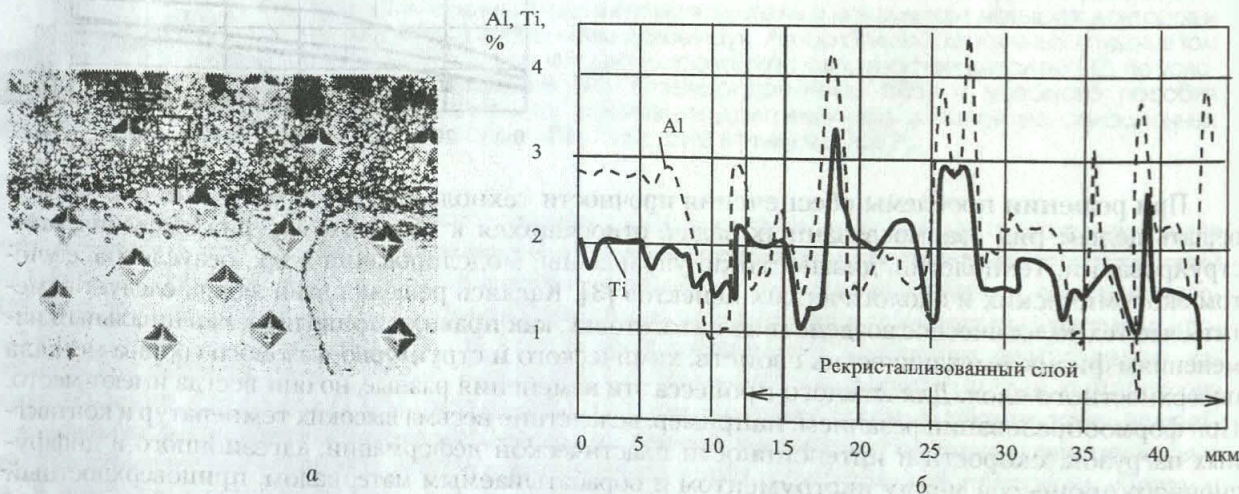


Рис. 3. Изменение структуры (а) и химического состава (б) поверхностного слоя детали — лопатки турбины из сплава ХН70ВМТЮФ в процессе эксплуатации

Сложнее обстоит дело с определением физико-механических свойств металла поверхностного слоя (статической и динамической прочности, жаропрочности, пластичности, вязкости, упругих свойств и т. д.) на различных этапах технологического воздействия и эксплуатации деталей. Существующие методы микромеханических испытаний не позволяют получить объективные данные по свойствам модифицированного металла поверхностного слоя в широком диапазоне температур. Наличие значительных градиентов остаточных напряжений, химического и структурно-фазового состава усложняет проблему определения физико-механических свойств металла поверхностного слоя. В свою очередь отсутствие этих свойств не позволяет создать теоретических основ конструирования поверхности не позволяет конструктору сегодня по условиям эксплуатации создавать поверхности как силовые объекты (оболочки), обеспечивающие прочность и жаропрочность, усталостную прочность и коррозионную стойкость и т. д.

Наиболее разработанным в отношении как технологии, так и конструирования является процесс упрочнения пластическим деформированием [4]. В этой области разработаны так называемые блокирующие контуры (рис. 4), показывающие для каждого материала область рационального (по температуре и ресурсу эксплуатации) применения методов деформационного упрочнения [5]. В некоторой зоне *A* имеет место такое сочетание эксплуатационных температур и ресурсов (высокие температуры — малый ресурс, большой ресурс — низкие температуры), когда проявляется положительный эффект от упрочнения. В зоне *C* деформация металла поверхности недопустима, ибо при высоких значениях температуры и ресурса в термодинамически неустойчивом поверхностном слое протекают процессы разупрочнения, приводящие к снижению общей прочности детали.

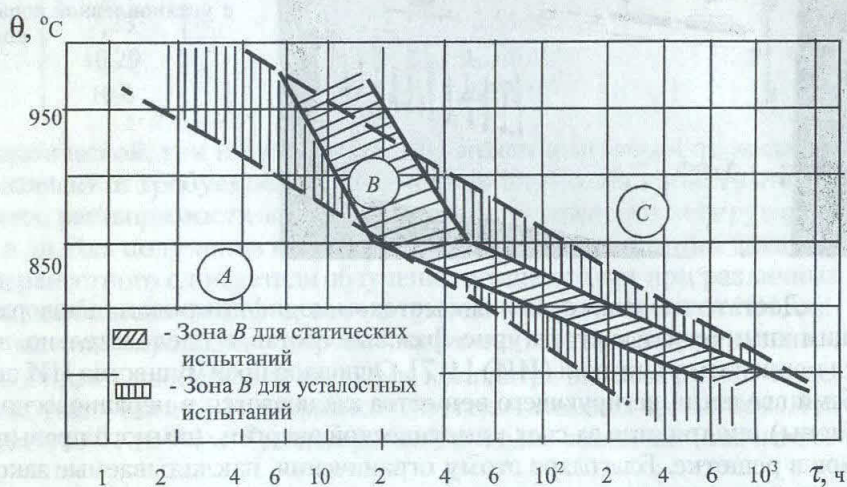


Рис. 4. Температурно-ресурсные зоны работоспособности сплава ХН51ВМТЮКФР при испытании на жаропрочность и усталость

Зона *B* занимает промежуточное положение; здесь эффективной может быть термомеханическая или механотермическая обработка. Такие диаграммы определены применительно к жаропрочности и усталостной прочности. Действительное повышение (или снижение) прочности определяется по кривым жаропрочности и усталости.

