

УДК 621.438–192

## ПОВЕРХНОСТЬ: КОНСТРУИРОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ, СВОЙСТВА, ПРОЧНОСТЬ

В. С. МУХИН

УГАТУ, факультет авиационно-технологических систем  
Тел: (3472) 23 07 63 E-mail: kafedra@tm.ugatu.ac.ru

**Аннотация:** Рассмотрен такой объект, как поверхность детали. Показано, что модифицирование свойств металла поверхностного слоя происходит не только на этапе технологии изготовления, но и в процессе эксплуатации. Конструирование поверхности и технология изготовления должны осуществляться по условиям эксплуатации — температуре, нагрузкам, ресурсу, среде

**Ключевые слова:** поверхность; модифицирование; технология; прочность; разупрочнение; структура; физико-механические свойства; релаксация; ионная имплантация; деформационное упрочнение; вакуумно-плазменное покрытие

### ВВЕДЕНИЕ

Роль и значение поверхности, если ее рассматривать в широком аспекте, глобальна. Можно привести множество примеров, когда роль поверхности чрезвычайно высока: жизнь человека становится проблематичной, если всего 20% кожного покрова (поверхности) теряет свои свойства; плодородие планеты Земля определяется поверхностным слоем всего в 20–30 см и др. При этом свойства различных объектов определяются не только собственно внешней поверхностью, но и свойствами и взаимодействием поверхностей различных элементов, составляющих этот объект. Например, такое свойство, как сверхпластичность, зависит от свойств, протяженности и структуры границ зерен, представляющих собой поверхности раздела структурных составляющих. Аналогично этому свойства композиционного материала определяются взаимодействием поверхностей элементов, составляющих композицию. Из сказанного следует, что как в природе, так и технике роль поверхности чрезвычайно важна.

Ниже роль поверхности будет рассмотрена в достаточно узком диапазоне — применительно к техническим объектам.

Наиболее контрастно роль поверхности и влияние ее на эксплуатационные свойства изделия проявляется в такой отрасли машиностроения, как производство и эксплуатация газотурбинных двигателей (ГТД). И это не

случайно. С одной стороны, детали двигателей изготавливаются ажурными, пустотелыми и тонкостенными — это обусловлено необходимостью снижения веса. С другой, детали ГТД работают в условиях высоких и быстроменяющихся температур, агрессивных сред; одновременно материал деталей подвержен воздействию высоких статических и динамических напряжений, амплитуда и частота которых изменяются в широких пределах. Частая и быстрая смена температуры (тепловой удар) приводит к возникновению дополнительных термических напряжений.

Не случайно в этой связи появление различного рода дефектов (разрушение материала вследствие потери жаропрочности, накопление дефектов структуры и развитие трещин усталости, коррозия, термоусталость, разрушение при контактном взаимодействии деталей) в подавляющем большинстве случаев наблюдается в тонком приповерхностном слое деталей, что является первопричиной снижения общей прочности и разрушения деталей в эксплуатации.

На рис. 1 рассмотрен такой объект, как поверхность. Предложенная система предусматривает тесную диалектическую взаимосвязь между конструктивным обликом поверхности, технологией ее получения и последующими изменениями на протяжении всего жизненного цикла двигателя. В рамках одной публикации не представляется возмож-

