

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.81

В. С. МУХИН, А. М. СМЫСЛОВ

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Поверхность деталей машин рассмотрена как некоторый технический объект в виде системы, предопределяющей связь параметров поверхности на этапах конструирования, технологии производства и эксплуатации. Показано, что вследствие технологической наследственности при изготовлении детали и релаксационных процессов при ее эксплуатации постоянно имеют место изменения химических и физико-механических свойств металла поверхностного слоя. Указывается на возможность кардинального модифицирования поверхности методами нанотехнологий. *Нестационарность резания; диссипация; энтропия; износ инструмента*

Инженерия поверхности («surface engineering») относится к одному из новых направлений в науке и технологии, включающему традиционные и инновационные процессы модифицирования поверхности изделий, создающие на ней композиционный материал со свойствами, отличающимися от свойств основного материала.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Инженерия поверхности относится к различным областям современного материаловедения и базируется на научных и технологических основах получения поверхностных слоев с необходимыми свойствами непосредственно в основном материале, а также нанесение на него различными методами прочно с ним связанных слоев другого материала. При этом в инженерии поверхности входят как традиционно распространенные методы модифицирования, например, деформационное упрочнение, так и современные высокоэффективные и во многих случаях единственно возможные инструментально-физические методы, такие, как плазменная обработка в ионных пучках, в тлеющем разряде, обработка потоками электронов и др.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее остро проблема поверхности встала в шестидесятые годы, когда было принято решение многократного увеличения ресурса ГТД. Уже тогда стало ясно, что оптимизацию процесса резания, выполняемую про-

фессором А. Д. Макаровым, следует проводить не только с точки зрения минимизации интенсивности износа инструмента, но и с учетом получаемой структуры, свойств, напряженности поверхностного слоя детали.

Вследствие важности проблемы поверхности было создано Международное общество по термической обработке и инженерии поверхности. Генеральным секретарем общества является Роберт Б. Вуд (Великобритания).

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

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. 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 вязко-

сти, коэффициенту линейного расширения и др. от основной массы детали.

Наиболее контрастно влияние поверхности на эксплуатационные свойства деталей проявляется применительно к деталям авиационных газотурбинных двигателей и энергетическим установкам. Обусловлено это воздействием высоких температур, статических и динамических нагрузок, агрессивной среды и др. [1].

На рис. 1 в качестве примера приведена фотография участка напыленного к фаске износа микрошлифа, подтверждающая протекание в зоне контакта инструмент-деталь химических реакций с образованием новых фаз. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что эти соединения представляют собой интерметаллиды типа Ti_2Co , $TiCo$, Co_2Al_3 , $Co_{14}Al_{13}$ и др.

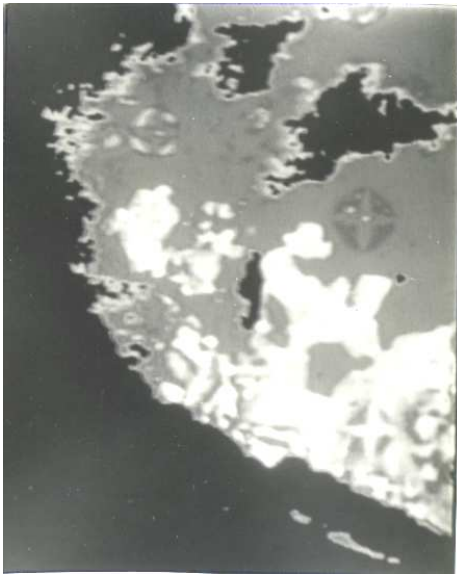


Рис. 1. Фотография участка наклонного к фаске износа микрошлифа. Точение ВТ9 – ВК6М. Получено в процессе растрового сканирования в поглощенных электронах. Черное поле – ВК6М, серое – ВТ9, светлое – новая фаза

Часть продуктов износа в том или ином виде внедряется в обработанную поверхность, изменяя структурно-фазовый и химический состав исходного металла поверхности детали (рис. 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.).