Поскольку детали машин эксплуатируются в сложных условиях — одновременно действуют статические и динамические нагрузки, температуры, агрессивные среды и др., то единственно верным является разработка гибких интегрированных технологий формообразования и регулирования специальных свойств поверхности деталей по условиям их эксплуатации; такая концепция предусматривает комбинированное воздействие на заготовку-деталь различных по природе физических процессов. Ниже приведены примеры реализации концепции.

Известно, что упрочнение поверхностным пластическим деформированием вследствие формирования сжимающих напряжений существенно повышает сопротивление усталости. Однако при этом имеет место образование и развитие подповерхностных трещин. Исследования показали, что подповерхностная повреждаемость является следствием высоких напряжений растяжения как суммы рабочих, остаточных технологических и температурных напряжений (вследствие переменности коэффициента линейного расширения по глубине поверхностного слоя). Образование подповерхностных трещин нежелательно, так как при оценке технического состояния объекта выявить такие дефекты достаточно трудно. Из этого вытекает, что, упрочнив поверхность и получив повышение прочности в случае необходимости увеличения ресурса, следует упрочнить металл детали в целом. Для этой цели предлагается технология магнитофлуктуационного модифицирования структуры [6]. Основу метода составляет локальное поглощение энергии на неоднородностях кристаллической решетки, приводящее к ее перестройке и упорядочению. Для реализации технологии созданы генераторы периодических магнитных полей (рис. 5). На деталь воздействуют униполярные или биполярные импульсы периодического магнитного поля с крутым передним фронтом. Напряженность магнитного поля до  $10^6$  А/м, частота следования импульсов (0,1 ÷ 20) Гц, длительность переднего фронта ( $10^{-6}$  ÷  $10^{-3}$ ) с, длительность обработки 60 ÷ 600 с. Исследования показали, что при всех видах упрочнения и защиты поверхности (деформационное упрочнение, ионная имплантация, вакуумно-плазменные покрытия) применение магнито-флуктуационного модифицирования позволяет допол-

нительно повысить эффект по усталостной прочности, жаропрочности, коррозионной стойкости, износостойкости.

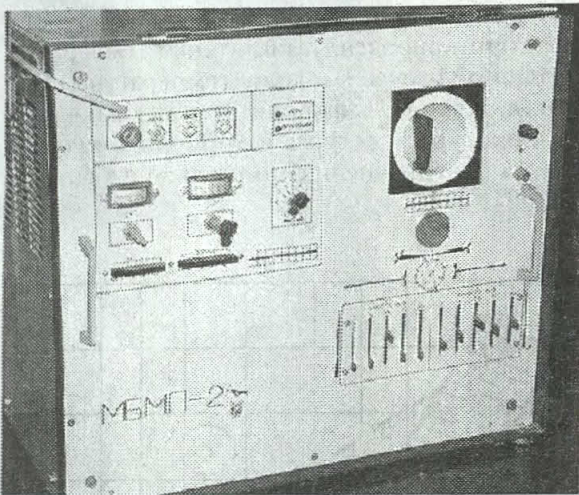


Рис. 5. Генератор периодических магнитных полей с установленной лопаткой компрессора в зону магнитного воздействия

Достаточно универсальным методом модифицирования поверхности, кардинально меняющим химический и структурно-фазовый состав, а следовательно, свойства материала, является ионная имплантация (ИИ) [1, 7]. Основное преимущество ИИ перед традиционными способами введения легирующего вещества заключается в неравновесной природе процесса. Атомы (ионы) внедряются за счет кинетической энергии, намного превышающей энергию связи атомов в решетке. Благодаря этому ограничения, накладываемые законами термодинамики, снимаются и открывается уникальная возможность получения сплава (смеси) из любых элементов. Другой важной особенностью ИИ является то, что процесс можно проводить атермически и облучать таким образом любые структуры.

Некоторые особенности имплантации заключаются в следующем. Ион легирующего вещества, внедряясь в решетку мишени (детали), вызывает каскад атомных столкновений с атомами решетки, в результате в имплантированном слое образуется большое количество радиационных дефектов, как правило, на 2–3 порядка превышающее число имплантированных атомов. Высокая перенасыщенность искажений решетки способствует интенсификации всех явлений, в основе которых лежит перенос вещества — в первую очередь радиационно-стимулированной диффузии. Наибольший эффект дает ионная имплантация химически активных элементов, таких, как азот, бор, углерод. Применением последующей термической обработки слой с данным веществом может быть увеличен на несколько порядков вследствие диффузии с образованием нитридов, боридов, карбидов, интерметаллидов. Появлением концентрационных градиентов всех элементов, входящих в сплав, достигается термодинамическое равновесие.

