

**УПРОЧНЕНИЕ ПЕРИФЕРИИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЦЕЛЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ
СНИЖЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ
ПОСЛЕ КАСАНИЯ О СТАТОР**

БАРВИНОК В.А., БОГДАНОВИЧ В.И., АНАНЬЕВА Е.А.

СГАУ им. С.П.Королева, Самара, Россия,

КОСТЫШЕВ В.А., СИММА Л.И., КОСЫРЕВ С.А.

СНТК им. Н.Д. Кузнецова, Самара, Россия,

ТОПОЛЯНСКИЙ П.А.

НПФ «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия

Целью данного литературного обзора является обоснование проведения экспериментальных работ по упрочнению кромок пера лопаток компрессора высокого давления (КВД) авиационных двигателей для поддержания уровня их усталостной прочности после касания о статор.

В осевых компрессорах для уменьшения перетекания сжимаемого газа через кромки лопаток минимизируют радиальные зазоры между статором и ротором. При этом допускается динамическое касание (чиркание) торцев лопаток (неподвижных направляющих о поверхность вращающегося ротора, а вращающихся рабочих лопаток о поверхность неподвижного статора) о препятствие. На поверхность, по которой «чиркают» лопатки, наносится легкосрабатываемое покрытие для уменьшения повреждений лопаток. Однако повреждения все же остаются.

В процессе касания может происходить локальный нагрев торцевой части лопатки на глубину 0,05...0,10 мм до температур порядка 600...650°C, что приводит к снижению эффекта от предварительного упрочнения.

При этом формируются дефекты – царапины, трещины, выбоины, которые в условиях высоких температур и динамических нагрузок являются значительными концентраторами напряжений. Описанные явления приводят к снижению усталостной прочности лопатки. Это происходит только при глубоком, порядка 0,3...0,6 мм, врезании торца лопаток в уплотнительный слой. При неглубоком, 0,05...0,15 мм, врезании лопаток в легкосрабатываемый слой, по опыту СНТК, дефектов на торцах лопаток, снижающих выносливость не наблюдается.

Для сохранения выносливости при возможных касаниях можно использовать разнообразные методы упрочнения аналогичные методам поверхностной обработки для повышения его эрозионной стойкости.

Это ионно-плазменное напыление, финишное плазменное упрочнение, ионная имплантация и ионная имплантация в комбинации с ионно-плазменным напылением.

Для упрочнения периферии пера лопаток, перспективными могут оказаться такие как плазменное напыление, электроискровое легирование, методы армирования торцев пера лопаток с применением диффузионной сварки.

Все перечисленные методы теоретически позволяют предотвратить снижение усталостной прочности, но в то же время требуют экспериментальной проверки для конкретных деталей и условий работы.

В литературном обзоре представлены различные методы обработки торцев пера лопаток, требования к поверхности, составы покрытий.

1.ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОКРЫТИЯМ НА ЛОПАТКАХ

Преимущества и недостатки методов обработки торцевой поверхности лопаток могут рассматриваться относительно их стойкости к внешним воздействиям и обеспечения стабильности технологии изготовления.

В обзоре рассматриваются следующие воздействия на рабочие лопатки ГТД.

Механические воздействия:

- воздействие газового потока на поверхность лопатки;
- воздействие твердых частиц (пыль, песок), содержащихся в атмосферном воздухе;
- статическая и динамическая деформация лопаток от рабочих нагрузок;
- повреждение торца пера лопатки при касании о статор;
- тепловое воздействие;
- рабочая температура лопаток, для которых обработка торцев имеет наибольший эффект составляет 450-600°С;
- при касании лопатки о статор температура в контакте может достигать 800°С.

Химическое воздействие:

- кислород;
- водяной пар;
- NaCl (характерно для атмосферы над акваторией моря);
- воздействие при нанесении покрытия;

- покрытие не должно ухудшать структуру основного материала;
- покрытие не должно снижать выносливость лопатки.

Наряду с требованиями по внешним воздействиям к покрытиям предъявляется ряд технологических и эксплуатационных требований.

Исходя из рассмотренных выше условий, формулируются требования к обработке поверхности лопатки и к модифицированному слою:

- 1.1.поверхность должна быть стойкой к эрозии;
- 1.2.зона с покрытием не должна снижать статическую прочность и выносливость лопатки;
- 1.3.поверхность должна иметь высокую твердость;
- 1.4.поверхность должна иметь хорошую трещиностойкость;
- 1.5.материал покрытия должен быть жаростойким и теплопроводным;
- 1.6.поверхностный слой должен обеспечивать защиту детали от высокотемпературной коррозии;
- 1.7.покрытие должно быть непроницаемым для элементов, находящихся во внешней среде и быть химически нейтральным;
- 1.8.химические и физические свойства материала покрытия и переходной зоны должны быть стабильными в течение ресурса;
- 1.9.технология получения или нанесения защитного поверхностного слоя должна быть стабильной.

Перечисленные требования были положены в основу сравнительной оценки разных покрытий.

2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В обзоре рассматриваются следующие методы обработки поверхности лопаток:

- ионная имплантация - метод, позволяющий осуществить модифицирование поверхностного слоя;
- армирование рабочей поверхности детали методом диффузионной сварки;
- вакуумное ионно-плазменное и плазменное напыление - методы, позволяющие осуществить нанесение покрытий на поверхности деталей;

- комбинированный метод обработки поверхностей деталей;
- финишное плазменное упрочнение (ФПУ);
- электроискровое легирование.

2.1. ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

Ионная имплантация (ИИ) – процесс, в котором практически любой элемент может быть внедрен в поверхностную область твердого тела.