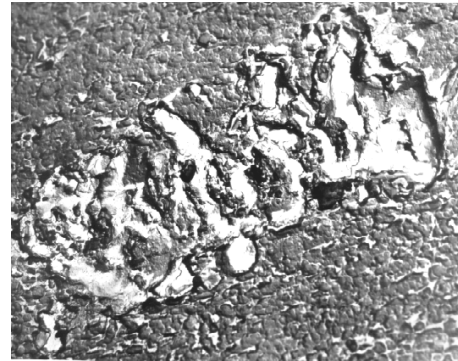


Рис. 2. Внедренные в поверхностный слой продукты износа инструмента. ХН51ВМТЮКФР – ВК6М. Электронная микрофотография, $\times 5000$

На рис. 3 в качестве примера приведено изменение структуры и микротвердости по глубине поверхностного слоя упрочненного образца из сплава ХН51ВМТЮКФР и испытанного на жаропрочность по режиму: $\theta = 950^\circ C$, $\sigma = 120$ МПа, $\tau = 220$ ч.

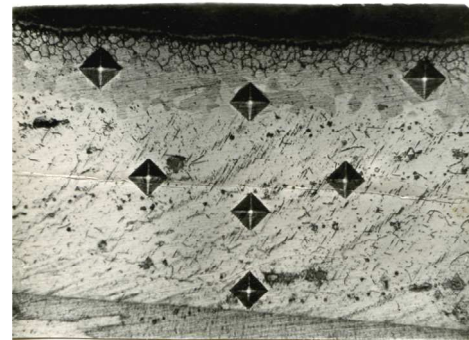


Рис. 3. Микроструктура по глубине поверхностного слоя упрочненного образца из сплава ХН51ВМТЮКФР (пояснения в тексте), $\times 500$

Из рис. 3. следует, что в процессе длительных высокотемпературных испытаний в поверхностном упрочненном (обкатанный роликами) слое произошли существенные изменения: тонкий приповерхностный слой (0,2–0,3 мм) представляет собой следствие окисления границ рекристаллизованных зерен, металлоокисную смесь; далее идет мелкозернистый слой рекристаллизованных зерен. Весь деформированный упрочненный слой претерпел рекристаллизацию и разупрочнение.

В настоящее время конструкторам при проектировании деталей машин предлагается несколько сотен самых разнообразных методов защиты и модифицирования поверхностей; широко применяются многочисленные варианты деформационного упрочнения, азотирования, алитирования, борирования, вольфрамосилицирования, детонационного напыления, ионной имплантации, модифицирования с помощью лазерного или электронного лучей, вакуумного ионно-плазменного нанесения покрытий и многие другие.

Несмотря на столь широкий спектр разработанных технологий упрочнения и защиты поверхностей деталей машин, еще более кардинальные способы модифицирования следует ожидать от нанотехнологий с получением наноструктуры в поверхностном слое [2].

К специальным методам создания наноструктуры относятся интенсивная пластическая деформация – равноканальное угловое прессование, деформация кручением в условиях высокого давления и др. В отличие от этих специальных методов определенный интерес представляют традиционные технологии формообразования, которые основаны на пластической деформации и разрушении (например, при срезании слоя лезвийным инструментом или абразивным зерном) или технологии деформационного упрочнения (например, алмазное выглаживание, дробеструйное упрочнение). Ввиду малости локальной области и чрезвычайно высокой скорости и степени деформации в металле поверхностного слоя протекают кардинальные структурно-фазовые изменения. Из рис. 4 следует, что при обычном фрезеровании замка турбинной лопатки интерметаллидная γ' – фаза $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, имеющая в исходном состоянии размер $d = 0,2\text{--}2$ мкм, на глубине от поверхности 2–5 мкм раздроблена настолько, что выявить ее размеры электронной микроскопией (при увеличении до 10000) достаточно точно не удается; экспертная оценка – это ≤ 100 нм. Следует сказать, что в поверхностном слое, измеряемом не микрометрами, а нанометрами, дробление зерен структуры еще интенсивнее. С высокой степенью вероятности можно считать, что некоторый приповерхностный слой переходит в наноструктурное состояние. Формированием значительных сжимающих остаточных напряжений при пластической деформации и эффектом Петча–Холла, видимо, можно объяснить тот факт, что в определенных температурно-ресурсных зонах возможно значительное повышение прочности материала при реализа-

ции технологий, основанных на пластической деформации.