В зависимости от требований к поверхности (повышение, например, износостойкости или усталостной прочности, жаростойкости и др.) разрабатывается соответствующая технология. При выборе сорта ионов пользуются априорной информацией о влиянии вещества на свойства при традиционном легировании. Если, например, требуется повысить твердость и износостойкость, то следует имплантировать карбидо- или боридообразующие элементы; введение веществ из группы лантаноидов повышает жаростойкость и т. д. Следует учитывать также атомную массу, порядковый номер и атомный объем имплантанта и мишени. От этого будет зависеть требуемая энергия ионов, интенсивность распыления поверхности, глубина внедрения иона и интенсивность упругой деформации кристаллической решетки. Последняя определяет уровень остаточных внутренних напряжений, которые в свою очередь существенно влияют на прочность, имплантации в сталь 12X18H10T ионов различных металлов (энергия 50 кэВ, доза  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>, частота следования импульсов 25 Гц, ионный ток 300 мА, температура при ИИ 20°C, отжиг напряжений) увеличивается и число циклов до разрушения.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Исследования выполнялись совместно с д-ром техн. наук, проф. А. М. Смысловым и канд. техн. наук, доц. С. М. Боровским.

Таблица 1  
Взаимосвязь между атомным объемом имплантанта и числом циклов до разрушения стали

Легирующий элемент	Атомный объем	Напряжения при испытаниях, $\sigma_{-1}$ , МПа	Число циклов до разрушения
1. Тантал . . . . .	10,88	180	$12,92 \cdot 10^6$
2. Алюминий .	10	180	$8,88 \cdot 10^6$
3. Вольфрам . .	9,54	180	$7,92 \cdot 10^6$
4. Молибден . .	9,39	180	$8,74 \cdot 10^6$
5. Хром . . . . .	7,23	180	$6,13 \cdot 10^6$
6. Олово . . . . .	16,29	250	$13,46 \cdot 10^6$
7. Титан . . . . .	10,6	250	$6,78 \cdot 10^6$

Энергия ионов как при статической, так и импульсной ИИ может колебаться от нескольких кэВ до нескольких мэВ и зависит от требуемой глубины модифицирования, свойств атомов (ионов) имплантанта и мишени, растворимости и диффузионной подвижности легирующего вещества в материале детали и др. Для получения необходимой эпюры распределения внедряемого вещества по глубине поверхностного слоя детали облучение осуществляют при различных энергиях. Наряду с энергией ионов большое значение с точки зрения результативности ИИ имеет интенсивность ионного пучка; этим определяется время имплантации, температура детали.

Для управления поверхностными свойствами металлов концентрация введенного вещества должна составлять от нескольких единиц до нескольких десятков атомных процентов. При столь больших дозах облучения ( $10^{16} \div 10^{18}$  см<sup>-2</sup>) в поверхностном слое возникают значительные внутренние напряжения.

Кроме параметров, определяемых собственно ИИ, значительное влияние на эффект упрочнения оказывает состояние поверхности перед ИИ, температура при ИИ, режим постимплантационного отжига (температура, время, среда). На рис. 6 в качестве примера приведены пределы усталостной прочности лопаток компрессора высокого давления (КВД) ГТД, изготавливаемых серийно (виброшлифование) и для сравнения дополнительно с модифицированным поверхностным слоем путем имплантации ионов азота (энергия 30 кэВ, доза  $2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>); здесь же приведена усталостная прочность таких же лопаток, но после эксплуатации на двигателе в течение 1000 ч.

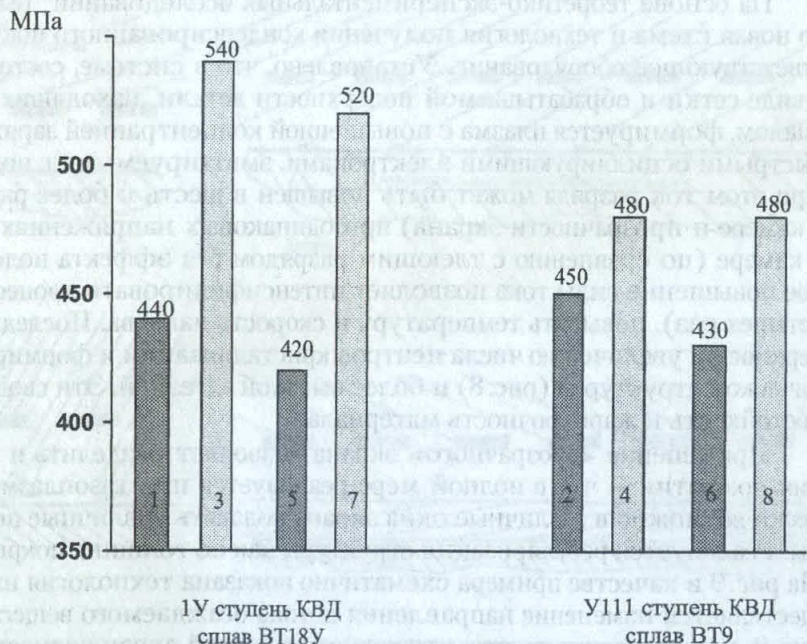


Рис. 6. Пределы усталости компрессорных лопаток: 1, 2 — непосредственно после изготовления — виброшлифование (ВШ); 3, 4 — ВШ + ИИ; 5, 6 — ВШ + эксплуатация в течение 1000 ч; 7, 8 — ВШ + ИИ + эксплуатация в течение 1000 ч