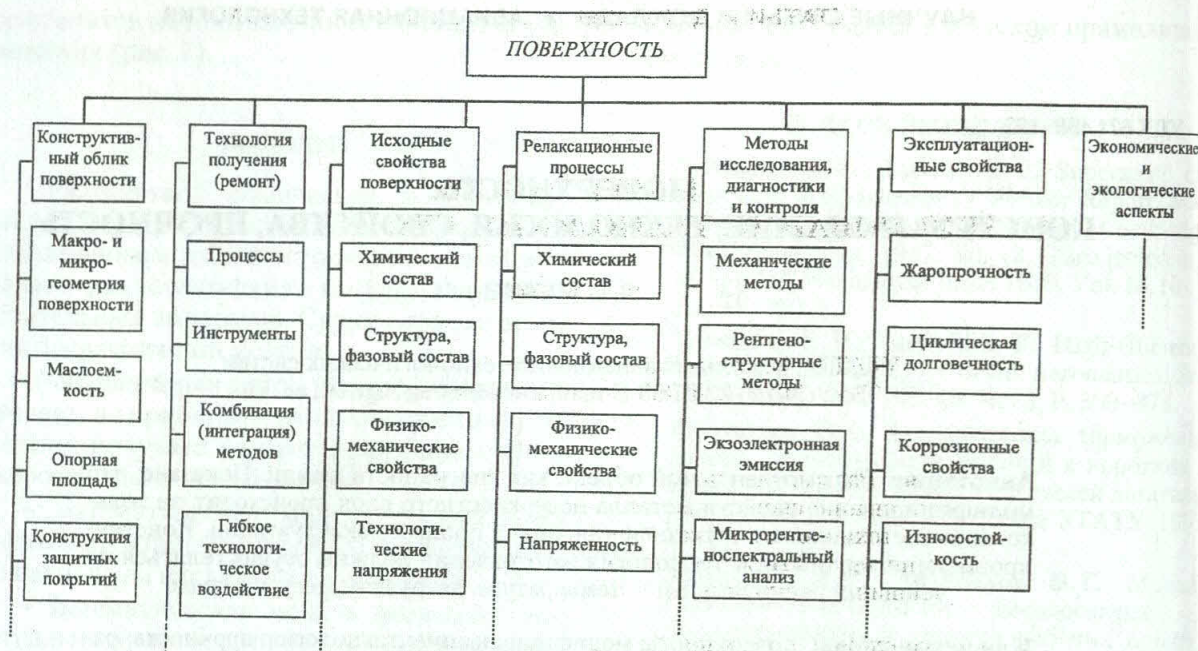


Рис. 1. Представление такого объекта, как поверхность, в виде системы

ным подробно рассмотреть все аспекты системы: например, охарактеризовать поверхность, задаваемые конструктором — по геометрическим параметрам собственно поверхности, толщинам упрочненных слоев и др., тем более охарактеризовать технологии формообразования и упрочнения, свойства на различных этапах изготовления деталей и их эксплуатации и т. д. Будут приведены лишь отдельные примеры, раскрывающие свойства поверхности и свойства деталей в целом, релаксационные процессы, новые технологии и др.

#### ПРИЧИНЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ СВЯЗ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЧНОСТИ

Связь технологии с прочностью деталей проявляется через свойства поверхности — последние формируются при изготовлении деталей. Основные причинно-следственные связи технологии и прочности следующие:

1. При всех основных способах нагружения поверхностный слой деталей оказывается более нагруженным, чем сердцевина. Примером могут служить чистый изгиб, поперечный изгиб, кручение, вдавливание и др. Даже при растяжении (сжатии) в поверхностном слое имеют место более благоприятные условия для пластического течения и разрушения по сравнению с сердцевиной, поскольку здесь имеют место неуравновешенные атомные связи, облегчен выход дислокаций и вакансий

на поверхность, меньше требуется энергии для генерирования дислокаций источниками. В этом случае разупрочняющее действие на металл поверхностного слоя оказывают также экструзия и энтузия. Рабочие напряжения складываются с технологическими остаточными макронапряжениями; это приводит к резкому возрастанию результирующих напряжений, действующих в процессе эксплуатации детали. В случае действия знакопеременных нагрузок технологические напряжения приводят к существенной асимметрии цикла, что, как известно, также отрицательно сказывается на работоспособности детали. Таким образом, с позиций прочности детали оказывается небезразличным то, какая будет применена технология обработки детали, обуславливающая напряженное состояние металла поверхностного слоя.

2. Обработка деталей формирует определенный, свойственный каждому методу обработки свой макро-, микро- и субмикрорельеф обработанной поверхности. Риски и неровности на обработанной поверхности становятся своего рода концентраторами напряжений — местами, являющимися очагами образования и развития трещин, особенно трещин усталости. В современной практике производится расчет не только амплитуды соответствующей гармоники профиля, но и «условного»

коэффициента концентрации напряжений

$$\alpha_n = \frac{A_n}{B_n},$$

где  $A_n$  — амплитуда;  $B_n$  — шаг соответствующей гармоники.