На рис. 5 применительно к такому техническому объекту, как поверхность детали, показан принципиальный базис нанотехнологии получения наноструктурированного материала поверхности. Основным фундаментом являются физика и химия. При этом нанотехнология подразумевает интеграцию фундаментальных знаний в области физического материаловедения, химического синтеза и высокотехнологичных способов получения наноструктурированных материалов. К этим способам применительно к поверхности можно отнести ионную имплантацию и вакуумно-плазменную конденсацию веществ в (или на) поверхность. При этом реализуется один из принципов нанотехнологии: создание объекта осуществляется не «сверху-вниз» (например, когда при формообразовании снимается припуск с заготовки), а «снизу-вверх», когда поверхность «достраивается» до необходимых размеров детали [1, 3].



Рис.4. Изменение структуры по глубине поверхностного слоя (пояснения в тексте) $\times 6000$

Следует отметить, что получение материала с нанометрическими размерами структурных составляющих не самоцель. Установлено, что чем меньше частица (молекулы, атомные кластеры и др.), тем сильнее проявляются квантовые свойства; однако резкое изменение свойств наночастиц по сравнению с макрообъемами для одного и того же материала наступает задолго до проявления квантовых закономерностей – при размерах 10...100 нм. Причины появления размерных эффектов несколько. Например, с уменьшением размера зерна (наночастицы) доля атомов, находящихся в приповерхностном

слое, возрастает. Кроме этого, в результате насыщенности связей на поверхности наночастицы может произойти атомная перегруппировка; это приведет к изменению расположения атомов. Но поскольку свойства атомов, находящихся на поверхности, отличаются от свойств «объемных», то вышесказанное в определенной мере может быть объяснено наличием размерного эффекта. Можно также отметить, что в любом явлении переноса (например, теплопроводность, диффузия, пластическая деформация) носитель имеет некоторую эффективную длину свободного пробега. Если размер частицы (зерна) будет во много раз больше длины свободного пробега, то продвижение носителя (или рассеяние, захват, гибель) будет осуществляться в пределах объема и слабо зависеть от геометрических факторов объекта. И наоборот, если размер наночастицы будет значительно меньше длины свободного пробега носителя, то ситуация кардинально изменится и перенос будет существенно зависеть от размеров нанобъекта [3].

Особый интерес представляет ионно-лучевая имплантация и создание на основе этого процесса нанотехнологий. Во-первых, сам процесс воздействия на поверхность (модифицирование) осуществляется наночастицами – ионами, атомами, электронами. Процесс с высокой точностью контролируется таким образом, что возможно «введение» заданного количества химического элемента в поверхность обрабатываемой детали. Во-вторых, слои с измененным химическим составом варьируются

в широких пределах и составляют толщины, измеряемые нанометрами; в-третьих, большое число равномерно распределенных по объему ионов имплантанта вследствие химических реакций и «самосборки» образуют в поверхностном слое ультрамелкодисперсные частицы новой фазы с нанометрическими размерами.

Установлено, что после имплантации и постимплантационного отжига в титановый сплав ионов азота, углерода и бора (реакционно-активных веществ) в поверхностном слое толщиной до 1250Å обнаружены ультрамелкодисперсные фазы TiN , TiC и TiB_2 размерами 20...60 нм. Эти изменения в структурно-фазовом составе обеспечили существенное повышение усталостной прочности натуральных деталей ГТД по сравнению с серийной технологией [4, 5].

Вместе с тем сложные условия эксплуатации лопаток (статические и динамические напряжения, высокие температуры, абразивная и коррозионная среда и др.) требует повышения не только циклической долговечности, но и жаростойкости, коррозионно- и эрозионной стойкости.

В этой связи была разработана комбинированная (интегрированная) технология, в основе которой лежит ионная имплантация и вакуумная ионно-плазменная конденсация. Управляя технологическими параметрами, удалось на поверхности лопаток получить наноструктурированное покрытие. Свойства таких деталей приведены в таблице.