Видно, что ИИ существенно повышает предел циклической прочности деталей (до 22%). Важным является и то, что детали обеих ступеней, изготовленных из различных титановых

сплавов с дополнительной операцией имплантации азота, после длительной работы в двигателе имеют предел усталости намного выше, чем новые лопатки, но изготовленные по серийной технологии (виброшлифование). Эффект обусловлен тем, что при ионной бомбардировке вследствие распыления удаляется дефектный слой от механической обработки, при постимплантационном отжиге образуется ультрамелкозернистая упрочняющая фаза из нитридов титана, при ИИ вследствие образования большого числа радиационных дефектов происходит радиационное упрочнение. К этому следует добавить возможность формирования благоприятных (с точки зрения сопротивления усталости) сжимающих напряжений при объемных изменениях вследствие внедрения ионов и при структурно-фазовых изменениях в поверхностном слое.

Радикальным средством тепловой защиты и повышения жаропрочности конструкционного материала являются вакуумно-плазменные методы нанесения (осаждения) покрытий [8]. Однако, несмотря на значительный объем выполненных исследований, наличие разработанных и внедренных технологий, качество покрытий, надежность технологических процессов остаются достаточно низкими. Об этом свидетельствует большое число производственных и эксплуатационных дефектов в виде трещин, отслоений, раковин и др. Анализ показал, что если кардинально не изменить условия осаждения и кристаллизации вещества, то в условиях «конкурирующего» роста кристаллов по традиционной схеме (рис. 7) появления значительных напряжений в покрытии избежать не удастся. Следствием будут растрескивание и отслоение покрытий.

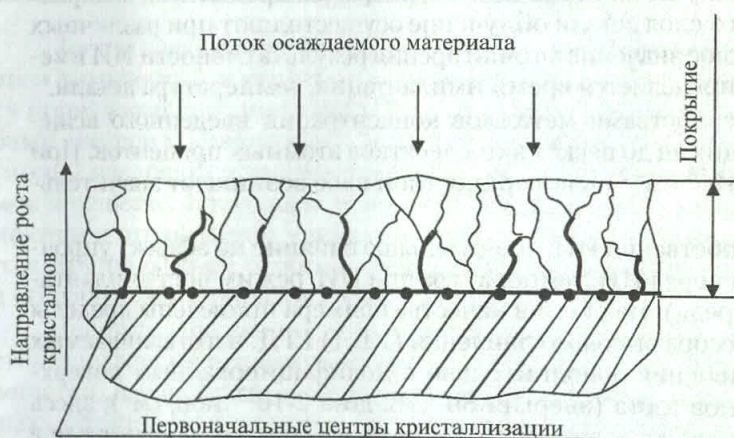
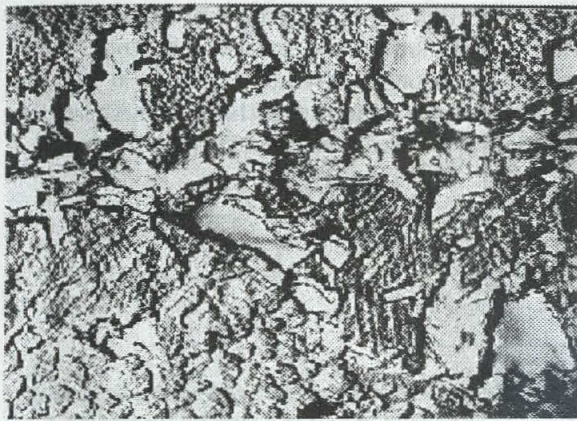


Рис. 7. Традиционная схема вакуумно-плазменного осаждения покрытия

На основе теоретико-экспериментальных исследований<sup>1</sup> была предложена принципиально новая схема и технология получения конденсированного покрытия и модернизировано соответствующее оборудование. Установлено, что в системе, состоящей из специального экрана в виде сетки и обрабатываемой поверхности детали, находящихся под отрицательным потенциалом, формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц, генерируемых быстрыми осциллирующими электронами, эмиттируемыми с поверхностей катодной полости. При этом ток разряда может быть повышен в шесть и более раз (в зависимости от давления в камере и прозрачности экрана) при одинаковых напряжениях горения разряда и давлениях в камере (по сравнению с тлеющим разрядом без эффекта полого катода). Столь значительное повышение силы тока позволяет интенсифицировать процесс распыления-осаждения (до четырех раз), повысить температуру и скорость нагрева. Последние приводят к активации популяцией (рис. 8) и более высокой адгезией. Эти свойства покрытия повышают жаропрочность материала.

Использование «прозрачного» экрана позволяет разделить и перемещать фронт наращивания — что в полной мере реализуется при газоплазменном осаждении. Технологически регулируется структура как по толщине покрытия, так и по поверхности [1]. На рис. 9 в качестве примера схематично показана технология нанесения покрытия, когда осуществляется изменение направления потока осаждаемого вещества на поверхность детали. На рис. 9, а направление таково, что технологический экран полностью перекрывает поток; только

<sup>1</sup> Совместно с д-ром техн. наук, проф. В. В. Будиловым.