3. Известно, что образование трещины в идеальной по своему строению кристаллической решетке невозможно. Разрушение такого кристалла происходит с одновременным разрушением всех атомных связей по всему сечению без пластической деформации и без образования и развития трещин. Прочность в этом случае приближается к теоретической прочности, которая, как известно, в десятки раз выше прочности реального металла. Для образования трещины в реальном металле необходима пластическая деформация, которая при плотности несовершенств (дефектов) кристаллической решетки критической величины приводит к образованию незалечивающихся трещин. Известна ответственность пластической деформации за возникновение микротрещин. Суть вопроса состоит в том, что на самых ранних стадиях пластического деформирования взаимодействие дислокаций приводит к образованию микротрещин атомного масштаба. Как показывают исследования, уже при степенях деформации порядка 6–8% в металле возникают незалечивающиеся микротрещины, причем коэффициент сопротивления их распространению при превышении указанных степеней деформации резко падает.

Технология механической обработки и деформационного упрочнения предусматривает изготовление детали путем срезания и деформации металла; срезание осуществляется путем пластической деформации и разрушения определенного слоя. Однако интенсивной деформации подвергается не только стружка, но и некоторый слой металла, лежащий ниже линии среза, образующий поверхность детали. В результате новая, только что изготовленная деталь в тонком приповерхностном слое уже имеет очаги разрушения в виде субмикротрещин. Отсюда становится ясной связь между технологией изготовления и эксплуатационными свойствами деталей.

4. В процессе эксплуатации поверхности деталей подвержены воздействию внешней среды — тепловому, коррозионному, механическому и эрозионно-кавитационному. Применительно к авиационной и ракетной технике температура колеблется в широких пределах — от отрицательной до тысячи и более

градусов тепла. При этом характерна работа деталей в условиях частых теплосмен, поверхность же деталей в отличие от сердцевинных испытывает резкие тепловые удары. Последние приводят к термоусталостному разрушению первоначально поверхности, а впоследствии и всей детали в целом.

Различные компоненты топлива, окислителя, продукты сгорания, морской климат и пр. приводят к коррозионному разрушению поверхности деталей и узлов. Следует отметить, что при эксплуатации авиационной техники воздействие агрессивной среды в чистом виде встречается крайне редко. Всегда имеет место и механическое воздействие вследствие действия рабочих напряжений. Поэтому в подавляющем большинстве случаев встречаются коррозионно-механические дефекты (повреждения): окисление, межкристаллитная и питтинговая коррозия, коррозионная усталость, коррозионное растрескивание и коррозия при трении.

С точки зрения сопротивления коррозионно-механическому разрушению небезразлично, какая технология на финишном этапе применена, ибо последняя определяет не только прочностные и пластические свойства металла поверхностного слоя, но и его химический и структурно-фазовый состав, электрический потенциал, диффузионную подвижность атомов, экзотермическую эмиссию, термодинамическую стабильность и др.

5. Опыт нанесения покрытий и эксплуатации деталей с покрытием показал, что работоспособность деталей зависит не только и не столько от собственно покрытий, сколько от комплекса «покрытие-подложка». Для получения качественного покрытия (по геометрическим параметрам, структуре, адгезии, внутренним напряжениям и др.) необходимо по соответствующей технологии получить требуемые свойства подложки (по микрогеометрии поверхности, наклепу, напряженности, структуре и др.). Из сказанного следует, что надежность и долговечность деталей ГТД определяется технологией на всех этапах изготовления.

6. Прогноз о работоспособности детали после определенной наработки двигателя возможен на основании знаний закономерностей процессов релаксации и разупрочнения материала в поверхностном слое. Исследования показывают, что последние находятся в тесной корреляционной связи с исходными, технологией определяемыми свойствами поверхности. Следовательно, от технологии за-

висят не только начальные свойства детали, но и ее свойства на каждом этапе эксплуатации.