Физическая сущность процесса ИИ заключается в бомбардировке поверхности детали ионными пучками. При этом ионизированные атомы, внедряясь в поверхностный слой «застревают» в кристаллической решетке бомбардируемой детали, образуют твердые растворы или новые химические соединения. Технология ИИ позволяет внедрять в поверхность химические элементы на глубину 0,01...10 мкм [8]. Толщина слоя с внедренными ионами зависит от энергии и массы ионов, от массы атомов материала детали. В процессе ИИ происходит образование соединений, которые в расплавленном состоянии не смешиваются, или легирование одного вещества в пропорциях, которых невозможно достичь даже при использовании высоких температур.

Также метод ИИ не зависит от пределов химической растворимости, температуры в процессе имплантации и концентрации химических элементов на поверхности мишени.

Энергия ионов может изменяться от нескольких (кэВ) до нескольких (МэВ), но в подавляющем большинстве случаев для обычных и жаропрочных хромоникелевых и титановых сплавов энергии внедряемых ионов находятся в пределах (20...300) эВ.

Распределение концентрации внедренных атомов по глубине поверхностного слоя в общем случае подчиняется закону Гаусса [4] и описывается функцией:

$$N(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi\Delta R p}} \exp\left\{-\frac{(x - Rp)^2}{2\Delta R^2 p}\right\},$$

где D - доза имплантации,

$$D = \frac{I \cdot t}{S \cdot q}$$

I - ионный ток в пучке, А;

t - время имплантации, С;

S - площадь мишени, см²;

q - заряд единичного иона, $1,6 \times 10^{-19}$ Кл;

R_p - величина пробега внедренного иона в материале мишени.

Максимальная концентрация внедренных атомов выражается соотношением

$$N_{\max} = \frac{D}{\sqrt{2\pi\Delta R_p}}, \quad \text{и располагается на глубине } R_p;$$

Концентрация вглубь от поверхности снижается в 2, 10, 100 раз по отношению к N_{\max} на глубинах:

$$X_2 \approx R_p \pm 1,2\Delta R_p; \quad X_{10} \approx R_p \pm 2\Delta R_p; \quad X_{100} \approx R_p \pm 3\Delta R_p;$$

Изменяя энергию и дозу облучения ионов, можно варьировать профилем распределения концентрации имплантированных атомов по глубине поверхностного слоя от десятков до нескольких сот мкм.

Установлено, что при имплантации различных ионов в стали профили концентраций достаточно удовлетворительно описываются гауссовским распределением, причем с увеличением массового числа имплантируемых ионов положение максимума концентраций сдвигается в сторону поверхности.

Внедрение ионов в кристаллическую решетку обрабатываемого материала приводит к появлению дефектов структуры – вакансий, дислокаций, пор, межузельных атомов, происходит образование новых фаз. Проведение вакуумного отжига после ИИ ионов N^+ , C^+ , B^+ в титановые сплавы приводит к увеличению глубины проникновения имплантированных ионов в 2 раза, а также к образованию высокотвердых соединений TiN , TiC , TiB размером (20...60) нм в местах скопления дислокаций и на межфазных границах. Такие включения способствуют упрочнению сплавов вследствие формирования сжимающих микронапряжений вокруг них, что приводит к повышению усталостной прочности детали и повышению микротвердости ее поверхности. ИИ способствует закреплению дислокаций. Это также увеличивает сопротивление усталости. ИИ ионов N^+ в сплавы ВТ18У и ВТ1-0 при $D=(10^{17} \dots 2 \cdot 10^{17})$ ион/см² с последующим отжигом $t=540^\circ \text{C}$; $T=2$ ч приводит к увеличению микротвердости на 40-50% в сравнении с исходной микротвердостью [32].

Также в работе приводятся данные по характеристикам деталей из титановых сплавов (ВТ9, ВТ18У6, ВТ33, В8М),

обработанных ионными пучками из 70%С и 30%Н+ с последующим отжигом в вакууме.

После такой обработки изменяется химический и фазовый состав поверхностного слоя толщиной 0,2 мкм. Происходит очистка поверхности, удаление оксидов, образование мелкодисперсных карбидов и оксикарбидов, залечиваются макродефекты, снижается шероховатость с 20...300 мкм до 0,05...0,1 мкм, повышается микротвердость от 320...460 НV до 460...650 НV.

По данным [4] правильный выбор режимов обработки позволяет увеличить:

- предел усталости на 50...70%;
- сопротивление горячей солевой коррозии в условиях термоциклирования в 4-6 раз;
- сопротивление пылевой эрозии на 50%;
- жаростойкость в 2 раза;
- циклическую долговечность при нагрузке 370 МПа в 20-25 раз.

Наибольший эффект повышения эксплуатационных характеристик сталей (микротвердость, усталостная прочность и т.д.) и титановых сплавов достигается при дозах имплантации $D = (10^{16} \dots 10^{17}) \text{ см}^2$. Механизм упрочнения при различных дозах также имеет различный характер. Так для титановых сплавов BT1-0 и BT18У установлено немотонное изменение микротвердости в зависимости от величины дозы имплантации ионов азота.

При $D < (10^{17} \dots 2 \times 10^{17}) \text{ ион/см}^2$ повышение микротвердости H_p связано с увеличением числа радиационных дефектов (вакансии и атомы расположенные в межузельях).

На пути движения дислокаций и как следствие, упрочнением поверхности [23], при $D = 10^{18} \text{ ион/см}^2$ отмечается некоторое падение микротвердости, что обусловлено дальнейшей перестройкой дефектов решетки, появлением дополнительных устойчивых стоков вакансий и пор способствующих разупрочнению поверхности, а также эрозией поверхности.

Например, для сталей ферритного класса при имплантации ионов Н+ с $D = 10^{17} \text{ ион/см}^2$ это также объясняется действием радиационных дефектов и химическим действием имплантированных ионов.