а



б

Рис. 8. Структура вакуумно-плазменного покрытия системы NiCrCoAlY: а — базовая технология; б — разработанная технология

при некотором угле возможно начало попадания осаждаемого вещества на поверхность детали (рис. 9, б). На этой стадии образуются первоначальные центры кристаллизации, от которых впоследствии при изменении направления потока осуществляется рост кристаллов (рис. 9, в). На рис. 9, г показана конечная стадия нанесения слоя покрытия. Видно, что при реализации такой технологии принципиально меняются условия формирования покрытия: кристаллы растут не перпендикулярно поверхности, а как бы слоями и практически параллельно поверхности. Это обуславливает более высокую адгезию, меньшие остаточные напряжения в покрытии и более высокую его пластичность. Принципиально новые результаты в конструировании и технологии нанесения покрытий дает интеграция рассмотренного варианта нанесения покрытия при дискретном перемещающемся фронте наращивания с другими процессами — ионной имплантацией, вакуумным ионно-плазменным осаждением, механической обработкой, сублимацией, высокотемпературной пайкой. Как пример такой интеграции на рис. 10 показано покрытие на лопатке турбины (в сечении детали), имеющее внутренние каналы для охлаждения детали и

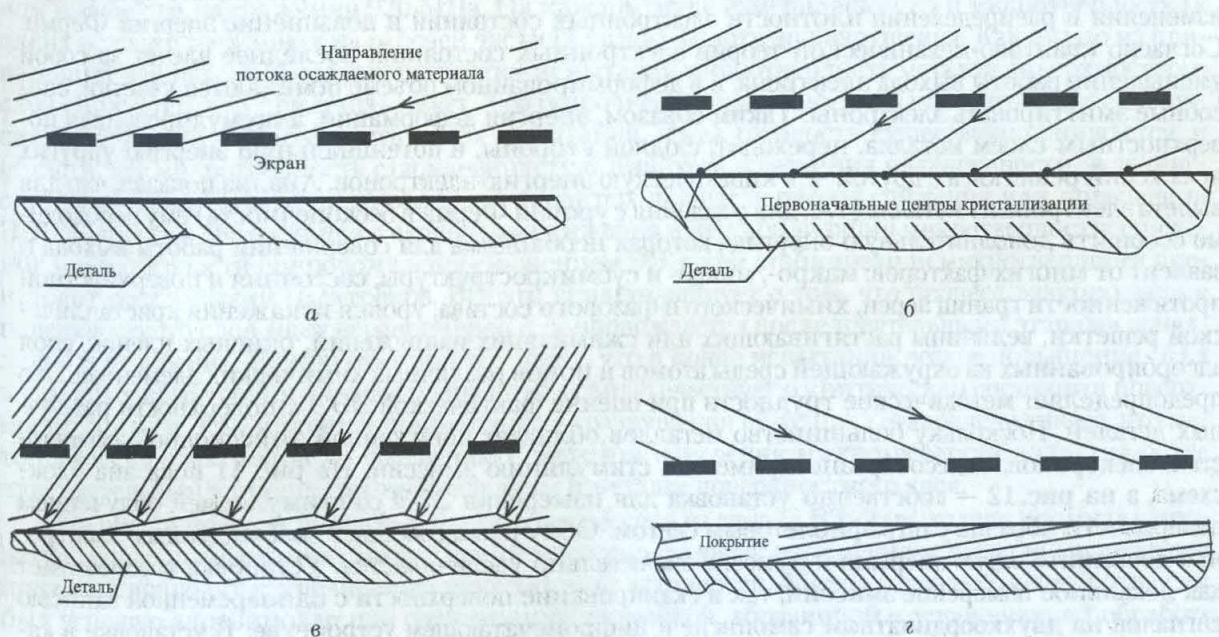


Рис. 9. Принципиальная схема формирования покрытия при перемещающемся дискретном потоке осаждаемого материала



покрытия. Такие покрытия представляют собой силовую оболочку, которая существенно меняет прочность детали, температурную напряженность, вибрационные характеристики. Расчеты показали, что в статических условиях при температуре газового потока  $1100 \div 1400^\circ\text{C}$  и различных расходах охлаждаемого воздуха температура лопатки с каналированными покрытиями на  $60 \div 80^\circ\text{C}$  ниже по сравнению с лопатками, имеющими обычное покрытие той же системы — NiCrCoAlY.