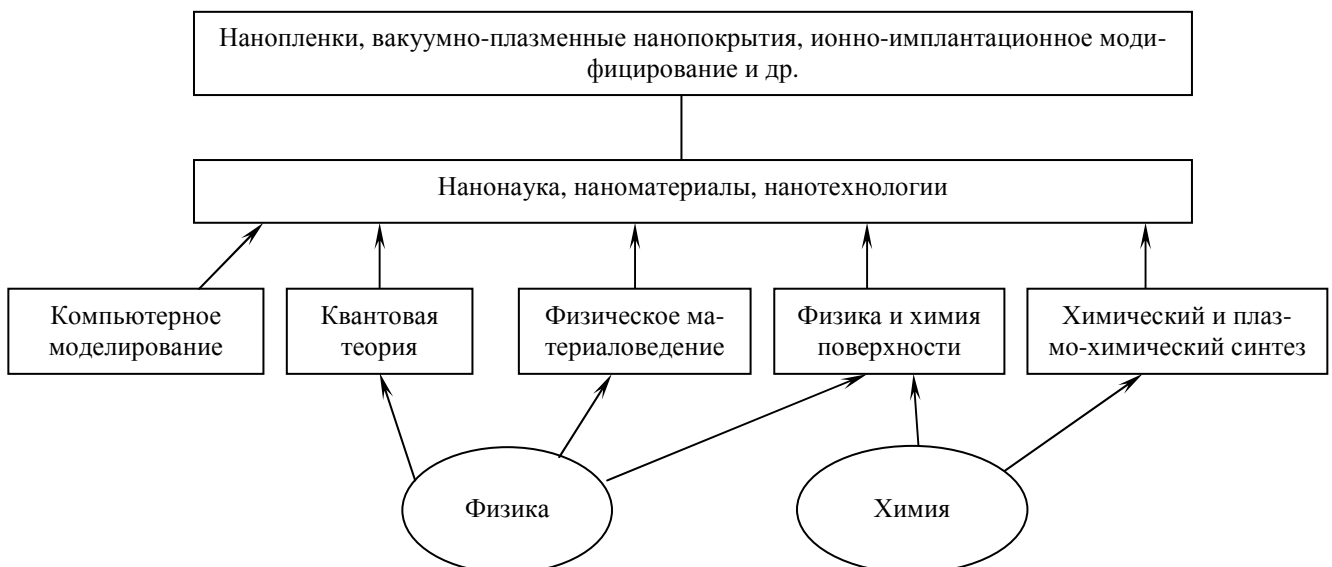


Рис. 5. Принципиальный базис получения наноструктурированного материала в поверхностном слое

Таблица
Усталостная прочность натуральных и модельных лопаток

№ ступени, марка сплава	Изделие	Предел выносливости σ_{-1} , МПа, ($N = 2 \cdot 10^7$ цикл)		$\Delta \sigma_{-1}$ %
		Серийная технология	Разработанная технология	
IV ст. РКВД, ВТ18У	99	440	ИИ, 540	23
III ст. РКВД, ВТ9	95, 195	450	ИИ, 500	11
II ст. РКНД, ВТ25У	20	380	ИИ, 420	10
II ст. РКНД, ЭИ961Ш	95, 195	520	ИИ+Ti-TiN, 560	8
IV ст. РКВД, Т9	95, 195	450	ИИ+Ti-TiN, 500	11
I ст. РКВД, ВТ8М	Д436Т-1	495*	ИИ, 533*	8
Имитаторы лопаток 20Х13	Паровые турбины	180, коррозионная среда	ИИ+Ti-TiN, 260, коррозионная среда	44
ВТ6		400	ИИ+Ti-TiN, 480	20

Примечание. В таблице обозначено: ИИ – ионная имплантация азота; РКВД – ротор компрессора высокого давления; РКНД – ротор компрессора низкого давления. * база $N=10^8$ цикл.

Видно, что многослойные покрытия не снижают усталостной прочности при повышении коррозионной стойкости в 2–3 раза.

Учитывая комплектность решения задачи, поверхность (собственно поверхность и некоторый приповерхностный слой) рассмотрена как некоторый технический объект, как система. Предложенная система (рис. 6) предопределяет тесную диалектическую взаимосвязь между конструктивным обликом собственно поверхности и некоторого приповерхностного слоя (задаваемым конструктором), технологией обработки, изменениями на этапах изготовления и эксплуатации, контролем, прочностью и др. Из этого следует, что решение проблемы повышения эксплуатационных свойств (надежности и долговечности) детали возможно лишь на основе решения целого ряда разнопрофильных задач – «конструирование» поверхности, разработка технологии ее получения с учетом наследственности, оценка химических, физико-механических свойств и структурно-фазового состава на этапе изготовления,

оценка релаксационной стойкости свойств при длительной высокотемпературной эксплуатации, установление связи: конструктивный облик поверхности–свойства поверхности–технология–эксплуатационные свойства (рис. 6).