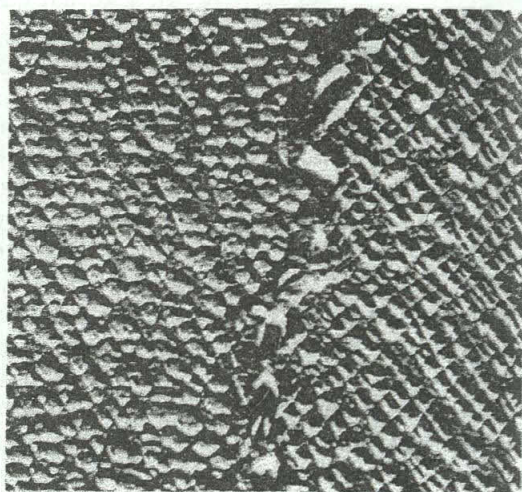
### ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НА СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ

Формообразование деталей при различных технологических процессах характеризуется высокими скоростью и степенью пластической деформации, высокими локальными температурами и нагрузками, имеют место адгезионные и диффузионные процессы. Изменение параметров макро-, микро- и субмикроструктуры влияет практически на все физико-механические свойства — механические, термические, электрические, магнитные, оптические, ядерные и др. На рис. 2 сопоставлена структура исходного жаропрочного сплава ХН51ВМТЮКФР со структурой этого сплава в поверхностном слое замка турбинной лопатки.

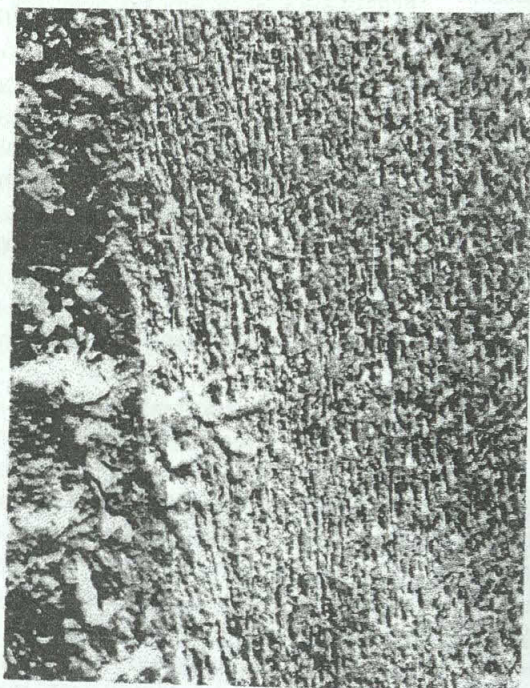
Видно, что упрочняющая  $\gamma'$ -фаза, ответственная за жаропрочные свойства, вследствие пластической деформации претерпела существенные изменения: имеют место дробление, деформация, разрушение. Вместе с тем при нормальной температуре проявляется эффект деформационного упрочнения:  $\sigma_B = 1380$  МПа, у недеформированного  $\sigma_B = 1140$  МПа. Однако при эксплуатационной температуре  $900^\circ\text{C}$  даже при кратковременных испытаниях деформация отрицательно сказывается на прочности:  $\sigma_B = 160$  и  $280$  МПа соответственно. Кроме изменения свойств, в поверхностном слое формируются остаточные напряжения, величина, знак и характер эпюры которых зависят от метода обработки, режимов и марки обрабатываемого материала (рис. 3).

### РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

В процессе высокотемпературной эксплуатации вследствие термодинамической неустойчивости в металле поверхностного слоя постоянно протекают релаксационные процессы: рекристаллизация, изменение твердости, пластичности и прочности, изменяются остаточные напряжения. На рис. 4 показано типичное изменение структуры сплава ХН51ВМТЮКФР (замок турбинной лопатки) после длительной эксплуатации.



a



б

Рис. 2. Сопоставление структур жаропрочного сплава ХН51ВМТЮКФР ( $\times 5000$ ): а — исходная структура сплава; б — структура этого сплава в зоне контакта инструмент-деталь при фрезеровании замка турбинной лопатки (слева — твердый сплав ВК6М)