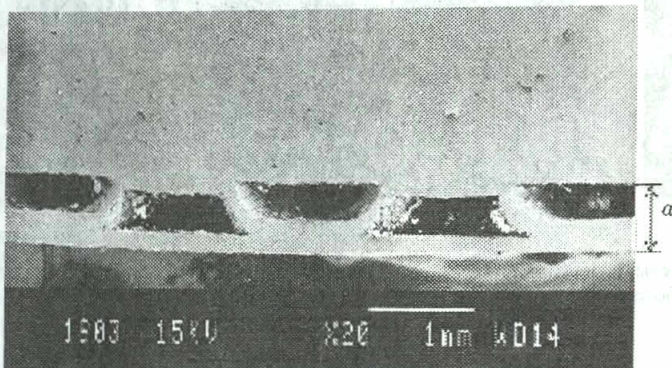


Рис. 10. Конструкция (в сечении) покрытия толщиной  $a$  с каналами охлаждения

Согласно [3] поверхность детали как технический объект представляет собой сложную систему, в которой диалектическую связь имеют самые разнообразные составляющие; очевидно, что конструктивный облик поверхностного слоя, технология получения, химические и физико-механические свойства, методы исследования и контроля, эксплуатационные свойства, экономические и экологические аспекты и др. тесно взаимосвязаны. Из этого следует, что, кроме создания новых технологий модифицирования поверхности, не менее важно создание методов исследования, контроля и диагностирования свойств поверхности, которые были бы приемлемы не только для научных лабораторий, но и могли бы быть внедрены в производство. Ниже в качестве примера приведены результаты исследования экзоэлектронной эмиссии (ЭЭЭ) и инфракрасного излучения (ИК) применительно к высокопрочной стали и титановым сплавам.

Согласно модели ЭЭЭ, технологическое или эксплуатационное воздействие на металл сопровождается макро-, микро- и субмикрореформациями. При этом значительная доля энергии поглощается металлом. Эта энергия затрачивается на искажение кристаллической решетки, следствием чего являются изменения межатомных расстояний. В результате происходят изменения в распределении плотности электронных состояний и повышение энергии Ферми. Согласно квантово-механической теории электронных состояний, последнее влечет за собой уменьшение работы выхода электрона, и в деформированном объеме появляются участки, способные эмиттировать электроны. Таким образом, энергия деформации, аккумулированная поверхностным слоем металла, переходит, с одной стороны, в потенциальную энергию упругих искажений решетки, а с другой — в кинетическую энергию электронов. Анализ показал, что для вылета электрона из металла (т. е. для удаления с уровня Ферми в бесконечность) ему необходимо сообщить дополнительную энергию, которая необходима для совершения работы выхода и зависит от многих факторов: макро-, микро- и субмикроструктуры, состояния и поверхностной протяженности границ зерен, химического и фазового состава, уровня искажения кристаллической решетки, величины растягивающих или сжимающих напряжений, окисных пленок, слоя адсорбированных из окружающей среды атомов и ионов различных химических элементов. Это предопределяет методические трудности при оценке фактической ЭЭЭ с поверхности различных деталей. Поскольку большинство металлов обладает пониженной эмиссионной активностью электронов, целесообразно применять стимуляцию эмиссии. На рис. 11 показана блок-схема, а на рис. 12 — собственно установка для измерения ЭЭЭ со стимуляцией облучением поверхности образца ультрафиолетовым светом. Облучение сообщает возбужденным электронам дополнительную энергию и эмиссия значительно увеличивается. Установка обеспечивает как локальное измерение эмиссии, так и сканирование поверхности с одновременной записью сигналов на двухкоординатном самописце и цифropечатающем устройстве. В установке в качестве детектора электронов используется вторичный электронный умножитель ВЭУ-6. Блок фотостимуляции состоит из дейтериевой лампы типа ЛД, фокусирующей системы кварцевых линз и диафрагм, обеспечивающих фокусировку светового пятна в пределах  $50 \div 3000$  мкм. Пе-

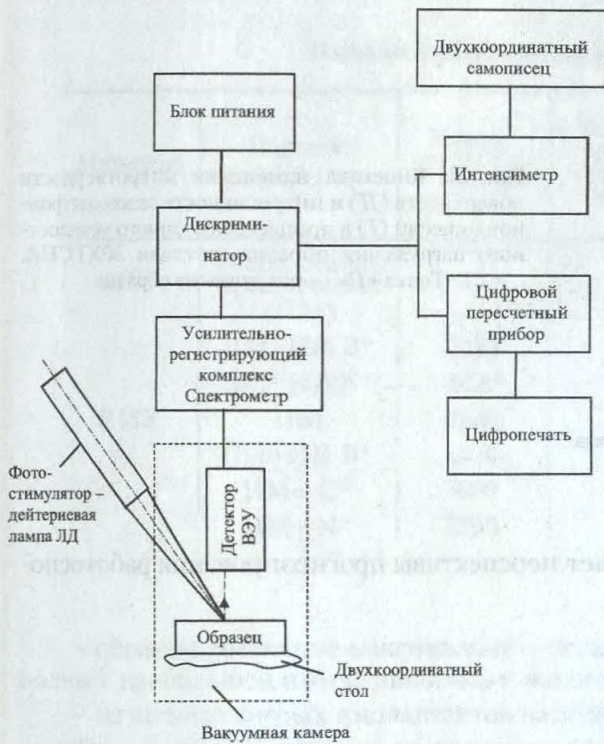


Рис. 11. Блок-схема экспериментальной установки измерения экзоэлектронной эмиссии