Повышение износостойкости при ИИ связывается при определенных режимах с появлением пленок мягких окислов на поверхности, которые приводят к снижению силы трения. С наличием мелкодисперсных карбидных, нитридных и т.д.

включений, которые формируют гетерогенную структуру т.е. наличие высокотвердых включений в относительно мягкой матрице.

Повышение коррозионной стойкости при ИИ применительно к разнообразным сталям, титановым сплавам, никелю и его сплавам связано с имплантацией ионов, которые приводят к повышению сопротивления окислению: это ионы (Cr, Al, Y, Ca, Ba, La). Проведение кратковременного вакуумного отжига способствует диффузии имплантированных ионов, что приводит к расширению слоя стойкого к окислению.

Влияние ИИ на усталостную прочность можно привести из следующих примеров.

При испытании с фиксированной нагрузкой на изгиб с вращением образцов из коррозионно-стойкой стали типа (X18H9T) и титана, имплантированных азотом ($D = 2 \times 10^{17}$ ион/см², $E = 200$ кэВ), обнаружено (8...10)-кратное увеличение числа циклов до разрушения.

В условиях высокочастотного нагружения плоских образцов из мартенситной стали были получены аналогичные результаты после имплантации ионов двуокиси углерода CO₂ в количестве 2×10^{17} ион/см².

Наибольший эффект от ионной имплантации можно получить при правильном выборе типа ионов и режимов «бомбардировки», а также последующей окончательной обработки.

К преимуществам ИИ как метода модифицирования поверхности по сравнению с другими методами обработки поверхности относятся:

- увеличение растворимости в твердом состоянии;
- независимость образования сплавов от констант диффузии;
- возможность быстрого изменения состава сплава;
- возможность процесса при низких температурах (100...200) °С;
- незначительное изменение размеров обрабатываемой детали (в пределах 1 мкм);
- отсутствие проблем адгезии, т.к. не существует ярко выраженной поверхности раздела;
- возможно автоматизации обработки и контроля.

К недостаткам метода относятся;

- относительно высокая стоимость оборудования;
- недостаточная изученность физических процессов, происходящих при воздействии ионов с веществом;

– недостаточно глубокое проникновение ионов в поверхность «мишени».

2.2. ВАКУУМНЫЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ

Для защиты поверхности металлических деталей от коррозионного и эрозионного изнашивания, повышения усталостной прочности и жаростойкости используются покрытия, наносимые на поверхность деталей вакуумными методами [3,12,19].

Вакуумное напыление (ВН) – это методы, основанные на физических процессах испарения или распыления материалов в вакууме с последующей конденсацией продуктов на требуемой поверхности.

Процесс ВН можно разделить на три основные стадии:

- создание потока напыляемых частиц (атомов, молекул, ионов);
- транспортировка напыляемых частиц к напыляемой поверхности;
- осаждение напыляемых частиц.

Создание потока напыляемых частиц происходит при генерации вакуумной дуги на торцевой поверхности катода при остаточном давлении азота в камере ($10^{-1} \dots 10^{-4}$)Па. Получаемый при этом поток может состоять из ионов, электронов, нейтральных атомов и микрокапель [32]. При этом на выходе из электродугового генератора плазмы состав плазменной струи, в зависимости от режимов, оценивается следующими значениями: доля ионной фазы - 30...95 %, паровой фазы – 5...65 %, микрокапельной фазы – 20...0,5 %. Кинетическая энергия ионов достигает сотен электрон-вольт. Плазменная струя, выйдя со среза сопла генератора в свободномолекулярном режиме, проходит вакуумную камеру и направляется на поверхность металлической детали, находящейся под отрицательным потенциалом. Ионы плазмы, попадая в дебаевский слой около поверхности детали, ускоряются и нейтрализуются. Нейтральные атомы плазменного потока попадают на поверхность без изменения своей кинетической энергии.

Таким образом, на поверхность конденсации падает поток частиц распыляемого материала и молекул и атомов азота, которые, вступая в плазмохимические реакции образуют покрытие нитрида титана (TiN). Выделяются следующие стадии формирования покрытия: переход частиц из газовой фазы в адсорбционный слой и заполнение адсорбционного слоя атомарными металлами, а также атомами азота и молекулами азота; поверхностная миграция молекул азота и их диссоциация на атомы под действием термической и нетермической активации;

поверхностная миграция атомов металла и азота и их хемосорбция на активных центрах покрытия. Сумма хемосорбированных плотностей потоков атомов металла и азота с учетом их распыления определяет скорость роста покрытия и степень стехиометрии соединения [25].

Скорость роста и степень стехиометрии оптимизируют регулированием технологических параметров ионно-плазменных установок. К регулируемым параметрам относятся: J - ток электрической дуги генератора плазмы; J_H - ток соленоида, создающего магнитное поле в рабочей зоне генератора плазмы; P – давление рабочего газа в камере; U – напряжение, подаваемое на деталь; t – время напыления. Изменение любого из регулируемых технологических параметров вызывает изменение всех физико-химических свойств вакуумно-плазменных покрытий. Скорость роста покрытия в зависимости от регулирования вышеперечисленных параметров может изменяться в пределах ($10^{-3} \dots 0,1$) мкм/с, обеспечивая толщину покрытий ($0,1 \dots 100$) мкм.