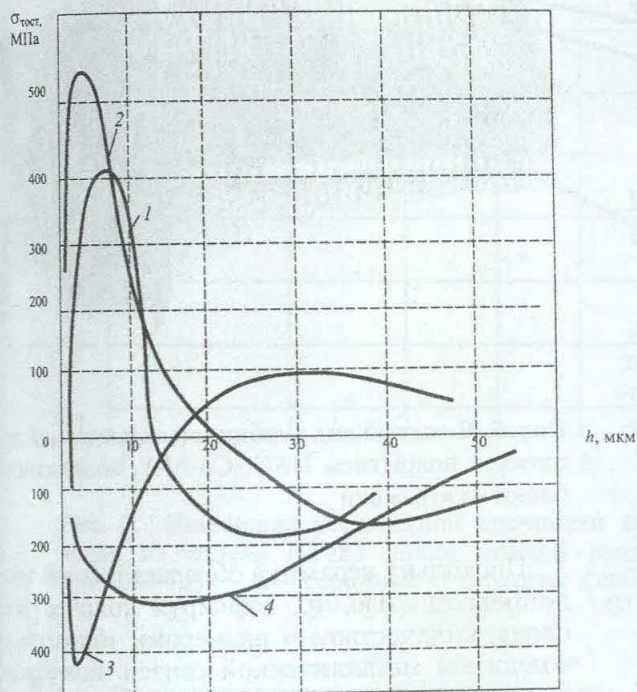


Рис. 3. Эпюры технологических тангенциальных остаточных напряжений, сплав ВТ9: 1 — электроалмазное шлифование; 2 — фрезерование цилиндрическое; 3 — упрочнение микрошариками; 4 — упрочнение алмазным выглаживанием

Дефектный слой состоит из трех более тонких слоев: непосредственно на поверхности имеется слой окислов, далее идет рекристаллизованный мелкозернистый слой с окисленными границами зерен. Этот слой представляет металлоокисную смесь. К сердцевине прилегает третий также рекристаллизованный слой, но без заметного окисления границ. Окисление поверхностного слоя протекает не только путем интенсивного нарастания слоев окислов на поверхности, но также путем одновременного окисления значительного слоя металла, затронутого диффузионными процессами. В таком слое независимо от величины и знака исходных технологических напряжений формируются остаточные сжимающие напряжения (особенность никелевых сплавов). Механизм образования этих напряжений связан с термическим воздействием и обусловлен окислением, изменением структуры и химического состава поверхностного слоя.

В качестве примера, применительно к усталостным испытаниям сплава ХН51ВМТЮКФР, можно привести зависимость для определения толщины слоя с измененным химическим и структурно-фазовым составом

$$H_c = 15,7 + 0,2h - 0,016\Theta - 0,91\sigma_{-1} - 2,05\tau + 0,00026h\Theta + 0,0015h\sigma_{-1} + 0,0031h\tau + 0,001\Theta\sigma_{-1} + 0,002\Theta\tau + 0,023\sigma_{-1}\tau.$$

Зависимость получена при следующих условиях: температура испытания  $\Theta = 800 \dots 950^\circ \text{C}$ , остаточные осевые напряжения  $100 \dots 430 \text{ МПа}$ , длительность динамических испытаний  $\tau = 2 \dots 12 \text{ ч}$ , напряжения  $\sigma_{-1} = 40 \dots 140 \text{ МПа}$ , толщина слоя с деформационным упрочнением (независимо от метода)  $h = 30 \dots 100 \text{ мкм}$ .

#### НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМОБРАЗОВАНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Установлено (исследования выполнены проф. В. В. Будиловым), что в системе (рис. 5), состоящей из специального экрана в виде сетки и обрабатываемой поверхности детали, находящейся под отрицательным потенциалом, формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц, генерируемых быстрыми осциллирующими электронами, эмиттируемыми с поверхности катодной полости.