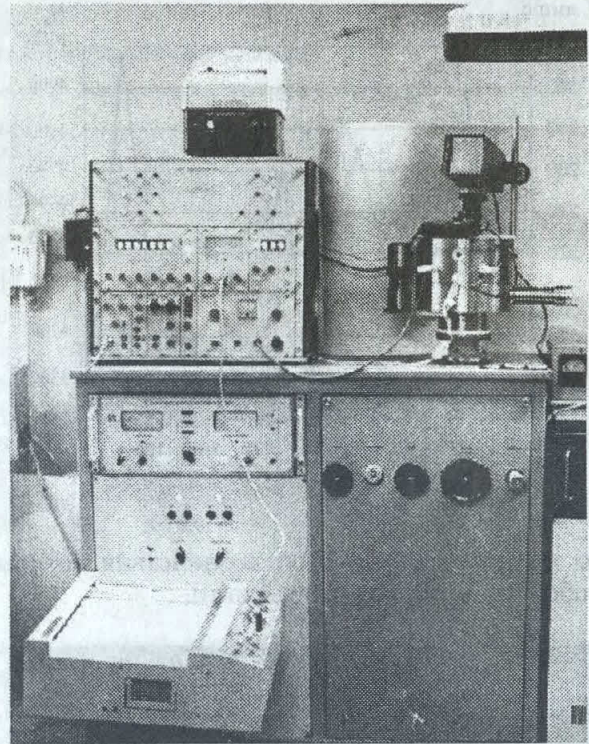
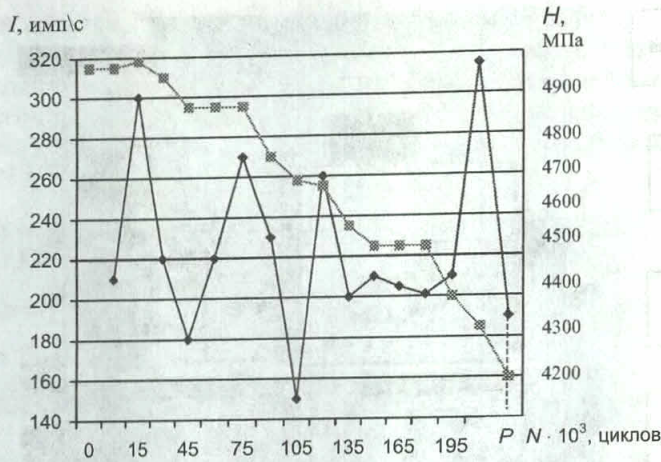


Рис. 12. Общий вид установки для измерения экзоэлектронной эмиссии

ред проведением исследований ЭЭЭ разработана специальная методика эталонирования установки.

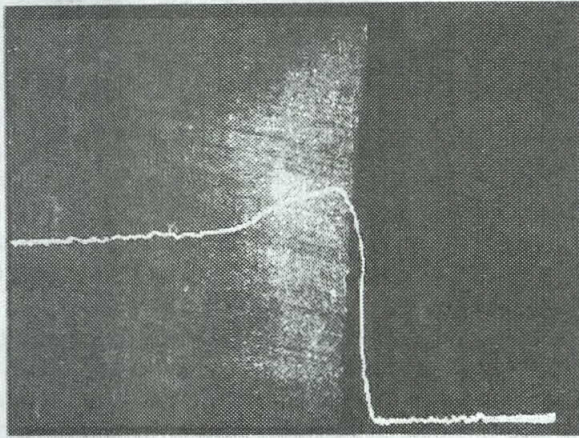
На рис. 13 в качестве примера приведены усредненные результаты исследований экзоэлектронной эмиссии с поверхности образцов из стали 30ХГСА, прошедших пневмодинамическое упрочнение. Образцы испытывались поэтапно на усталость при знакопеременном симметричном изгибе при напряжении 920 МПа. На каждом этапе измерялась ЭЭЭ и микротвердость (в одних и тех же трех зонах на рабочей части образца), вплоть до разрушения. Как видно из приведенных данных, по мере динамических испытаний микротвердость металла поверхностного слоя снижается, что свидетельствует о разупрочнении поверхности; однако это снижение носит ступенчатый характер: есть этапы испытаний, когда твердость существенно снижается, и области, где микротвердость стабилизируется. Кинетика изменения интенсивности экзоэмиссии носит более выраженный волновой характер, причем периоды снижения или повышения ЭЭЭ полностью согласуются с периодами снижения или стабилизации микротвердости: снижение микротвердости сопровождается снижением ЭЭЭ, при стабилизации микротвердости происходит рост эмиссии электронов. Все это свидетельствует о том, что процесс разупрочнения поверхностного слоя идет неравномерно и сопровождается последовательными этапами замедления и ускорения. Важно отметить тот факт, что в конце испытаний резкое повышение ЭЭЭ выше исходного уровня и предыдущих пиков свидетельствует о критическом состоянии поверхности; всплеск ЭЭЭ является предвестником разрушения образца. Установлено также, что метод эмиссии электронов по сравнению с методом измерения микротвердости является более чувствительным к процессам, протекающим в металле поверхностного слоя.

На рис. 14 показан участок лопатки компрессора из сплава ВТ-9 (выходная кромка) с прижогом после шлифования. Видно, что структурно-фазовые изменения в металле (вследствие прижога) приводят к увеличению эмиссионной активности. Метод экзоэлектронной эмиссии был успешно апробирован при оптимизации лезвийной, абразивной и упрочняющей обработки, выявлении поверхностных технологических дефектов — альфированных слоев, прижогов и перенаклепа. Метод позволяет оценивать энергетическое состояние и дефектность поверхности



**Рис. 13.** Кинетика изменения микротвердости поверхности ( $H$ ) и интенсивности экзоэлектронной эмиссии ( $I$ ) в процессе поэтапного усталостного нагружения образца из стали 30ХГСНА. Точка «P» — разрушение образца

на этапе технологического воздействия и открывает перспективы прогнозирования работоспособности детали в эксплуатации.