Для получения покрытия TiN со стабильными свойствами (пористость, микротвердость, заданная степень стехиометрии, заданный уровень сжимающих микронапряжений в покрытии) при напылении на перо лопатки из материала ЭП718 параметры должны соответствовать значениям:

$$J_g \approx 75 \dots 120 \text{ A};$$

$$U \approx 160 \dots 250 \text{ B};$$

$$P_{\text{азота}} \approx (10^{-1} \dots 10^{-4}) \text{ Па};$$

$$T_{\text{напыления}} \approx 90 \text{ мин};$$

$$T_{\text{конденсации}} \approx 473 \dots 573 \text{ K} - \text{ для Ti сплавов};$$

$$T_{\text{конденсации}} \approx 473 \dots 623 \text{ K} - \text{ для жаропрочных стальных сплавов.}$$

В результате формируется покрытие с заданной степенью стехиометрии $\text{TiN}_{0,8}$; $\text{TiN}_{1,0}$, которые обладают наилучшими триботехническими свойствами. Поверхностная микротвердость составляет $15 \dots 26$ ГПа, прочность сцепления покрытия с основой превышает 30 МПа, величина остаточных сжимающих напряжений в покрытии не превышает $0,4$ ГПа [26]. Толщина покрытия в центральной зоне потока шириной $180 \dots 250$ мм составляет $10 \dots 15$ мкм, а в периферийной области вакуумной камеры $1,5 \dots 3$ мкм, причем разнотолщинность в «ядре» плазменного потока отсутствует.

В ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова проводились усталостные испытания лопаток компрессора ВД из материала ЭП718 с покрытием TiN пера лопатки и без покрытия на электродинамическом стенде. Лопатки закреплялись в зоне

хвостовика. Вибрационные испытания проводились с частотой $f=1080\text{Гц}$, база $N=20 \times 10^6$ циклов.

При этом снижение уровня высокоцикловой усталости для лопаток с покрытием в сравнении с лопатками без покрытия зафиксировано не было. Величина σ_{-1} составила 36 кгс/мм^2 в том и в другом случаях.

Подобные работы проводились на АО КПП «Авиамотор» (г. Казань). Усталостные испытания лопаток КВД 1, 6 ст. по подтверждению предела выносливости на базе 10^8 циклов проводились на первой изгибной форме колебаний на стенде ВЭДС – 1500 по техническим условиям NGV-1007-97, ОСТ 100807-77. Средний уровень усталостной прочности компрессорных лопаток составил 34 кгс/мм^2 , что коррелирует с данными СНТК. При этом предварительная механическая упрочняющая обработка поверхности пера лопатки приводит к повышению усталостной прочности до 40 кгс/мм^2 .

В Уфимском государственном техническом университете исследовалось влияние различных видов предварительной механической обработки поверхности без покрытия и с покрытием TiN на характеристики выносливости образцов из сталей 30ХГСНА и 13Х11Н2ВМФ-Ш [27]. Поверхности образцов подвергались шлифованию, пневмодинамическому упрочнению, суперфинишированию, алмазному выглаживанию. Во всех случаях обработки с покрытием TiN усталостная долговечность снижалась на 2...5 % от исходной (т.е. без покрытия). Также для образцов из стали 13Х11Н2В2МФ-Ш, прошедших перед напылением покрытий TiN, CrN, CrC следующую обработку: шлифование ($R_a 0,32 \text{ мкм}$), полирование + ИИ азота ($E = 30\text{кэВ}$, $D=2 \cdot 10^{17} \text{ ион/см}^2$), полирование + виброгалтовка + никель-кадмирование ($h=12...15 \text{ мкм}$).

Проведенные испытания показывают, что предел выносливости и усталостная долговечность образцов определяются видом предварительной механической обработки включая ИИ. Отсюда делается вывод, что вакуумные ионно-плазменные покрытия в отличие от электролитических не снижают предела выносливости исследованных материалов.

Практически во всех публикациях отмечена доминирующая роль нитрида титана в качестве защитного ионно-плазменного покрытия. Например, в работах [5,6,9] отмечается, что покрытия TiN обладают очень высокой адгезией порядка 25...32 МПа, низкой интенсивностью изнашивания, низким коэффициентом трения.

В работах [11,17] исследуются триботехнические характеристики TiN с жидкой смазкой. Установлено, что

интенсивность изнашивания таких покрытий и по ответной паре из большинства конструкционных материалов, а также из такого же покрытия меньше или порядка 10^{-11} . По существующей классификации износа это покрытие имеет первый класс износостойкости [11,16]. При сухом трении коэффициент трения лежит в диапазоне от 0,1 до 0,25. Таким образом, высокая твердость и износостойкость TiN могут обеспечить снижение повреждений деталей при касаниях с большими относительными скоростями. Проблема сохранения выносливости лопаток с таким покрытием может быть решена путем проведения рационального технологического процесса.

Метод вакуумного ионно-плазменного напыления можно охарактеризовать как совокупность методов обработки с использованием трех необходимых условий: наличие вакуума в качестве защитной среды, вещества в плазменном состоянии, а также ускоренных плазменных пучков заряженных частиц и потоков с помощью электрических и магнитных полей. Эти условия по сравнению с другими методами защиты поверхностей конструкционных материалов обеспечивают следующие принципиальные преимущества:

- чистота процессов (при $P \approx 10^{-2}$ Па содержание кислорода в вакуумной камере на два порядка меньше, чем в аргоне);
- протекание химических реакций прямого синтеза при смешивании плазменных потоков с газами (получение карбидов, нитридов, карбонитридов металлов);
- технология обеспечивает высокие скорости нанесения покрытий, возможность интенсификации процесса;
- обеспечивается очень высокая адгезионная стойкость покрытия в результате активации поверхности методом ионной бомбардировки;
- технология обеспечивает получение высокого уровня сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое без последующей механической обработки.

В тоже время имеются и недостатки метода:

- наличие в плазменном потоке микрокапельной фазы;
- возникновение микродуговых привязок на обрабатываемом изделии (дефекты типа елочка);
- недостаточная степень ионизации плазменного потока и большая дисперсия распределения ионов по энергиям;

- трудности в получении равномерного по толщине покрытия на деталях сложной формы;
- недостаточная степень автоматизации и диагностики процесса.