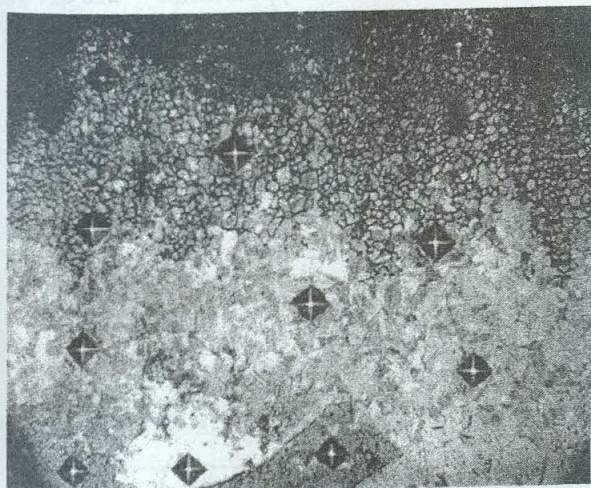


Рис. 4. Изменение структуры металла поверхностного слоя в процессе высокотемпературных испытаний (сплав ХН51ВМТЮКФР,  $\times 600$ )

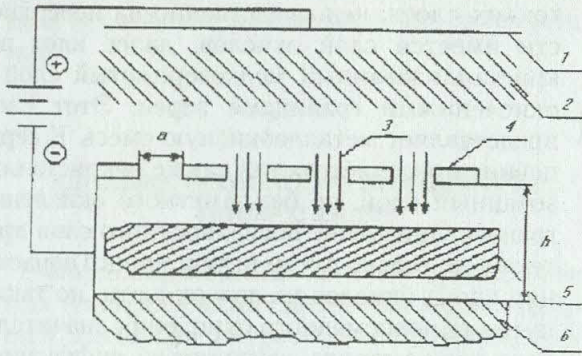


Рис. 5. Схема обработки поверхности с использованием эффекта полого катода: 1 — анод; 2 — плазма тлеющего разряда; 3 — ионный поток; 4 — технологический экран; 5 — плазма полого катода; 6 — поверхность детали

Условие возникновения эффекта полого катода между обрабатываемой поверхностью и экраном описывается соотношениями:

$$h \leq \frac{4}{3} \left( \frac{\epsilon_0}{0,4n_e} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{ekT_e} \left( \frac{u_i}{\gamma(1-\chi D)} \right)^{\frac{3}{4}};$$

$$\alpha \leq \frac{4}{3} \left( \frac{\epsilon_0}{0,4n_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{ekT_e} \right)^{\frac{1}{4}} u_c^{\frac{3}{4}},$$

где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума;  $e$  — заряд электрона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $\gamma$  — коэффициент ионно-электронной эмиссии;  $\chi$  — доля ионов, уходящих через экран;  $u_c$  — потенциал на детали,  $T_e$  — электронная температура;  $n_i$ ,  $n_e$  — концентрация частиц;  $D$  — прозрачность экрана;  $a$  — размер ячейки сетки;  $h$  — расстояние между экраном и обрабатываемой поверхностью.

Предлагаемая вакуумно-плазменная технология позволяет увеличить скорость распыления (при ионной очистке, полировании) в 4 раза, повысить температуру поверхности в 4–5 раз, повысить адгезию покрытия. Получаемое покрытие с микрокристаллической структурой повышает жаропрочность и жаростойкость лопаток турбины.

Разделение и перемещение фронта наращивания покрытия при газоплазменном осаждении позволяют подавать в различные окна экрана различные по природе вещества и материалы. Реализуется регуляризация структуры как по толщине, так и по поверхности. На рис. 6 показана турбинная охлаждаемая лопатка, на поверхности пера которой сформировано покрытие системы Ni-Cr-Co-Al-Y, содержащее в свою очередь «блоки» из металлокерамики.

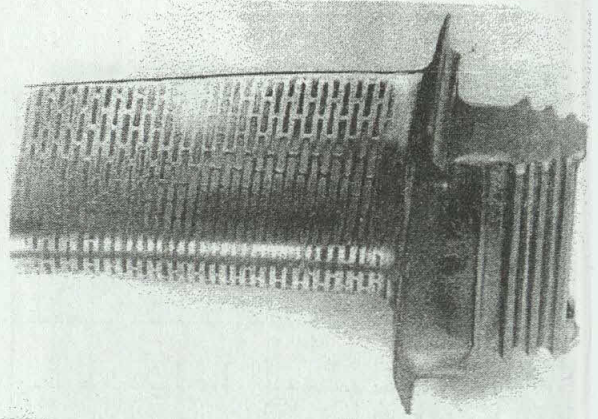


Рис. 6. Внешний вид турбинной охлаждаемой лопатки с покрытием Ni-Cr-Co-Al-Y, содержащим блоки из керамики

Поскольку керамика обладает низкой теплопроводностью, то, варьируя количеством слоев, количеством и размерами «блоков» и толщиной металлической связки, возможно получение защитного покрытия с требуемой жаростойкостью и жаропрочностью.