При решении задачи конструирования, изготовления и контроля поверхности 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 мало пригодны 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 экзотермическая эмиссия, твердость (микротвердость), инфракрасное излучение, параметры субмикроструктуры, работа выхода электрона, электростатический потенциал, рентгеновская люминесценция и др.

ВЫВОДЫ

На основе достижений в области физики межатомных взаимодействий, интеграции фундаментальных знаний в областях физического материаловедения, химического синтеза и высокотехнологических способов получения (модифицирования) металлических материалов впервые в отечественной и мировой практике научно обоснованы и технически реализованы комбинированные и интегрированные ионно-плазменные технологии, в основе которых лежит ионная имплантация и ионно-плазменная конденсация. Впервые для промышленных конструкционных материалов, применяемых для изготовления лопаток ГТД и паровых турбин – сплавов на основе титана, железа и никеля, раскрыты закономерности формирования физико-химического состояния поверхностного слоя при ионной имплантации, в том числе в комбинации с многослойными наноструктурированными покрытиями Ti-TiN, Zr-ZrN (рис. 3, 4).

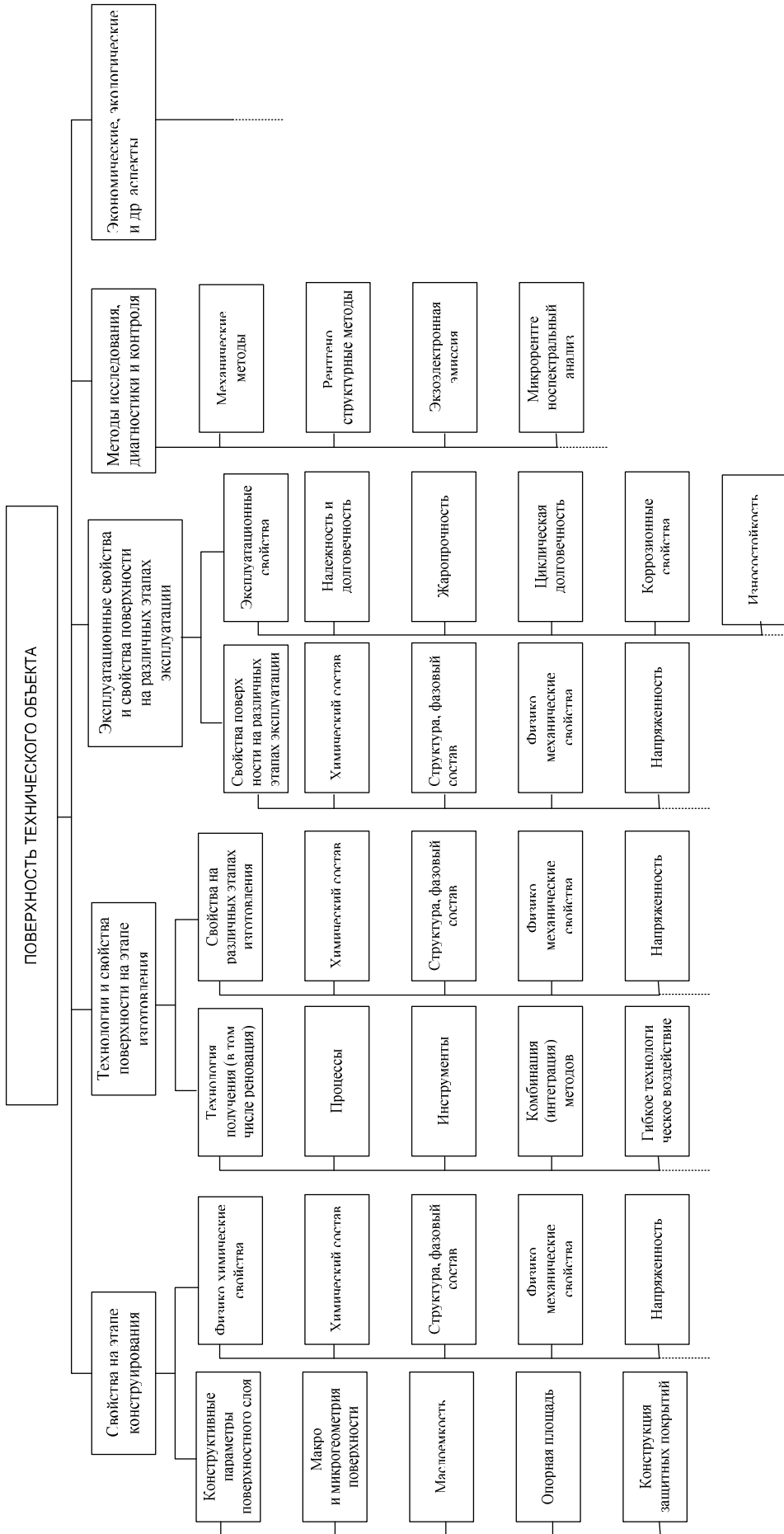


Рис. 6. Представление объекта «поверхность» в виде системы

При этом в поверхностном слое материалов лопаток получены сплавы, которые по химическому и структурно-фазовому составу традиционными методами получить невозможно. В зависимости от материала деталей и условий их эксплуатации (по температуре, напряжениям, ресурсу и коррозионной среде) реализуются варианты технологий, обеспечивающие требуемые эксплуатационные свойства изделий. При этом варьируются сорт ионов, доза, энергия, ионный ток, время модифицирования, режимы постимплантационной термической обработки, состав защитного покрытия, его структура, общая толщина и количество слоев в композиции. Целенаправленным изменением параметров плазмы возможно управление плазмо-химическими реакциями в поверхностном слое с образованием требуемой структуры и фазового состава конденсированных покрытий.

Ионно-лучевую имплантацию и вакуумную ионно-плазменную конденсацию в полной мере можно отнести к разряду нанотехнологий с получением наноструктурированных композиционных материалов. Во-первых, с помощью ионных источников осуществляется «производство» наночастиц – ионов, электронов, атомов и их кластеров, и эти наночастицы осуществляют модифицирование поверхности. Процессы имплантации и конденсации с высокой точностью управляются и контролируются таким образом, что возможны «введение» или конденсация химических веществ строго заданного количества. Во-вторых, слои с измененными химическим и структурно-фазовым составом варьируются в широких пределах и составляют толщины, измеряемые нанометрами.