2.3. КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ

Заслуживает внимание совместное использование двух рассматриваемых выше способов (нанесение покрытий вакуумными методами, ионная имплантация) для улучшения эксплуатационных характеристик лопаток компрессора.

Возможны два варианта:

1. повышение адгезии покрытия к поверхности изделия;
2. улучшение свойств самого покрытия.

По первому варианту предлагается следующая технологическая цепочка:

- нанесение покрытия нитрида циркония толщиной 400...500 нм;
- ионная имплантация циркония дозой $5 \cdot 10^{16}$ см⁻² с энергией 60 кэВ на частотно-импульсном источнике;
- нанесение покрытия нитрида циркония толщиной 2...5 мкм.

По второму варианту:

- нанесение покрытия нитрида циркония;
- ионная имплантация азота и титана, азота и молибдена, азота и тантала (ниобия) на газометаллическом непрерывном источнике.

В [13] приведены данные по имплантации ионами (WC) ионно-плазменных покрытий NiN на стали. После ионно-лучевой обработки покрытий износостойкость возрастает в 6-6,5 раза, в то время как необработанное покрытие увеличивает износостойкость в 2-2,5 раза.

В работе [4] экспериментально исследовано влияние режимов модификации ионными пучками (МИП) на химический состав ВТ18У. Облучение проводили на модифицированном ускорителе «Тонус» с параметрами $E=0,2-0,5$ МэВ, длительность импульса облучения $t=80-100$ нс, плотность тока 20-100 А/см², образцы обрабатывались в вакууме $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. Ионная обработка не только изменяет химический состав приповерхностных слоев, но также модифицирует структурно-фазовое состояние на глубине значительно превышающее глубину «химического перемешивания». В слое толщиной 5-10 мкм установлено наличие остаточных микронапряжений, величина которых по оценкам достигает $9 \cdot 10^8$ Па.

В приповерхностном слое образуются и перераспределяются дефекты решетки, толщина модифицированного слоя растет с увеличением мощности ионного пучка. С увеличением энерговыделения монотонно возрастает шероховатость и уменьшается микротвердость. Окисление поверхности при малых плотностях пучка (25-70) А/см² идет интенсивно, при $j=(70-80)$ А/см² оксидная пленка практически отсутствует, а при $j=80$ А/см² содержанием оксидов в приповерхностном слое вновь возрастает. В работе анализируются механизмы наблюдаемых изменений. Над поверхностью материала в результате мощного воздействия образуется плазма, в которой интенсивно идут процессы ионизации, диффузии, окисления и т.д. Остывание плазмы сопровождается избирательной конденсацией её компонентов на поверхности образца.

В приповерхностной области происходит термообработка образца за счет быстрого нагрева и охлаждения. Интенсивное испарения и начало газодинамического разлета при быстром нагреве поверхности формирует интенсивную волну сжатия с уровнем давления (0,1-10) 10⁹ Па [4], которая может трансформироваться в ударную. Формирование и распространение таких волн в металлах вызывает увеличение концентрации дефектов на больших глубинах 50-100 мкм. При МИП по глубине можно выделить две области: ближняя область (10-15) мкм характеризуется сильными температурными напряжениями, в дальней области (до сотен микрон), температурные эффекты не играют особой роли.

Таким образом, исходя из литературных данных, следует, что метод ионной имплантации как сам по себе, так и в сочетании с нанесением покрытий является мощным инструментом управления механическими, коррозионными и другими свойствами приповерхностного слоя металлов.

2.4. МЕТОД АРМИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ

Одним из вариантов упрочнения кромки пера компрессора ГТД является метод формирования рабочей поверхности с применением износостойких пластин, соединяемых с лопаткой диффузионной сваркой. Этот метод широко применяется для упрочнения торцев турбинных лопаток и может быть использован для упрочнения торцев компрессорных лопаток.

Диффузионная сварка – прогрессивный метод получения неразъемных неподвижных соединений, позволяющий обеспечить

их высокую прочность в широком смысле и герметичность при более низкой массе и малых габаритных размерах соединительного шва по сравнению с традиционными способами сварки.

Основой диффузионной сварки является процесс получения неразъемного соединения в твердом состоянии, деформирующегося вследствие возникновения связей на атомном уровне, появляющихся в результате сближения контактных поверхностей использование локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых деталей [28].

В твердом теле могут действовать несколько механизмов диффузии:

- обмен местами атомов и вакансий (вакансионный);
- перемещение атомов по междоузлиям;
- одновременное, циклическое перемещение нескольких атомов (групповой);
- прямой обмен местами двух соседних атомов (обменный).

Основным параметром, характеризующим процесс диффузии является коэффициент диффузии D , который характеризует среднее число перемещений атомов через определенную площадь за единицу времени. В твердых телах существует экспоненциальная зависимость коэффициента от температуры. Эта зависимость может быть задана в общем случае уравнением

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

где D – коэффициент диффузии; D_0 – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации процесса диффузии; R – универсальная газовая постоянная.

К тому же необходимо учитывать, что данное уравнение характеризует диффузию в случае идеального примыкания рабочих поверхностей. Реальные же поверхности не бывают идеально гладкими и чистыми. Даже при самой тщательной механической обработке они имеют микронеровности, высота которых измеряется сотнями и тысячами межатомных расстояний.

Преодоление указанного препятствия достаточно просто достигается сваркой давлением.

При сварке давлением сближение поверхностей на межатомные расстояния достигается в результате пластической деформации в зоне сварки [29].