**Рис. 14.** Изменение ЭЭЭ на участке пера лопатки компрессора из сплава ВТ-9, содержащем прижог от шлифования ( $\times 25$ ): светлая линия — экзоэмиссионная сканограмма. Изображение прижога получено в темном поле

В табл. 2 представлены результаты комплексных исследований усталостной прочности плоских образцов, поверхности которых были получены по различным технологиям: исходное состояние — полирование механическое (ПМ) по режимам полирования лопаток компрессора из титановых сплавов. Переменными факторами были марки титановых сплавов и вещества, имплантированные в поверхность образцов: бор, углерод, азот (энергия 40 кэВ, плотность тока 20 мкА/см<sup>2</sup>, доза  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>, отжиг в вакууме при 540°C в течение 2 ч). Перед динамическими испытаниями исследовались микротвердость, экзоэлектронная эмиссия и параметры инфракрасного излучения (ИК-излучения) — максимальная длина волны и соответствующий ей спектральный коэффициент излучения  $\epsilon_\lambda$  (интенсивность излучения). Для сплава ВТ18У с целью дополнительной проверки чувствительности метода исследование излучательных характеристик проводилось на фиксированной длине волны  $\lambda = 2,45$  мкм. В основе тепловизионной установки были инфракрасный радиометр и графоаналитический построитель (самописец). Регистрацию спектра инфракрасного излучения осуществляли на базе спектрометра ИКС-14 с использованием блока термостатирования при  $60 \pm 0,01^\circ\text{C}$ , призмы NaCl в монохроматоре при диаметре входной диафрагмы 3,5 мм, ширине щели 1,4 мм и коэффициенте усиления 4,5.

Анализ полученных результатов, приведенных в табл. 2, показывает:

- ИИ оказывает существенное влияние на излучательные характеристики сплава, причем каждому состоянию поверхностного слоя соответствует вполне определенный спектр ИК-излучения;
- характер изменения излучательных характеристик поверхности соответствует характеру изменения микротвердости, интенсивности экзоэлектронной эмиссии и усталостной прочности сплавов;

Таблица 2

## Влияние ИИ на предел усталости титановых сплавов

Материал	Вариант обработки	Микро-твердость, МПа	Экзоэлектронная эмиссия, имп/с	Спектральный коэффициент излучения $\varepsilon_\lambda$	Длина волны $\lambda_{\max}$	Предел усталости $\sigma_{-1}$ , МПа на базе $2 \cdot 10^7$ циклов
BT6	Полирование механическое (ПМ)	4150	335	0,373	2,65	360
	ПМ+ИИ В <sup>+</sup>	5260	235	0,673	2,35	390
	ПМ+ИИ N <sup>+</sup>	4420	385	0,585	2,48	380
B18Y	ПМ	2830	355	0,398	2,45	300
	ПМ+ИИ В <sup>+</sup>	5420	238	0,469	2,45	390
	ПМ+ С <sup>+</sup>	3680	264	0,449	2,45	380
	ПМ+ N <sup>+</sup>	3390	304	0,435	2,45	360

– образцы, имеющие максимальную усталостную прочность, излучают электромагнитные волны с наибольшей интенсивностью и наименьшей длиной волны;

– из исследованных имплантантов наибольшую прочность обеспечивают ионы бора.

Таким образом, наравне с экзоэлектронной эмиссией метод инфракрасной спектроскопии может быть с успехом применен для диагностики поверхностей деталей при оптимизации технологических процессов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухин В. С., Смыслов А. М., Боровский С. М. Модифицирование поверхностей деталей ГТД по условиям эксплуатации. М.: Машиностроение, 1995. С. 256.
2. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. А. Г. Братухина, Г. К. Язова, Б. Е. Карасева. М.: Машиностроение, 1997. 416 с.
3. Мухин В. С. Поверхность: конструирование, технология, свойства, прочность // Вестник УГАТУ. 2000. № 1. С. 97–104.
4. Мухин В. С. Технологическое проектирование ГТД // Проектирование авиационных газотурбинных двигателей: Учебник для вузов. Гл. 8. М.: Машиностроение, 2000. С. 325–390.
5. Мухин В. С., Щипачев А. М. Энергия активации усталостного разрушения и ее связь с температурно-ресурсными зонами эксплуатации // Авиационная техника. 2000. № 3. С. 49–51.
6. Боровский С. М., Мухин В. С. Влияние обработки импульсным магнитным полем на состояние поверхности титановых и никелевых сплавов // Магнитные и другие неконвенциональные технологии: Сб. докл. МНТК. Болгария, Ботевград, 1989. С. 207–217.
7. Мухин В. С., Смыслов А. М. и др. Оценка состояния поверхности титановых сплавов, модифицированных ионной обработкой // Авиационная промышленность. 1989. № 12. С. 33–35.
8. Будилов В. В., Мухин В. С., Иванов В. Ю. Интегрированные вакуумные ионно-плазменные технологии обработки деталей ГТД. Физические основы, моделирование, проектирование. Уфа: Гилем, 2001. С. 215.