В-третьих, ионы имплантанта или конденсата вследствие плазмо-химических реакций и «самосборки» образуют в модифицированном поверхностном слое частицы новых фаз нанометрических размеров. Теоретическими исследованиями и физическими экспериментами на образцах, моделях и натуральных деталях, в том числе эксплуатационными испытаниями доказано, что для повышения усталостной прочности оптимальными являются реакционно-активные вещества – азот, бор, углерод, на основе которых при реализации имплантационной технологии происходит синтез высокопрочных фаз – нитридов, боридов и карбидов металлов. Требуемые по условиям эксплуатации высокие коррозионно- и эрозионные свойства реализуются созданием покрытия в виде многослойного композита, в котором

вследствие плазмо-химических реакций образуются высокопрочные слои. Впервые в отечественной и мировой практике спроектированы и изготовлены технологические ускорители – имплантеры и специальные установки, реализующие двухступенчатый режим вакуумно-дугового разряда (ионная имплантация плюс ионно-плазменная конденсация).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мухин, В. С.** Поверхность: технологические основы прочности деталей ГТД / В. С. Мухин. М.: Наука, 2005. 296 с.
2. **Мухин, В. С.** Поверхность технического объекта: физика, химия, механика, нанотехнология модифицирования / В. С. Мухин, С. Р. Шехтман Вестник УГАТУ, 2007. Т. 9, № 1 (19). С. 84–91.
3. **Головин, Ю. И.** Введение в нанотехнологию / Ю. И. Головин. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.
4. **Будилов, В. В.** Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов. Физические основы и технические решения / В. В. Будилов, В. С. Мухин, С. Р. Шехтман. М.: Наука, 2008. 194 с.
5. **Смыслов, А. М.** Повышение эксплуатационных свойств лопаток из титанового сплава ВТ6 ионно-имплантационным и вакуумно-плазменным модифицированием поверхности / А. М. Смыслов, С. П. Павлинич, К. С. Селиванов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 8. С. 31–38.

ОБ АВТОРАХ



Мухин Виктор Сергеевич, проф. каф. технологии машиностроения. Засл. деят. науки и техн. РБ и РФ. Чл.-кор., и. о. акад.-секр. отд. техн. наук АН РБ. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1962). Д-р техн. наук (МАИ, 1975). Иссл. в обл. прочн., надежн. и долговечности деталей технол. методами.



Смыслов Анатолий Михайлович, зав. той же каф. 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.