Данный способ сварки обеспечивает соединение различных материалов, как в однородных сочетаниях, так и в различных комбинациях, таких как жаропрочные никелевые сплавы, титановые сплавы и стали. Положительные результаты, полученные при комплексных исследованиях металлических диффузионных соединений жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ-12У, ЖС6К, ЖСЗДК, АНВ-300, ЛЖ-1, ЛЖ-3 и сталей ЭИ-961, 40Х, 45Х, Ст45 и других показали возможность применения способов диффузионной сварки в вакууме для соединения деталей роторов турбин и компрессоров малоразмерных ГТД и турбоагрегатов. На основании полученных результатов разработаны технологии диффузионной сварки в вакууме для различных типов (более 12) роторов турбин и компрессоров.

Диффузионное соединение жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У, ЖС-26, ЖС-32 с износостойкими никелевыми и кобальтовыми сплавами ВЖЛ2, 492, 55, 1100 легло в основу разработки технологии армирования торцев пера консольных турбины лопаток ГТД.

На рисунке представлена турбинная лопатка 1 торец пера, который армируется пластинкой 2 из износостойкого сплава.

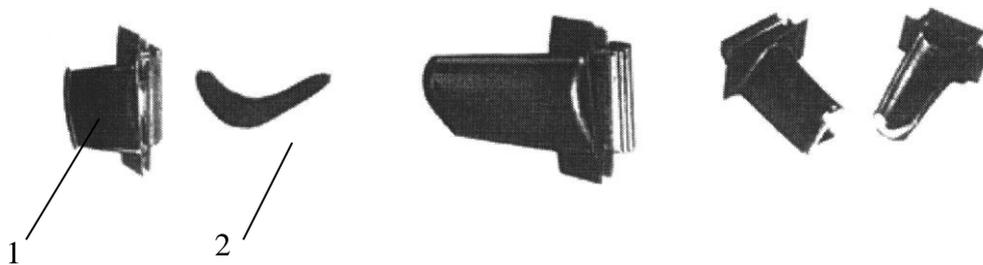


Рисунок. Общий вид турбинных лопаток с армируемым торцем пера

Технологический цикл сварки армирующих пластинок к торцам пера лопаток складывается из ряда последующих операций: подготовка свариваемых поверхностей, сборка деталей в вакуумной камере, нагрев зоны сварки до заданной температуры, сварка с приложением необходимого усилия сжатия в течение заданного промежутка времени и охлаждение лопаток в камере до температуры, исключающей окисление зоны сварки на воздухе.

Чистота обработки соединяемых поверхностей поставляемых деталей на сварку соответствовала шестому, седьмому классу. Грубые риски, царапины на соединяемых поверхностях не допускались. После механической обработки армирующие пластинки из сплава ВЖЛ2, ВКНА2 проходили люминесцентный контроль на предмет выявления трещин, пор, сколов и других

дефектов. Отклонение от плоскости стыкуемых поверхностей свариваемых деталей не превышало 0,02 мм. Армирующие пластинки изготавливали следующих размеров: длина—7мм, ширина—5мм.

В процессе отработки технологии армирования опытных лопаток были уточнены режимы диффузионной сварки. Температура пера лопатки в зоне сварки должна быть 1393-1403° К и контролировалась с помощью термопары, а как было сказано выше, армирующая пластинка перегревалась на 288-296° К, что обеспечивало получение качественного соединения. Как выяснилось в процессе исследования, давления сжатия более 7-10 МПа могут приводить к потере устойчивости пера лопатки в зоне нагрева. Поэтому в процессе сварки давление сжатия выше 10 МПа повышать нецелесообразно. Осадку армирующей пластинки в процессе сварки измеряли индикатором часового типа жестко связанным с подвижным штоком установки. Экспериментально было установлено, что оптимальные значения осадки армирующей пластинки находятся в пределах 0 - 0,3 мм. Для сочетания ЖС6У-492 температура сварки выше 1403° К и осадка образцов более 0,2 мм позволяет получать соединения с прочностью не менее $0,9\sigma_B$ сплава 492.

После армирования опытных лопаток часть из них была испытана путем скола армирующей пластины. В результате испытаний выявлено, что при соблюдении оптимальных режимов сварки разрушение соединения происходит с вырывами основного материала. Причем непроваров и несплошностей не обнаружено. Таким образом, настоящими исследованиями установлена целесообразность применения диффузионной сварки в вакууме для армирования торцев пера турбинных лопаток. Работоспособность диффузионных соединений сплавов ЖС6У и ЖС-26 со сплавами ВЖЛ-2 и 492 хорошая во всем диапазоне рабочих температур. Перспективные сплавы на кобальтовой основе 553 и 1100 не могут быть использованы для армирования в виду возможности образования жидкой фазы при нагреве выше 1373К, исключить которую, по-видимому, можно применением специальных прослоек.

Необходимо отметить, что армирование лопаток, изготовленных методом направленной кристаллизации (сплавы ЖС26 и ЖС32), перспективно с точки зрения укреплении связи кристаллов между собой на свободном торце пера.

Разработанная технология использована для изготовления натуральных лопаток ГТД.

К преимуществам метода относятся:

- возможность приваривания пластин большой толщины до 5мм;

- отсутствие проблем адгезии.
К недостаткам метода можно отнести:
- большая трудоемкость;
- малая производительность.

2.5. УПРОЧНЕНИЕ ТОРЦЕВ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК МЕТОДОМ ФИНИШНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ (ФПУ)

Процесс ФПУ состоит в финишной обработке кромки пера лопатки КВД путем поверхностного воздействия высокоэнергетической, насыщенной специальными реагентами движущейся струи, генерируемой при атмосферном давлении малогабаритным плазмотроном, с образованием тонкопленочного 1...3 мкм износостойкого покрытия и одновременным осуществлением процесса повторной закалки тонкого подпленочного слоя [22]. При этом температура кромки пера в процессе нанесения покрытия не превышает 100...120° С. Главный упрочняющий механизм ФПУ кромок состоит в формировании на поверхности трения износостойкого аморфного покрытия с особыми свойствами имеющего микротвердость 1100...1400 HV (измерения проводились прибором Микромет при нагрузке 50 г).