Кардинальным способом изменения химического и структурно-фазового состава, а следовательно, и свойств поверхности является ионно-имплантационная технология (исследования выполнены проф. А. М. Смысловым). Отсутствие проблемы адгезии, точная дозировка легирующего элемента, независимость от пределов химической растворимости, реализация процесса при низких температурах и др. — все это выгодно отличает ионное легирование от других технологий.

Процесс реализуется на ускорителях заряженных частиц при энергии 20...300 кэВ и ионных токах от нескольких микроампер до многих миллиампер. Если известны тип и энергия ионов и свойства обрабатываемого материала, то концентрация и глубина проникновения могут быть вычислены соответственно по формулам:

$$N(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp \left\{ -\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right\};$$

$$R = \frac{13E_1}{\rho} \left( \frac{1 + \frac{M_2}{M_1}}{Z_1^{\frac{2}{3}}} \right),$$

где  $D$  — доза облучения (ион/см<sup>2</sup>);  $R_p$  — средний проецированный пробег (нм);

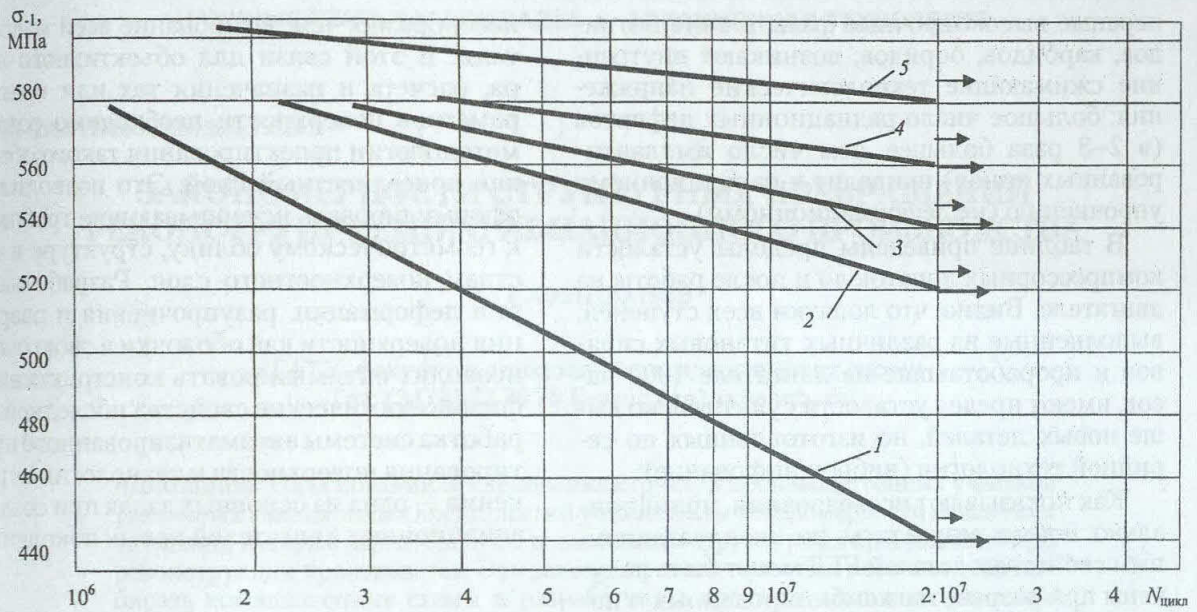


Рис. 7. Изменение усталостной прочности лопаток IV ступени компрессора высокого давления из сплава ВТ18У после ионной имплантации в поверхность ( $\Theta_{исп} = 200^\circ \text{C}$ ,  $f = 1000 \text{ Гц}$ ): 1 – серийная технология (виброшлифование); 2 – имплантированные ионы N<sup>+</sup>; 3 – C<sup>+</sup>; 4 – V<sup>+</sup>; 5 – ИИ + отжиг в контролируемой среде

$\Delta R_p$  – стандартное отклонение проецированного пробега;  $R$  – глубина проникновения иона;  $\rho$  и  $M_2$  – плотность материала ( $\text{г/см}^3$ ) и массовое число атомов мишени;  $M_1$  и  $Z_1$  – массовое число и атомный номер иона,  $E_1$  – начальная энергия иона (кэВ).