Технологический процесс ФПУ кромок проводится при атмосферном давлении и состоит из операций предварительной очистки (любым известным методом, например, промывкой в бензине Б-70 с помощью щетинных щеток, кисточек, салфеток), дефектации (например, визуальным осмотром под микроскопом при 10...50-кратном увеличении и другими методами), сравнении выявленных дефектов (например, дефектов материала, обработки, сборки) с допустимыми дефектами на эталонах и непосредственно ФПУ торцев лопаток путем перемещения плазмотрона. Скорость перемещения 1...10 м/с, расстояние между плазмотроном и обрабатываемой поверхностью 10 – 15 мм, диаметр пятна упрочнения 10 – 12 мм, толщина наносимого покрытия 1...3 мкм. В качестве плазмообразующего газа используется аргон, исходным материалом для образования износостойкого покрытия является жидкий препарат СЕТОЛ. Расход данного препарата не превышает 0,5 г/час, что составляет менее 1кг в год.

Испытания на высокоцикловую усталость лопаток компрессора из Ti-сплава с покрытием методом ФПУ кромок проводилось на Уфимском моторном заводе. Испытания показали повышение усталостной прочности на 30% по сравнению с лопатками без покрытия.

Проводилось большое количество испытаний штампов, твердосплавных пластин, прессножниц, фрез и т.д. Все испытания показали значительное повышение износостойкости.

К преимуществам метода относятся:

- высокая воспроизводимость и стабильность упрочнения за счет двойного эффекта – от износостойкого покрытия и структурных изменений в тонком приповерхностном слое;
- проведение процесса упрочнения на воздухе при температуре окружающей среды, не требуется вакуумных или других ванн;
- вследствие нанесения тонкопленочного покрытия (толщиной не более 3 микрон), укладываемого в допуски на размеры деталей, процесс упрочнения используется в качестве окончательной финишной операции;
- отсутствие изменений параметров шероховатости после процесса упрочнения;
- минимальный нагрев в процессе обработки (не более 100 - 120°С) не вызывает деформаций деталей, а также – позволяет упрочнять инструментальные стали с низкой температурой отпуска;
- тонкопленочное покрытие по микротвердости близко к алмазоподобным покрытиям;
- образующиеся на поверхности упрочнения сжимающие остаточные напряжения при циклической нагрузке повышают усталостную прочность изделия;
- высокая адгезионная прочность сцепления покрытия с основой обеспечивает максимальную сопротивляемость истиранию;
- низкий коэффициент трения способствует подавлению процессов наростообразования при резании или налипания при штамповке и прессовании;
- образующееся на поверхности тонкопленочное аморфное (стеклообразное) покрытие защищает изделие от воздействия высокой температуры (испытания на высокотемпературную воздушную коррозию в течение 100 часов при температуре 800°С).

Недостатки метода ФПУ:

- малая толщина покрытия.

2.6. НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Одним из наиболее приемлемых способов упрочнения торцев рабочих лопаток компрессора высокого давления КВД является метод электроискрового легирования. Толщина упрочненного слоя соответствует 15 мкм.

Метод электроискрового легирования основан на переносе материала анода при электроискровом разряде на катод, которым является обрабатываемая деталь. В зоне контакта покрытия с основным металлом детали наблюдается процесс диффузии. На поверхности обрабатываемой детали образуется слой высокой твердости и износостойкости. Методом электроискрового легирования можно получать покрытия практически из любых токоведущих материалов. Наиболее часто применяются покрытия типа ВК-8, Т15К6, NiAl. Микротвердость указанных покрытий составляет соответственно 1590-2030, 1200-1790 и 1370-1430 кгс/мм².

Метод электроискрового легирования может применяться для упрочнения самых разнообразных деталей любой конфигурации, в том числе и таких ажурных деталей как рабочие лопатки.

Преимуществом метода является:

- формирование высокотвердого слоя по твердости сравнимого с ионно-плазменными покрытиями;
- отсутствие вакуумных камер и сложных воздушных систем откачки;
- малая энергоемкость процесса;
- небольшая площадь, занимаемая установкой.

Недостатком является формирование на обрабатываемой поверхности растягивающих остаточных напряжений.

Указанный недостаток устраняется последующей дробеструйной обработкой упрочняемой поверхности.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК

В результате анализа литературных данных каждому методу применительно к упрочнению торцев, был присвоен определённый балл по 5-ти балльной шкале (1...5), в которой наименьший балл соответствует худшему покрытию, а наибольший – лучшему. Данные по рассмотренным методам сведены в нижеследующую таблицу:

Наименование метода	Преимущества	Недостатки	Оценка преимуществ по пятибалльной шкале
Ионная имплантация	<ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность быстрого изменения состава 2. Возможность процесса при низких температурах 3. Отсутствие проблемы адгезии 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая стоимость и сложность оборудования 2. Недостаточная изученность физических процессов 3. Неглубокое проникновение ионов 	3
Армирование рабочей поверхности методом диффузионной сварки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность приваривания армирующих пластин большой толщины до 5 мм 2. Отсутствие проблем адгезии 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Большая трудоемкость 2. Малая производительность 	3
Вакуумное ионно-плазменное напыление	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая адгезия 2. Синтез соединений, в том числе сверхтвердых 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая стоимость процесса 2. Низкая производительность 3. Ограничение по толщине покрытия 	4
Комбинированный метод вакуумное ионно-плазменное напыление+ ионная имплантация	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая адгезия 2. Синтез соединений, в том числе сверхтвердых 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая стоимость процесса 2. Низкая производительность 3. Недостаточная изученность физических процессов 	3
Электроискровое легирование	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая адгезия 2. Высокая износостойкость. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Создает растягивающие остаточные напряжения 2. После легирования требуется дробеструйная обработка для создания сжимающих напряжений 	4
ФПУ	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая износостойкость 2. Отсутствие проблем адгезии 3. Сжимающие остаточные напряжения 4. Небольшая трудоемкость 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Для проведения ФПУ требуется оснастка 	5

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов А.Ф. Применение покрытий на основе соединений тугоплавких металлов для деталей и узлов ГТД. – Киев: Наукова думка, 1988. – 321 с.
2. Барвинок В.А., Богданович В.И. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. – Москва: Машиностроение, 1999, 309 с
3. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
4. Диденко А.Н., Жулов В.А., Ремнев Г.Е.// II Всесоюзная конференция «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц». – 1991. т.3. – с.65 – 72.
5. Кальнер В.Д., Ковригин В.А., Ярембаш И.Е. Структура и свойства нитридных покрытий на инструментальных сталях// Металловедение и термическая обработка металлов, 1980. - №9. – с. 56 – 58.
6. Ковалевский В.В., Шушутов А.П. Повышение фреттинг-усталостной прочности титановых сплавов нанесением ионных покрытий.// Авиационная промышленность, 1982. - №10. – с. 65 – 66.
7. Ковальчук Ю.М., Карасев А.В. Методика и установка для восстановления изношенных деталей авиационных ГТД.// Вопрос повышения надежности, долговечности и восстановления авиационной техники. – Киев: КИИГА, 1975. – Вып.1. – с. 38 – 41.
8. Колобов Ю.Б., Короков А.Д., Савченко А.О. и др. О выборе параметров ионно-лучевого упрочнения материалов.// II Всесоюзная конференция «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц». – 1991. – с.100 – 200.
9. Коломыцев П.Т. Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. – М.: Металлургия, 1991. – 237с.
10. Любченко А.П., Моцевитный В.М., Бакакин Г.Н. Исследование износа вакуумно-плазменных покрытий NiTi при трении.// Трение и износ, 1983. т.4. – с.892 – 897.
11. Моцевитный В.М. Теплоизоляционный эффект износостойких покрытий при резании.// Докл. АП УССР, 1983. - №12. – с. 67 – 71.
12. Мовчан Б.А., Молашенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – Киев: Наукова думка, 1983. – 231с.
13. Погребняк А.Д., Ремнев Г.Е., Шулов В.А. и др. Физико-химическое состояние поверхности сплава ВТ18У после воздействия мощным ионным пучком.// Поверхность, 1990, №12. – с. 20 – 25.
14. Семенов А.И. Исследование методов повышения фреттинг-стойкости бандажных полок.// Авиационная промышленность. – 1991. - №4. – с. 11 – 12.
15. Сергеев В.В., Майданов Л.П., Кулагин П.С. Повышение износостойкости бандажных полок рабочих лопаток турбин ГТД НК-

- 8-29 НК-86// Авиационная промышленность. – 1989. - №8. – с. 15 – 16.
- 16.Соболев Л.Ю., Ананин В.А. Жаростойкость сталей с покрытием TiN// Структура объемно и поверхностно упрочненной стали. – Новосибирск, 1984. – с.100 – 105.
- 17.Трибологические характеристики тонких пленок TiN и их применение для уменьшения трения и износа.//Thin Sold Films, 1984. - №3. – с.118.
- 18.Тхагасов Х.Г., Ларионов О.А. Влияние ионно-плазменной обработки на свойства пружинных сплавов.// Металловедение и термическая обработка металлов, 1985. - №7. – с. 30- - 38.
- 19.Шулов В.А., Стрычин А.Э, Пастухов К.М. Исследование химического состава жаростойких покрытий Ni-Co-Al-Y, полученных методом прямого ионно-лучевого испарения в вакууме. – Поверхность, №6, 1988.
- 20.Ткаченко Ю.Г. и др. Характеристики трения сплава титана, упрочненного методом электроискрового легирования тугоплавкими карбидами.
- 21.Самсонов Г.В. Верхотуров А.Д. Закономерности эрозии карбидов переходных металлов при электроискровом легировании. – Электронная обработка материалов: 1970, №2, С.27-29.
- 22.Тополянский П.А. Повышение долговечности буровых долот методом ФПУ. Материалы IV Всероссийской практической конференции «Ремонт-2002», 16-18 апреля 2002г., с. 56-59.
- 23.Кирсанов В.В., Суворов А.Л., Трушин Ю.В. Процессы радиационного дефектообразования в металлах. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 185с.
- 24.Ионная имплантация. Под ред. Дж. Хивронины. М.: Металлургия, 1985. – 392с.
- 25.Богданович В.И. Управление эксплуатационными свойствами деталей с вакуумными ионно-плазменными покрытиями при производстве летательных аппаратов. Автореферат диссертации на соискание учёной степени д. т.н. Самара, 2002.
- 26.Малкин В.И. Разработка и внедрение вакуумной ионно-плазменной технологии нанесения специальных покрытий на детали космических аппаратов из титановых сплавов. Автореферат диссертации на соискание учёной степени к.т.н. Самара, 2000.
- 27.Будилов В.В. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства конструкционных сталей и сплавов с вакуумными ионно-плазменными покрытиями. – Уфа.: УГАТУ 1993.
- 28.Бачин В.А., Квасницкий В.Ф. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки. –М.: Машиностроение, 1991. – 352с.
- 29.Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка. М.: Машиностроение, 1981.