На рис. 7 приведены результаты натуральных усталостных испытаний компрессорных лопаток, в поверхность которых были имплантированы различные ионы (энергия – 40 кэВ,

доза  $2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>). Видно, что ионной имплантацией (ИИ) различных веществ возможно существенное повышение предела усталости (по сравнению с традиционной технологией виброшлифования). Исследования показывают, что эффект обусловлен рядом обстоятельств: ионная бомбардировка устраняет дефектный слой, полученный механической обработкой, вследствие протекания химических реакций образуются мелкодис-

Таблица

Влияние ионной имплантации азота и наработки на двигателе на предел усталости лопаток компрессора

№ п/п	Сплав, ступень	Предел усталости, МПа		$\Delta\sigma_{-1}$ , %	Предел усталости после наработки 1000 ч, МПа		$\Delta\sigma_{-1}$ , %
		серийная технология (виброшлифование)	имплантация N <sup>+</sup> , $2 \cdot 10^{17}$ ион/см <sup>2</sup> , 30 кэВ		серийная технология	имплантация N <sup>+</sup> , $2 \cdot 10^{17}$ ион/см <sup>2</sup> , 30 кэВ	
1	ВТ9, III	450	500	11,1	430	480	11,6
2	ВТ9, VII	450	480	9	430	470	9,0
3	ВТ18У, IV	440	500	22,7	420	520	23,8
4	ВТ3-1, III	460	500	8,6	440	490	10,2

персные высокопрочные фазы в виде нитридов, карбидов, боридов; возникают внутренние сжимающие технологические напряжения; большое число радиационных дефектов (в 2–3 раза больше, чем число имплантированных ионов) приводит к радиационному упрочнению (не деформационному).

В таблице приведены пределы усталости компрессорных лопаток до и после работы на двигателе. Видно, что лопатки всех ступеней, выполненные из различных титановых сплавов и проработавшие на двигателе 1000 часов, имеют предел усталости существенно выше новых деталей, но изготовленных по серийной технологии (виброшлифование).

Как показывают исследования, принципиально новые результаты по эксплуатационным свойствам деталей ГТД могут быть получены при разработке комбинированных и интегрированных технологий — ионная имплантация совместно с вакуумно-плазменным осаждением покрытия, ионная имплантация в металлы, имеющие субмикро- или нанокристаллическую структуру, и т. д.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных данных следует, что придание специальных свойств поверхностному слою — это наиболее радикальный способ повышения эксплуатационных свойств деталей, с другой стороны, экономически это более це-

лесообразно, чем легирование всей массы детали. В этой связи для объективного выбора, расчета и назначения тех или иных параметров поверхности необходимо создание методологии проектирования такого объекта, как поверхностный слой. Это позволило бы сформулировать исчерпывающие требования к геометрическому облику, структуре и свойствам поверхностного слоя. Разработка теории деформации, разупрочнения и разрушения поверхности как оболочки в свою очередь позволит оптимизировать конструктивные и физико-химические свойства последней. Разработка системы автоматизированного проектирования поверхности и технологии ее получения — одна из основных задач при создании авиационных двигателей новых поколений.

#### ОБ АВТОРЕ

**Мухин Виктор Сергеевич**, профессор, зав. кафедрой технологии машиностроения УГАТУ. И. о. академика-секретаря АН РБ. Дипл. инженер-механик по авиационным двигателям (УГАТУ, 1962), д-р техн. наук в области технологии производства ЛА и их двигателей (МАИ, 1975). Исследования в области прочности, надежности и долговечности деталей ГТД.

